

## **Buche (-LVL) in homogenem und hybridem BSH und BSP**

Beech (-LVL) in homogeneous and hybrid Glulam and CLT

Le hêtre (-LVL) comme partie intégrante homogène ou hybride de BLC et de CLT

Gerhard Dill-Langer  
MPA Universität Stuttgart  
DE-Stuttgart





# Buche (-LVL) in homogenem und hybridem BSH und BSP

## 1. Einleitung

Der Einsatz von Laubholz für tragende Anwendungen im Bauwesen ist in quantitativer Hinsicht noch immer auf kleine «Nischen» beschränkt. Die Gründe hierfür sind vielfältig: Neben dem gegenüber Nadelhölzern im Allgemeinen deutlich höheren Preis von Laubhölzern, den technischen Herausforderungen bei Bearbeitung und Verklebung und den Anwendungseinschränkungen der bestehenden Zulassungen und stellt die Verfügbarkeit der spezifischen, für die tragende Anwendung geeigneten Laubholz-Qualitäten häufig einen begrenzenden Faktor für die Entscheidung «Pro Laubholz» dar.

In dem folgenden Paper werden drei aktuelle Ansätze für Weiterentwicklungen bei der Nutzung von heimischem Buchenholz für tragende Zwecke vorgestellt.

Zwei Ansätze befassen sich in den Abschnitten 2 und 3 mit dem seit 2 Jahren auf dem Markt befindlichen neuen Bauprodukt Brettschichtholz aus Buchen-Furnierschichtholz (Buche-FSH-BSH). Bei diesem Produkt wird das Rundholz zu einem hohen Prozentsatz ausgenutzt und die wuchsbedingten Fehlstellen durch einen hohen Homogenisierungsgrad der verklebten Schäl furniere ausgeglichen. Stab- oder balkenförmige Bauteile entstehen durch Verkleben von aus den Furnierschichtholzplatten herausgetrennten Streifen mit ausschließlich längslagigen Furnieren.

Im ersten Abschnitt 2 wird über Versuche berichtet, bei denen Bauteile im «XXL-Format» in Großversuchen getestet wurden, um damit eine sichere, evidenzbasierte Grundlage für eine Erweiterung der für die Markteinführung notwendigen europäischen Bewertung (ETA) auf sehr große Abmessungen mit letztendlich 2,5 m Höhe und 1,2 m Breite zu legen. Durch die Erweiterung des Anwendungsbereiches werden die hohen Festigkeitswerte des Werkstoffes (zur Zeit als GL70 eingestuft) mit nur geringen Abschlägen auch für sehr große Bauteile und damit zur Abtragung bisher im Holzbau nicht erreichbarer Lasten nutzbar.

Der Abschnitt 3 beschäftigt sich mit einer gezielten Kombination von Buchen-Furnierschichtholz mit üblichen Nadelvollholzlamellen in einem Hybridquerschnitt. Hierbei wird empirisch – und anhand eines neuen Rechenmodells – überprüft, inwieweit sich die Tragfähigkeit «normaler» Nadelholz-BSH-Bauteile durch eine anteilmäßig geringe Verstärkung in der Zugzone erheblich vergrößern lassen. Interessant bei diesen Untersuchungen ist neben den reinen Festigkeitswerten auch die Aktivierung eines für Bauholz unter Biegebeanspruchung eher untypischen «gutmütig» quasi-duktilen Versagensverhaltens.

Im Abschnitt 4 wird der Einsatz von Buchen-Vollholz niedriger Qualitäten für die Mittelagen von Brettsperrholz untersucht. Es wird gezeigt, wie Buchenholz, das zum Teil die Anforderungen visueller Festigkeitssortierung nicht erfüllt, wohl aber natürlich gewisse Anforderungen an die Verarbeitbarkeit, bei geschicktem Einsatz im Brettsperrholz-Querschnitt trotzdem erheblich bessere Eigenschaften aufweist als festigkeitssortiertes Nadelholz.

## 2. BSH aus BauBuche im XXL-Format

Zur Erweiterung der zulässigen Querschnittsabmessungen, die bisher auf maximal  $H = 600$  mm und  $B = 300$  mm beschränkt waren, wurden Versuche zur Schub- und Biegefestigkeit und zur Blockverklebung mehrerer Querschnitte durchgeführt.

