

Allgemeines

Formholzrohre werden auf der Grundlage von thermohygromechanisch verändertem Holz – mittels der Formholztechnologie – hergestellt. Weitere Angaben sind dem Abschlussbericht der Projektes Hochleistungsholztragwerke (HHT) und dem HHT-Materialmerkblatt „Formholz“ zu entnehmen.

Die Verdichtung von Holz (hauptsächlich Laubholz) unter Wärme und Druck ist seit langem bekannt. Der Zellaufbau des Holzes, welches nach Erreichen der Erweichungstemperatur des Lignins unter einer Presse verdichtet werden kann, ist die Voraussetzung für das Verdichten. Unter bestimmten hygro-thermischen Bedingungen lässt sich Holz wegen seines Porengehaltes von bis zu 60 Volumenprozent leicht wie ein Schwamm zusammendrücken. Durch die thermomechanische Verdichtung entsteht wegen der chemischen und mechanischen Veränderungen ein neuer Werkstoff. Die höhere Dichte führt zu größeren Festigkeiten.

Auch Formholz wird mittels thermohygromechanischer Verfahren hergestellt. Bei dem patentierten Verfahren werden Brettlamellen aus (derzeit noch ausschließlich) Fichtenholz in einer Mehretagenpresse bei einer Temperatur von etwa 140°C unter Feuchtigkeit und mit einem Druck von etwa 5 MPa senkrecht zur Faserrichtung um etwa 30 % verdichtet. Das verdichtete Material wird anschließend zu massiven Platten zugeschnitten und verklebt. Das Formen der Platten zu (derzeit noch ausschließlich) Rohrprofilen erfolgt nach erneuter Befeuchtung des Holzes in einer Formpresse. Die durch das Verdichten eingebrachten Verformungsreserven werden dabei genutzt. Die wichtigsten Prozessschritte von der sägераu Brettware zum Formholzprofil können wie folgt beschrieben werden: zunächst wird das Material abgerichtet bzw. gehobelt und mit einem Verdichtungsgrad von 25 bis 30 % verdichtet. Anschließend werden die verdichteten Querschnitte zu Platten verklebt und die Platte zum Profil geformt. Am Institut für Stahl- und Holzbau (ISH) der TU Dresden wurden dazu massive Platten aus verdichteter Fichte hergestellt, die danach wiederum unter Wärme und Feuchtigkeit zu runden Hohlprofilen geformt wurden. Dabei wird die Faltung der Wände teilweise wieder rückgängig gemacht. Der Krümmungsradius des Profils hängt von der vorherigen Verdichtung ab. So darf beispielsweise bei einer Verdichtung von 50 % das Maß des inneren Krümmungsradius die Wanddicke des Profils nicht unterschreiten.

Pilotanlage zum Holzformen
ERMAFA, Chemnitz
Rohrprofile bis 1,5 m Länge

Sindelfinger Holzringe
Rohrprofile bis 3 m Länge

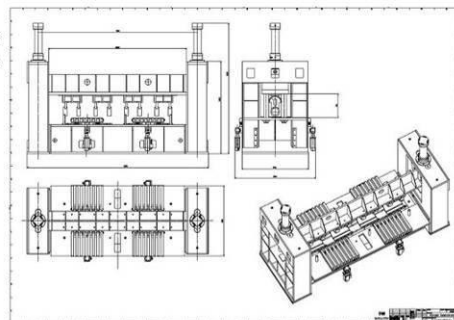


Abb.1: Pilotanlagen zum Herstellen von Formholzröhren

Im Prinzip sind auf diese Weise alle abwickelbaren Formen in beliebiger Länge und Querabmessung herstellbar. Bisher wurden jedoch ausschließlich Rohrprofile hergestellt und untersucht. Die bisher herstellbaren Abmessungen betragen 2,50 m in der Länge bei einem Rohrdurchmesser von 30 cm und einer Wandstärke von 2 cm. Mit einer Keilzinkung lassen sich die Rohre verbinden und so gedanklich endlose Rohre herstellen.