In den beiden folgenden Abschnitten wird über die Ergebnisse der Biegeversuche berichtet.

### 2.1. Bauteil-Versuche

Zur Ableitung der Biegefestigkeit von Bauteilen  $H > 600$  mm wurden 7 Großbauteile mit den Abmessungen von (Länge  $L \times$  Breite  $B \times$  Höhe  $H$ ) 21000 mm  $\times$  200 mm  $\times$  1320 mm im 4-Punkt-Biegeversuch nach EN 408 [1] geprüft. Die Auflagerspannweite betrug 20 m (15,2 H), der Hebelarm 6 m (4,5 H) und der Bereich des konstanten Biegemomentes 8 m (6,1 H), so dass die Bedingungen nach EN 408 vollumfänglich eingehalten wurden. In der

Nähe der beiden Lasteinleitungsstellen wurden die Träger ausgesteift, um ein vorzeitiges Stabilitätsversagen zu verhindern. Der Prüfaufbau ist in Abb. 1a photographisch dargestellt.

Die Lasten wurden durch zwei in Wegregelung gesteuerte servohydraulische Zylinder mit einer Höchstkraft von je 1000 kN aufgebracht. Während des Versuches wurden die Lasten, die globale Mittendurchbiegung und die lokale Durchbiegung im Bereich des konstanten Biegemomentes gemessen und aufgezeichnet.

Bei sechs der insgesamt sieben Prüfkörper trat ein Biegezugbruch im Bereich des konstanten Biegemomentes auf. Ein Prüfkörper versagte durch einen Schubbruch nahe der halben Trägerhöhe. Da die Traglast dieses Prüfkörpers im Bereich der Traglasten der anderen – durch Biegezug versagten – Prüfkörper lag, wurde für die Versuchsauswertung die Biegerandspannung im Bruchzustand dieses Prüfkörpers als Biegefestigkeit angenommen.

Abbildung 1 b zeigt das Bruchbild eines typischen Biegezugbruches.

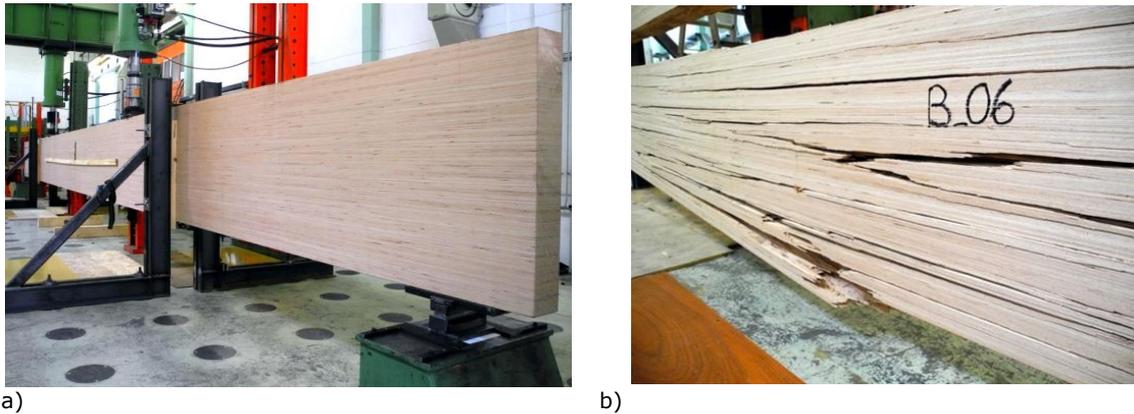


Abbildung 1: XXL-Biegeversuche an Buchen-Furnierschichtholz-Trägern (Auflagerabstand 20 m)  
Versuchsaufbau (a) und typisches Bruchbild: Biegezugbruch in der Randlamelle (b)

Die Versuche ergaben eine mittlere Biegefestigkeit von  $91,5 \text{ N/mm}^2$  und einen Variationskoeffizienten von nur 4,2 %. Der charakteristische Wert der Biegefestigkeit nach EN 14358 [2] beträgt  $81,7 \text{ N/mm}^2$  (für Details siehe auch [3])

## 2.2. Size-Effekt

In Abbildung 2 sind alle der MPA Universität Stuttgart bisher vorliegenden Biegefestigkeiten von Brettschichtholz aus Buchen-Furnierschichtholz in Abhängigkeit von der bauteilhöhe  $H$  eingetragen.