Textile Bewehrung von Formholzröhren

Technische Fasern und Textilien eignen sich in besonderem Maße zur Verstärkung gekrümmter Oberflächen, wobei Verstärkungsgrad, Faserwinkel und Material der jeweiligen statischen Beanspruchung maßgeschneidert angepasst werden

Kontakt	Anspruchspartner	Telefon	E-Mail
Institut für angewandte Forschung im Bauwesen (laFB) e.V., Sophienstr. 33A, D-10178 Berlin	Hr. Hamann, Fr. Lemke	++49 (0)30 28 39 28 -0	mail@iafb.de

können. Die Bewehrung erhöht vor allem die Querzug-, Schub- und Lochleibungsfestigkeit des Holzes und bietet Schutz vor Witterung und anderen äußeren Einwirkungen. Dies setzt jedoch eine guten Verbund und eine hohe Dauerhaftigkeit der textilen Bewehrung voraus. Während Holz von der Festigkeit, Steifigkeit und Dauerhaftigkeit der technischen Fasern profitiert, gewinnen faserverstärkte Kunststoffe (FVK) durch die Umweltfreundlichkeit und den sehr geringen Preis des Holzes an Wettbewerbsfähigkeit, so dass diese Kombination hohe Synergien für das Bauwesen verspricht. Das Formholzrohr verhindert ferner das Beulen der dünnen Bewehrung und trägt zu einer deutlichen Verbesserung der Traglast und Steifigkeit des Verbundbauteils bei.

Die Herstellung eines faserverstärkten Formholzprofils kann auf verschiedene Arten erfolgen – im Flecht- oder Wickelverfahren, bei denen lose Fäden verwendet werden, durch Umwickeln mit flächigen Geweben oder Gelegen sowie durch Aufziehen gestrickter Schläuche, die ein- oder zweiachsig verstärkt sein können. Die trockene Bewehrung wird anschließend mit einem Harz infiltriert, sofern der Faden nicht wie beim Wickelverfahren bereits vorher durch das Harz geleitet und aufgetragen wird. Bei der Aushärtung entsteht ein Laminat, das einen festen Verbund mit der Holzoberfläche eingeht.

Durch eine Faserbewehrung kann die Traglast einer Formholzröhre gegenüber einer nicht verstärkten signifikant verbessert werden, außerdem lässt sich dadurch im Bereich der Anschlussmittel die Duktilität zusätzlich erhöhen. Das Nachbruchverhalten wird maßgeblich verbessert. Die textile Bewehrung kann die Querzug-, Schub- und Lochleibungsfestigkeit des Holzes erhöhen und bietet in Kombination mit der Matrix Schutz vor Witterung und anderen äußeren Einflüssen. Es wurden im HHT-Projekt drei verschiedene Technologien der textilen Verstärkung auf Formholzrohren untersucht. Sowohl die Wickel- und Flechttechnik, als auch Rundgestricke (Schläuche) mit einem Flächengewicht von ca. 400 g/m² je Richtung lassen sich praxisnah einsetzen. Die durchgeführten Druckversuche belegen, dass bereits ein geringer Bewehrungsgrad Traglast und Duktilität der Formholzröhre signifikant steigert.

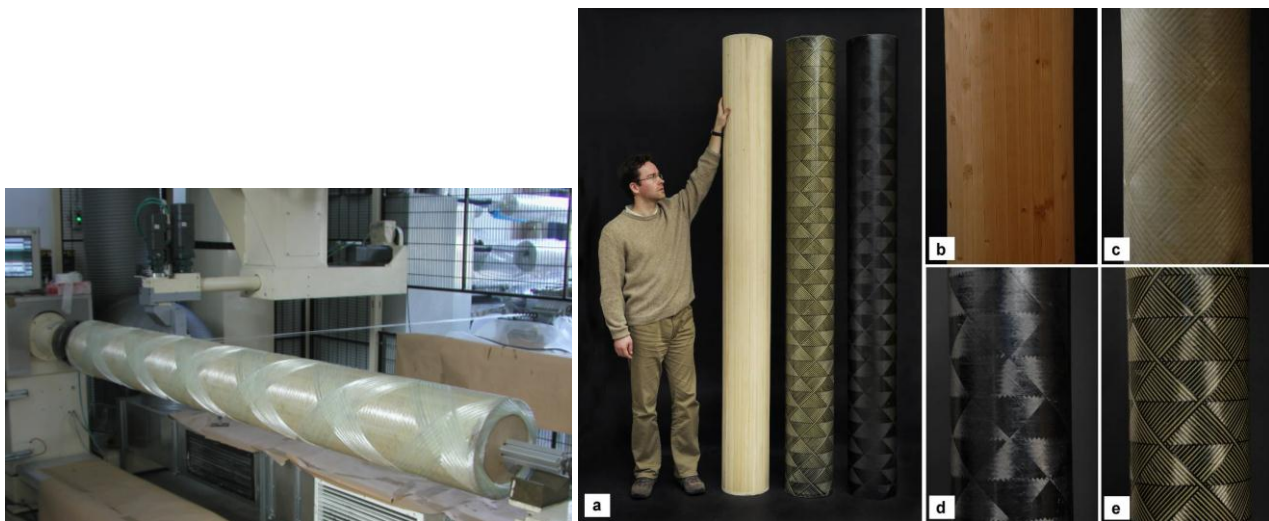


Abb.2: Wickeln einer Formholzröhre und a) Formholzröhren inkl. Detailansichten b) eines unbewehrten Rohres und bewehrter Rohre mit c) E-Glas- d) Kohle- und e) Kohle-Aramidfasern

Bemessungsvorschlag für druckaxial belastete Formholzrohre

Der Bemessungsvorschlag wurde vom Institut für Stahl- und Holzbau (ISH) der TU Dresden entwickelt. Bei der Anwendung dieses Vorschlags gelten folgende Einschränkungen:

- rein axiale Druckbelastung
- Formfaktor des Formholzrohres von $r/t \approx 6,5$ (r – Radius; t – Wandungsdicke)

Unterschieden werden die folgenden Versagensarten:

- I Überschreitung der Festigkeit des Holzes oder der Bewehrung
- II Knicken des Stabes (Stabilitätsversagen)
- III Ring- oder Schachbrettbeulen der Rohrwand (lokale Stabilität)

Kontakt	Ansprechpartner	Telefon	E-Mail
Institut für angewandte Forschung im Bauwesen (laFB) e.V., Sophienstr. 33A, D-10178 Berlin	Hr. Hamann, Fr. Lemke	++49 (0)30 28 39 28 -0	mail@iafb.de

Zur Abschätzung der kritischen Druckspannungen σ_{cr} von Formholzrohren wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen.

Unbewehrte Rohre

$$\text{Nachweis: } \sigma_{cr} \leq \sigma_{cr, \varepsilon 90} \quad (\text{bzw. } \varepsilon_{\phi} \leq \varepsilon_{\phi, cr} - \text{Dehnungskriterium}) \quad (1)$$

Es gilt:

$$\sigma_{cr} = \min \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{cr, I+II} \\ \sigma_{cr, III} \end{array} \right. \quad \text{mit } \sigma_{cr, I+II} = f_{c,0} \cdot k_c \quad \text{und} \quad \sigma_{cr, III} = \frac{t}{4 \cdot r} \cdot E_0 \quad (2)$$

Die erste kritische Spannung berücksichtigt das Spannungs- und Stabilitätsversagen des Formholzrohres

$$\sigma_{cr, I+II} = f_{c,0} \cdot k_c \quad (3)$$

Für den Knickbeiwert k_c gilt das Vorgehen nach dem Ersatzstabverfahren laut DIN 1052: 2008-12, 10.3. Es wird vorgeschlagen, bei der Ermittlung der Ersatzstablänge, die Schubsteifigkeit zu berücksichtigen. Im Folgenden wird die entsprechende Reihenfolge für die Formholzrohre vorgegeben.