Im Bereich bis  $H = 600 \text{ mm}$  ist neben einem deutlichen – negativen – Größeneffekt zu erkennen, dass die späteren – auf den Anlagen für die Serienproduktion – hergestellten Prüfkörper, die im Rahmen der Zertifizierungserstprüfung entnommen wurden, höhere Biegefestigkeiten bei ähnlicher Trägerhöhe aufweisen als die Vorserien-Prüfkörper der Zulassungsversuche.

Weiterhin sind die neuen Daten der Großversuche für eine Trägerhöhe von  $H = 1320 \text{ mm}$  eingetragen. Für alle Serien sind der Mittelwert, der Bereich der Standardabweichung und der charakteristische Wert nach EN 14358 eingetragen. Zusätzlich sind zwei unterschiedliche Kurven für den size-Effekt abgebildet:

- Als schwarze Linie: der bisher in den Zulassungen angegebene Ausdruck für die höhenabhängige Biegefestigkeit, extrapoliert bis auf eine Trägerhöhe von 2,5 m mit einem Bezugswert von  $70,0 \text{ N/mm}^2$  bei  $H = 600 \text{ mm}$  und einem Exponenten von 0,14.
- Ein geänderter Vorschlag (rote Linie) für die höhenabhängige Biegefestigkeit mit einem Bezugswert von  $75 \text{ N/mm}^2$  für  $H = 600 \text{ mm}$  und einem Exponenten von 0,10.

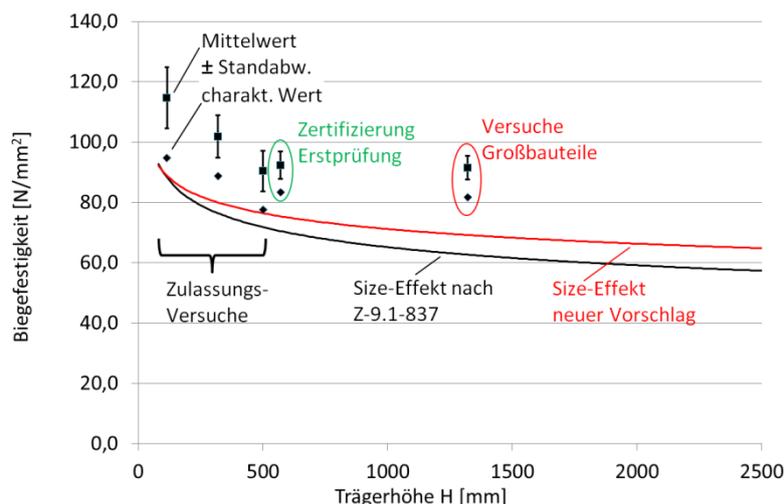


Abbildung 2: Size Effekt der Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buchen-Furnierschichtholz

Es ist zu erkennen, dass die bisher in der deutschen Zulassung [4] und in der ETA 14/0354 [5] angegebene Höhenabhängigkeit den tatsächlichen Size-Effekt bei größeren Trägerhöhen stark überschätzt. Des Weiteren war der Bezugswert von  $70,0 \text{ N/mm}^2$  bereits angesichts der bei der Zulassungserstellung vorliegenden Daten sehr konservativ, wobei zur damaligen Zeit noch sehr wenig Erfahrung mit dem Bauprodukt vorlag.

Die neueren Daten für die Bezugshöhe  $600 \text{ mm}$  (aus der Erstprüfung bei der Zertifizierung) liegen dann tendenziell noch etwas höher.