$$l_{ef} = \beta \cdot h \cdot \sqrt{1 + \frac{E \cdot I \cdot \Pi^2}{(\beta \cdot h)^2 \cdot S}} \quad (4)$$

mit

- l_{ef} Ersatzstablänge
- β Knicklängenbeiwert (siehe Anhang E der DIN 1052)
- h Stablänge
- I Trägheitsmoment mit $I_{\text{Ring}} = \frac{\Pi}{4} (R^4 - r^4)$
- S Schubsteifigkeit mit $S = \frac{G \cdot A}{n}$
 - G Schubmodul
 - A Querschnittsfläche
 - n Schubkorrekturfaktor; $n = 2$ für dünnwandige Kreisringe

Bei allen Materialwerten sind eigentlich die zugehörigen 5 % Quantilwerte einzusetzen. Für Formholz gibt es zur Zeit noch keine derartigen statistischen Werte, deshalb wird an dieser Stelle auf die Mittelwerte einer Versuchsreihe mit 10 Werten verwiesen, da davon ausgegangen wird, dass die Verhältnisse von Quantilwerte zu Mittelwerten für E und G etwa gleich groß sind.

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i} \quad \text{Schlankheitsgrad} \quad (5)$$

mit

$$i \quad \text{Trägheitsradius } i = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

$$\lambda_{rel,c} = \frac{\lambda}{\Pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (6)$$

mit

- $\lambda_{rel,c}$ bezogener Schlankheitsgrad
- $f_{c,0,k}$ charakteristische Druckfestigkeit in Faserrichtung
- $E_{0,05}$ Elastizitätsmodul, parallel zur Faser

Bei den Werten $f_{c,0,k}$ und $E_{0,05}$ handelt es sich ebenfalls um 5 %-Quantilwerte. Solch statistisch abgesicherte Werte liegen für das Formholz jedoch noch nicht vor. Es wird davon ausgegangen, dass die Verhältnisse von Quantilwerten zu Mittelwerten für diese beiden Materialwerte etwa gleich groß sind, so dass an dieser Stelle mit den Mittelwerte aus Versuchen gerechnet wird. Für eine zukünftige Bemessung sind weitere Versuche und entsprechende Auswertungen erforderlich.

Kontakt	Ansprechpartner	Telefon	E-Mail
Institut für angewandte Forschung im Bauwesen (laFB) e.V., Sophienstr. 33A, D-10178 Berlin	Hr. Hamann, Fr. Lemke	++49 (0)30 28 39 28 -0	mail@iafb.de

Als Mittelwerte können angesetzt werden: $f_{c,0} = 66,7 \text{ N/mm}^2$ und $E_0 = 15600 \text{ N/mm}^2$, so dass sich für den bezogenen Schlankheitsgrad $\lambda_{rel,c}$ ergibt:

$$\lambda_{rel,c} = \frac{\lambda}{\Pi} \cdot \sqrt{\frac{66,7}{15600}} = \frac{\lambda}{\Pi} \cdot 0,065 \quad (7)$$

Damit lässt sich der Faktor k ermitteln:

$$k = 0,5 \left[1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,c} - 0,3) + \lambda_{rel,c}^2 \right] \quad (8)$$

Zu dieser Formel sind zwei Bemerkungen zu machen. Zum einen ist diese Formel explizit für Vollholz, Balkenschichtholz, Brettschichtholz und geregelte Holzwerkstoffe ermittelt worden, so dass die Übertragbarkeit auf Formholz nicht zwangsläufig gegeben ist. Damit zusammenhängend ist der Faktor β_c . Auch dieser existiert nur für die genannten Produkte. Hier sollte der größere in DIN 1052 angegebene Wert $\beta_c = 0,2$ angenommen werden. Es wird aber angemerkt, dass es für Formholz noch einen Wert β_c zu ermitteln gilt bzw. die Gültigkeit der Formel (8) für Formholz zu prüfen ist. Dies sollte Untersuchungsgegenstand weiterer Forschungen sein.