Die nunmehr auf Grundlage aller verfügbaren Daten vorgeschlagenen Rechenwerte

$$f_{m,y,k} (600\text{mm}) = 75 \text{ N/mm}^2, f_{m,y,k} (120 \leq H \leq 2500) = f_{m,y,k} (600\text{mm}) \cdot (600/H)^{0,1}$$

sind – insbesondere für größere Trägerhöhen – noch immer als eher konservativ anzusehen. Für eine maximale Trägerhöhe von  $2500 \text{ mm}$  erhält man nach dem neuen Vorschlag einen extrapolierten Biegefestigkeitswert von  $65 \text{ N/mm}^2$ .

Vor dem Hintergrund der beschränkten Prüfkörperanzahl bei den Großversuchen und der generellen Problematik der Extrapolation wäre eine weitere Anhebung der Rechenwerte für sehr große Bauteile nur mit Hilfe eines kalibrierten und validierten Rechenmodells möglich: an solchen Ansätzen wird zur Zeit gearbeitet.

### 3. Hybrid-BSH aus Fichte und BauBuche

Da nicht für alle Anwendungen homogene Träger aus Buchen-Furnierschichtholz sinnvoll und wirtschaftlich sind, wird in einem ZIM-Forschungsprojekt mit dem Industriepartner Fa. Hess Timber die gezielte Kombination aus üblichen Nadelvollholz-Lamellen mit hochfesten Furnierschichtholzlamellen in einem BSH-Querschnitt untersucht. Nachfolgend wird über erste empirische und rechnerische Ergebnisse zur Biegefestigkeit von einseitig in der Zugzone verstärkten Hybridträgern berichtet.

#### 3.1. Experimentelle Untersuchungen

Für die ersten experimentellen Untersuchungen wurden insgesamt 10 Brettschichtholzträger hergestellt und geprüft. Es wurden 5 Konfigurationen mit je zwei Prüfkörpern pro Konfiguration untersucht:

- 2 Referenzträger aus Fichten-Vollholzlamellen der Sortierklasse S10 ohne Verstärkungslamellen
- je 2 Hybrid-Träger kombiniert aus Fichten-Vollholzlamellen der Sortierklasse S10 mit jeweils 1, 2, 3 oder 4 Buchen-Furnierschichtholzlamellen in der Zugzone.



Abbildung 3: Ansicht des Prüfaufbaus für das Beispiel eines Trägers mit 2 Buchen-Furnierschichtholzlamellen



Abbildung 4: Bruchbild eines Hybridträgers mit 2 Verstärkungslamellen mit lokal ausgeknicktem Druckrand und vollständig intaktem Zugrand

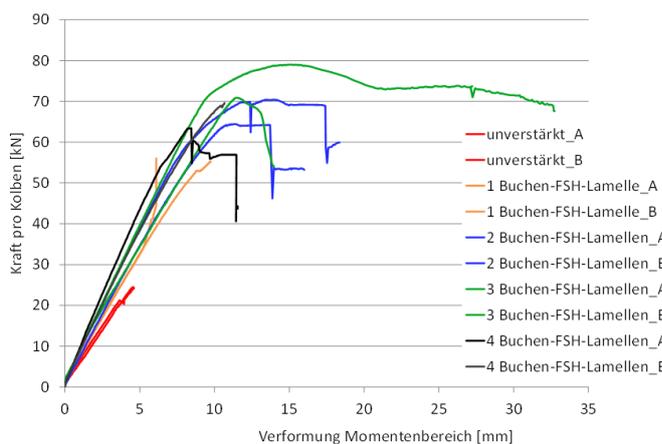


Abbildung 5: Last-Durchbiegungskurven für unterschiedliche Verstärkungsgrade

bruch erreicht wurde. Nach der Prüfung war also der Druckbereich zerstört und der Zugbereich noch vollständig intakt. Insgesamt konnte bei den Verstärkungsgraden zwischen 13 und 27 % das quasi-duktilen Druckversagen aktiviert werden, was hinsichtlich des Last-Verformungsverhaltens zu einem ausgesprochen «gutmütigen» Versagen führte (siehe Abbildung 5).

Die 11 m langen Träger wiesen eine Höhe und Breite von  $H = 600$  mm und  $B = 150$  mm auf (je 15 Lamellen der Dicke 40 mm).

Die Träger wurden in einem 4-Punkt-Biegeversuch in Anlehnung an die europäische Prüfnorm EN 408 geprüft. Neben der Biegefestigkeit und dem Biege-E-Modul wurde auch die Dehnungsentwicklung im Zug- und Druckbereich mittels Dehnungsmessstreifen aufgenommen (Prüfaufbau siehe Abb. 3).

Die beiden Prüfkörper ohne FSH-Verstärkung versagten erwartungsgemäß absolut spröde im Biegezugbereich aufgrund von wuchsbedingten Schwachstellen (Astansammlungen zusammen mit Faserabweichungen). Aufgrund des gezielt sehr schwach ausgewählten Holzes wurden vergleichsweise niedrige Biegefestigkeiten erreicht.

Die beiden Prüfkörper mit **einer** Buchen-Furnierschichtholzlamelle in der Zugzone versagten jeweils durch einen vergleichsweise spröden Biegezugbruch in der Furnierschichtholzlamelle bzw. durch einen kombinierten Bruch in der Furnierschichtholzlamelle und der untersten Fichten-Vollholzlamelle. Die mittlere Biegefestigkeit lag mit  $44,3$  N/mm<sup>2</sup> erheblich (um das 2,3 fache) höher als die der unverstärkten Träger.

Die meisten Prüfkörper mit **2 bis vier** Verstärkungslamellen versagten ausschließlich im Druckbereich mit deutlicher Ausbildung von Stauchfalten und nachfolgendem lokalem Ausknicken der oberen Lamellen (siehe Abb. 4). Bei einigen Prüfkörpern versagte dann in der Folge die durch Lastumlagerung stärker beanspruchte Biegezugzone, so dass es in diesen Fällen letztendlich zu einem Trennbruch kam. Bei anderen Prüfkörpern fiel die Last alleine durch die Druckschädigung nach Überschreiten der Höchstlast deutlich ab, ohne dass ein Biegezug-

Die mittlere Biegefestigkeit lag bei den Prüfkörpern mit zwei FSH-Lamellen mit  $53,9 \text{ N/mm}^2$  um das 2,7-fache höher als die der unverstärkten Träger. Die relative Festigkeitserhöhung für 3 und 4 Verstärkungslamellen gegenüber den unverstärkten Trägern nahm mit einem Faktor von 3,0 und 2,75 nur noch wenig gegenüber der der Konfiguration mit 2 Verstärkungslamellen zu.

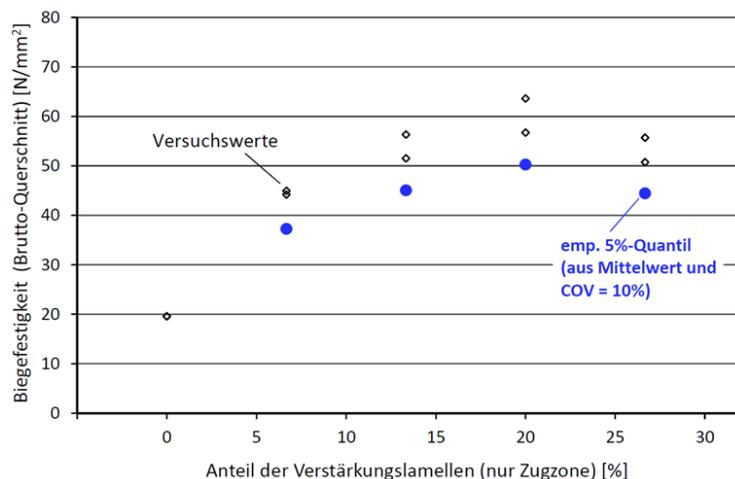


Abbildung 6: Biegefestigkeiten für unterschiedliche Verstärkungsgrade

Mit dem Mittelwert der beiden Versuchsergebnisse und einer angenommenen Streuung von  $\text{COV} = 10\%$  kann man die charakteristischen Biegefestigkeitswerte abschätzen, die zwischen  $37,2 \text{ N/mm}^2$  (für eine Verstärkungslamelle =  $6,7\%$  Volumenanteil) und  $50,3 \text{ N/mm}^2$  (für drei Verstärkungslamellen =  $20,7\%$  Volumenanteil) liegen. Die Biegefestigkeitsergebnisse in Abhängigkeit vom Verstärkungsgrad sind in Abb. 6 graphisch dargestellt.