Der Knickbeiwert lässt sich mit diesen Eingangsgrößen bestimmen zu:

$$k_c = \min \left\{ \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel,c}^2}}; 1 \right\} \quad (9)$$

und die kritische Spannung zu:

$$\sigma_{cr,III} = f_{c,0} \cdot k_c \quad (10)$$

Nach der Berechnung der kritischen Druckspannung für Überschreitung der Festigkeit und des Stabknickens $\sigma_{cr,III}$, ist anschließend die kritische Beulspannung σ_{III} zu ermitteln. Es gilt:

$$\sigma_{cr,III} = \frac{t}{4 \cdot r} \cdot E_0 \quad (11)$$

mit

t	Wandungsdicke in mm
r	Radius in mm
E_0	E-Modul in Faserrichtung

Der kleinere der beiden Werte $\sigma_{cr,III}$ und σ_{III} ist der kritischen Druckspannung für das Spalten des unbewehrten Rohres $\sigma_{cr,90}$ gegenüber zu stellen. Diese ergibt sich zu:

$$\sigma_{cr,90} = \frac{f_{t,90} \cdot E_0}{\mu_{0,90} \cdot E_{90}} \quad (12)$$

mit

$f_{t,90}$	Querzugfestigkeit
E_0 / E_{90}	E-Moduln parallel bzw. senkrecht zur Faser
$\mu_{0,90}$	Poissonsche Konstante bzw. Querdehnzahl

Die dazu erforderlichen Materialwerte sind Versuchen zu entnehmen. Auch hier gilt der Hinweis auf die Unsicherheit dieser Werte aufgrund fehlender statistisch abgesicherter Untersuchungen.

Wie vom ISH vermerkt, ist die aus dem Versagenskriterium der Bruchdehnung abgeleitete Druckfestigkeit $\sigma_{cr,90}$ nur eine grobe Näherung. Für bessere Näherungen ist die Kenntnis des vollständigen Spannungszustandes, z.B. mittels der vollständigen Interaktionskriterien nach Tsai-Wu, erforderlich.

Kontakt	Ansprechpartner	Telefon	E-Mail
Institut für angewandte Forschung im Bauwesen (laFB) e.V., Sophienstr. 33A, D-10178 Berlin	Hr. Hamann, Fr. Lemke	++49 (0)30 28 39 28 -0	mail@iafb.de

Bewehrte Rohre

Handelt es sich um ein bewehrtes Rohr, wird das Spannungskriterium im Laminat ($\sigma_{\phi,B} \leq f_{t,B}$) herangezogen.

$$\sigma_{\phi,B} \leq f_{t,B} \quad (\text{Spannungskriterium im Laminat}) \quad (13)$$

Zunächst ist die maximale Ringspannung $\sigma_{\phi,B}$ im Laminat mit der Kesselformel (gilt für schlanke Zylinder) abzuschätzen.

$$\sigma_{\phi,B} \approx \frac{f_{c,90} \cdot r_{i,B}}{t_B} \quad (14)$$

mit

t_B	Dicke der Bewehrungsschicht
r	Radius in mm
E_z	E-Modul in Längsrichtung

Diese ist dann der Zugfestigkeit des Laminats $f_{t,B}$ gegenüberzustellen.

Erkennbar ist, dass für einen vollständigen Bemessungsvorschlag noch einige Untersuchungen zu Materialparametern und Strukturverhalten notwendig sind. Deshalb ist das vorgenannte Vorgehen nur mit den genannten Einschränkungen gültig und durch weitere Forschungsarbeiten zu verifizieren. Für die Einführung in die Praxis ist es zudem erforderlich, ein Sicherheitskonzept zu erarbeiten.

Tragfähigkeit von Formholzrohren

Im Rahmen des HHT-Projektes wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm zur Ermittlung der Druckbeanspruchbarkeit von Formholzrohren durchgeführt. Insgesamt wurden 108 Probekörper gleichen Querschnitts und unterschiedlicher Schlankheitsgrade axial oder exzentrisch auf Druck beansprucht, davon waren 21 unbewehrte Referenzproben.

Die 86 faserbewehrten Rohre wurden in verschiedenen Laminiertechniken armiert: im Handlaminierverfahren mit handelsüblichen Glasfasergeweben oder Schlauchgestrieken, im Flechtverfahren und im Wickelverfahren.