### 3.2. Modellierung

Für eine Verallgemeinerung der Prüfergebnisse, d. h. z. B. eine Übertragung der Prüfergebnisse auf andere Querschnittskonfigurationen, andere Vollholzklassen oder andere Furnierschichtholzeigenschaften ist eine rechnerische Modellierung notwendig. Für eine Modellierung im elastischen Bereich reicht zunächst die einfache Verbundtheorie aus, wodurch bei einem aufgebrachtten Biegemoment die Verschiebung der neutralen Achse und die Spannungsumlagerung auf die steiferen Verstärkungslamellen zu berechnen ist. Bei Berücksichtigung des nichtlinearen Verhaltens ist entweder die sogenannte plastische Verbundtheorie oder ein Modell unter Einbeziehung des tatsächlichen dehnungsentfestigenden Verhaltens zu verwenden. Auf Grundlage der – hier nicht im Detail dargestellten – empirischen Untersuchungen zum lokalen Spannungs-Dehnungsverhalten zeigte sich die Notwendigkeit einer komplexeren Modellierung einschließlich streuender Materialeigenschaften und lokalisierter Dehnungsentfestigung.

Es wurde daher ein Finite-Element-Modell (im kommerziellen FE-Code ABAQUS) implementiert, dessen Materialgesetz für den Zug- und Druckbereich dehnungsentfestigende Schädigungsterme vorsieht. Für ein stabiles Konvergenzverhalten ist dann die Anwendung eines expliziten (pseudo-zeitabhängigen) Lösungsalgorithmus notwendig. Zur Abbildung der streuenden Materialeigenschaften wurden in einem separaten Programmcode (PYTHON) zufällige – den vorgegebenen Verteilungen entsprechenden – Parametersätze für Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften erstellt, die bei jedem Rechenlauf auf das FE-Modell übertragen werden können und somit Monte-Carlo-Rechnungen ermöglichen (für Details siehe [6]).

Als erstes Ergebnis des noch nicht zu Ende entwickelten und vor allem noch nicht kalibrierten Modells sollen hier rechnerische Lastverschiebungskurven den empirischen für den Fall von 2 Verstärkungslamellen ( $13\%$  Verstärkungsgrad) gegenübergestellt werden. In Abb. 7 sind die Simulationsergebnisse (40 Rechenläufe mit stochastisch variierten Eingangsdaten) zusammen mit den beiden experimentellen Kurven abgebildet. Es ist zu erkennen, dass sich durch das angenommene dehnungsentfestigende Verhalten im Druckbereich global ein – von den stochastischen Variablen abhängig – unterschiedlich stark ausgebildetes duktileres Verhalten entwickelt.

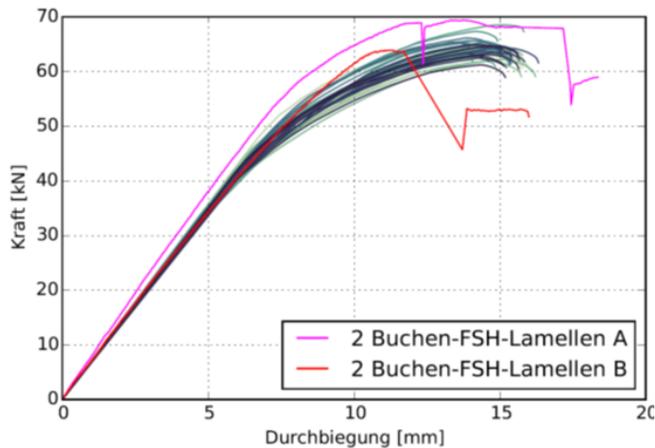


Abbildung 7: Last-Durchbiegungsverhalten für Hybridträger mit einem Verstärkungsgrad von 13% (2 Buchen-Furnierschichtholzlamellen):

**rote / pinke Linie:** experimentelle Messung an zwei Prüfkörpern

**grün-blaue Linien:** Ergebnisse der Modellierung mit Entfestigung in der Druckzone und stochastischer Verteilung der Druckfestigkeiten

Der Bereich der Höchstlast wurde durch die Modellierungsergebnisse ebenfalls gut abgeschätzt, obwohl – wie oben erwähnt – keine vollständige Kalibrierung der Parameter durchgeführt wurde, so dass die effektive Streuung sowohl der Festigkeiten als auch der Steifigkeiten zu gering ausfällt. Durch die bisher noch nicht aktivierte Schädigung in der Zugzone ergeben sich in der Rechnung auch tendenziell glattere Kurvenverläufe als im Experiment.