Untersucht wurden dabei:

- der Fasertyp (Glas- und Kohlefasern)
- die Faserorientierungen ($\pm 5^\circ$, $\pm 45^\circ$ und $\pm 85^\circ$) sowie verschiedene Kombinationen
- die Laminatdicke ($t = 0,55$ mm bis $1,1$ mm)
- die Art der Belastung (zentrisch und exzentrisch mit $e = 60$ mm)
- der Einfluss von Imperfektionen wie z. B. Längsrisse von 300 mm Länge
- der Einfluss der Schlankheit (Probenlängen von 80 mm bis 3800 mm)
- der Einfluss von Verbindungen (Rohrverlängerung mittels Keilzinkverbindung)

Die Druckversuche wurden vom ISH in Anlehnung an DIN EN 408 durchgeführt. Die Verformungen in axialer und radialer Richtung wurden mittels induktiver Wegaufnehmer, Dehnmessstreifen und optischen Messverfahren erfasst.

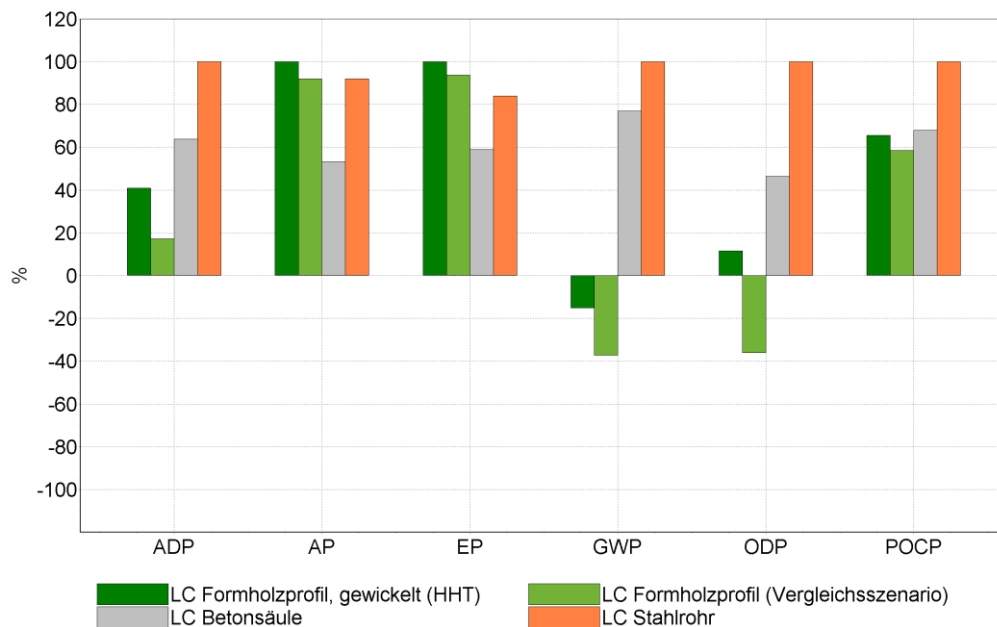
Die Ergebnisse haben gezeigt, dass unverstärkte Formholzrohre beachtliche Traglasten erzielen, wegen der Ausbauchung aber zu spröden Quersugbrüchen neigen. Die mittlere Traglast der unbewehrten Referenzproben von $2,5$ m Länge lag bei 564 kN. Dies entspricht einer mittleren Druckspannung von $41,6$ N/mm². Das Last-Verformungs-Verhalten ist bis zum Bruch linear-elastisch. Im Vergleich zur Referenzprobe erzielten die faserverstärkten Formholzrohre deutlich höhere Traglasten und wiesen ein duktileres Verhalten auf. Im Mittel wurden Traglasten von 900 kN erzielt. Dies entspricht einer mittleren Druckspannung von $56,7$ N/mm². Bezogen auf die unbewehrten Rohre bedeutet dies einen Anstieg der Traglast um ca. 60 %. Ferner belegen die Versuche, dass bereits ein geringer Bewehrungsgrad Traglast und Duktilität der Formholzrohre signifikant steigert. Dies ist damit zu erklären, dass ein flacher Steigungswinkel des Wickelverbundes der Spannung in Umfangsrichtung eine höhere Querspannung entgegensetzt, so dass die Druckfestigkeit des Holzes parallel zur Faser besser ausgenutzt werden kann. Der Einfluss der Wicklung auf die Längssteifigkeit der Rohre ist wegen der geringen Dicke des Laminates klein.