Das Rechenmodell wird im Rahmen eines Forschungsprojektes kontinuierlich weiterentwickelt und soll schließlich für die Ableitung von Rechenwerte für beliebige Hybridträger-Konfigurationen zur Verfügung stehen.

## 4. Hybrid-BSP mit Buchenholz-Lagen

Eine Nutzung von Buchenholz als Mittellagenmaterial für Brettsperrholz, insbesondere in Kombination mit Fichtenholzdecklagen erscheint aus wirtschaftlichen und technischen Gründen sehr vielversprechend. Es ist zu erwarten, dass die bisher weitestgehend unerforschten Rollschubkennwerte von Buchenholz – als maßgebliche Größen der Brettsperrholzquerlagen – deutlich höher sind als die Rollschubeigenschaften von Fichtenholz.

Im Rahmen des andauernden europäischen WoodWisdom-Net-Forschungsprojekts «European hardwoods for the building sector» sollen vertiefte Kenntnisse zu den Rollschubeigenschaften von Buchenholz und dem Leistungspotenzial von Brettsperrholz mit Buchenholzlagen gewonnen werden. In den folgenden beiden Abschnitten wird über erste experimentelle Ergebnisse berichtet.

### 4.1. Scherversuche an Buchenholz niedriger Qualität

Ziel der Rollschubversuche war es, die Rollschubeigenschaften einzelner Bretter in Abhängigkeit des Schnittbildes bzw. der Jahrringorientierung zu untersuchen. Der gewählte Versuchsaufbau orientiert sich im Wesentlichen an dem in DIN EN 408 beschriebenen Versuchsaufbau zur Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung von Bauholz für tragende Zwecke (für Details siehe auch [7]).

Abbildung 8 a zeigt den realisierten Versuchsaufbau der Rollschub-Scherprüfung. Die Überstände der aufgeklebten Stahlplatten wurden so gewählt, dass bei den gegebenen Prüfkörperabmessungen der Winkel zwischen Lasteinleitung und «Prüfkörperlängsachse» (in Richtung der Prüfkörperbreite) dem in DIN EN 408 vorgegebenen Winkel von 14° entsprach.

Die Buchenholzprüfkörper wurden mit einem Epoxidharz auf die Stahlplatten geklebt. Zur Verbesserung der Verklebungsgüte wurden in die sandgestrahlten Stahloberflächen Rechteckriefen eingefräst. Die Versuche wurden weggesteuert mit einer konstanten Querhauptverschiebung von bis zum Bruch geprüft. Die Verformung wurde mittels eines induktiven Wegaufnehmers gemessen, welcher mittig auf der ersten Stahlplatte fixiert wurde und auf einem massiven Stahlbügel aufsetzte. Der Bügel wurde mittig auf der zweiten Stahlplatte festgeschraubt und umschloss den Prüfaufbau vollständig, ohne diesen an einer weiteren Stelle zu berühren.

Für die Gesamtheit aller Schnittbilder und Jahrringorientierungen wurde ein mittlerer Rollschubmodul  $G_{90,90,mean}$  von  $(370 \pm 70)$  N/mm<sup>2</sup> ermittelt.