Kontakt	Ansprechpartner	Telefon	E-Mail
Institut für angewandte Forschung im Bauwesen (laFB) e.V., Sophienstr. 33A, D-10178 Berlin	Hr. Hamann, Fr. Lemke	++49 (0)30 28 39 28 -0	mail@iafb.de

Ökobilanz von Formholzrohren

Neben den Ökobilanzdaten der für die Produktion von textilbewehrten Formholzrohren nötigen Eingangsgrößen wie beispielsweise verdichtetes Holz, Formprozess, Glasfasern, Harz, welche den HHT-Materialmerkbältern entnommen werden können, ist vor allem der Vergleich der Formholzrohren mit Stützen gleicher Tragfähigkeit aus Stahl und Beton interessant. Dieser ist in Abb. 3 veranschaulicht. Die betrachtete Formholzstütze hat dabei eine textile Bewehrung aus Glasfasern, welche auf den Holzkern „nassgewickelt“ wurden (Aufbringen von Bewehrung und Harz in einem Schritt). Grundlage für die Berechnung ist eine 2,5 m lange Stütze, die beidseitig gelenkig gelagert ist und eine Traglast von ca. 380 kN aufweisen soll. Für die bewehrte Betonstütze ist festzuhalten, dass diese in der vorliegenden Dimension durchaus größere Lasten tragen könnte (ca. 640 kN). Eine geringere Abmessung war jedoch auf Grund von einzuhaltenden bautechnischen Vorgaben - vor allem wegen der Mindestbewehrung für runde Stützen und der Mindestbetondeckung - nicht möglich.

Das Vergleichsszenario für das Formholzprofil wurde mit in den Vergleich aufgenommen, da sich gezeigt hat, dass die spezifische Herstellung im HHT-Projekt (die Firma verwendet nicht erneuerbare Energien zur Wärmeerzeugung und ist weit vom Einbauort entfernt) optimiert werden kann. Daher wurde ein zweites Szenario modelliert, in dem die Wärmezufuhr vollständig auf der Verbrennung von Holz basiert. Zusätzlich wurde der Transportaufwand reduziert auf 5 tkm pro Formholzprofil was bei einem Gewicht von ca. 25 kg einer Transportdistanz von ca. 200 km pro Profil entspricht.



Abiotischer Ressourcenabbau [kg Sb eq] (ADP, Abiotic Depletion Potential)
 Versauerungspotential [SO₂ eq] (AD, Acidification Potential)
 Ozonabbaupotential [R11 eq] (ODP, Ozone Layer Depletion Potential)

Erderwärmungspotential [CO₂ eq] (GWP, Global Warming Potential)
 Eutrophierungspotential [PO₄] (EP, Eutrophication Potential)
 Sommersmogpotential [Ethen eq] (POCP, Photochemical Oxidation Potential)

Abb. 3: Vergleich der Lebenszyklen der 4 Varianten für Stützen mit 380 kN Traglast

Im Vergleich zu den Lösungen aus Stahl und Beton zeigen sich für beide Varianten der Formholzprofile in drei der Kategorien (ADP, GWP, ODP) deutlich weniger zu erwartende Auswirkungen, auch in der Kategorie POCP sind für die Profile, etwas weniger deutlich, geringere Auswirkungen zu erwarten. Die Kategorien AP und EP sind klassischerweise Kategorien, in denen bei der Verwendung von Holz mit vermehrten Auswirkungen zu rechnen ist, sie können daher als negative Nebeneffekte der Einsparung von nicht erneuerbaren Ressourcen interpretiert werden. Zudem zeigt sich in allen Kategorien, dass sich die Bilanzen der Formholzprofile deutlich verbessern lassen, wenn die Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien gedeckt wird und Transportwege reduziert werden.