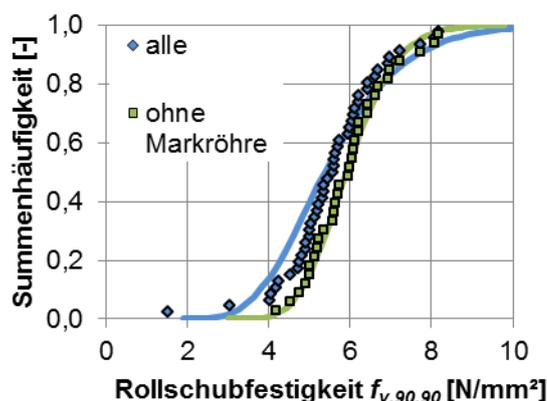
Hinsichtlich unterschiedlicher Schnittbilder ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Einschnittbildern. Auch die Markröhrenprüfkörper mit deutlichen Schwindrissen wiesen einen ähnlichen Rollschubmodul auf wie die anderen Einschnittbilder. Vergleicht man den erhaltenen mittleren Rollschubmodul von 370 N/mm<sup>2</sup> mit dem in den bauaufsichtlichen Zulassungen für Fichten-Brettsperrholz üblicherweise festgelegten Wert von rd. 50 N/mm<sup>2</sup>, so liegt der hier erhaltene Wert rund **um den Faktor sieben höher**.

Für das Gesamtkollektiv der Prüfkörper wurde eine nach DIN EN 14358 berechnete charakteristische Rollschubfestigkeit  $f_{v90,90,05}$  von 3,3 N/mm<sup>2</sup> ermittelt.

Im Gegensatz zu den Rollschubmodul-Ergebnissen ist für die Rollschubfestigkeit ein negativer Einfluss der innenliegenden Markröhre bzw. den damit verbunden ausgeprägten Schwindrissen zu erkennen, wodurch auch zwei Ausreißer mit Rollschubfestigkeiten  $\leq 3,1$  N/mm<sup>2</sup> auftraten. Abbildung 8 b zeigt die Summenhäufigkeitsdiagramme der ermittelten Rollschubfestigkeiten zum einen für die Gesamtheit der Rift-, Halbrift- und Fladerschnitt-Prüfkörper sowie der Prüfkörper mit Markröhre (blau markiert) und zum anderen für das gesamte Prüfkörperkollektiv ausgenommen der Prüfkörper mit Markröhre.



a)



b)

Abbildung 8: Scherversuche an Buchen-Lamellen: Versuchsaufbau (a) und Häufigkeitsverteilung der Rollschubfestigkeiten (b)

## 4.2. Biegeversuche an homogenem und hybridem Buche-BSP

Für eine erste Testserie wurden sechs dreilagige Brettsperrholzplatten mit den Abmessungen  $b = 300$  mm,  $h = 90$  mm und  $l = 1200$  mm unter Laborbedingungen hergestellt. Für vier «homogen» aufgebaute Elemente wurden die aus Buchenholzbohlen geringer Güte hergestellten Mittellagen mit qualitativ hochwertigen, visuell nach DIN 4074-5 sortierten Buchendecklagen der Sortierklasse LS13 kombiniert; für zwei weitere «hybrid» aufgebaute Elemente wurden visuell nach DIN 4074-1 sortierte Fichtendecklamellen der Sortierklasse S13 verwendet. Die Lamellendicke betrug jeweils 30 mm, woraus sich eine Plattendicke von 90 mm ergibt.

Als Klebstoff wurde für drei homogen und ein hybrid aufgebautes Brettsperrholzelement ein Phenol-Resorcinharz-Klebstoff verwendet. Jeweils ein homogenes und ein hybrides Brettsperrholzelement wurden mit einem Einkomponenten-Polyurethanklebstoff nach vorheriger Primer-Behandlung verklebt. Die verwendeten Klebstoffe sind für die Buchen-

holzverklebung nachweislich geeignet. Die Schmalkanten der Deck- und Mittellagen wurden nicht verklebt. Die unter Laborbedingungen hergestellten Brettsperrholzelemente wurden zur Ermittlung der Rollschubeigenschaften gemäß den Vorgaben von FprEN16351 im Biegeversuch geprüft. Abbildung 9 a zeigt den realisierten Versuchsaufbau mit einem eingebauten hybriden Brettsperrholzprüfkörper. Sowohl bei den homogen als auch bei den hybrid aufgebauten Brettsperrholzelementen erfolgte der Bruch ausgehend von dem Rollschubversagen einer Mittellagenlamelle, wobei sich die schräg verlaufenden Risse als Längsschubversagen in den Decklagen nahe der Klebefuge fortsetzten (Abb. 9 b).

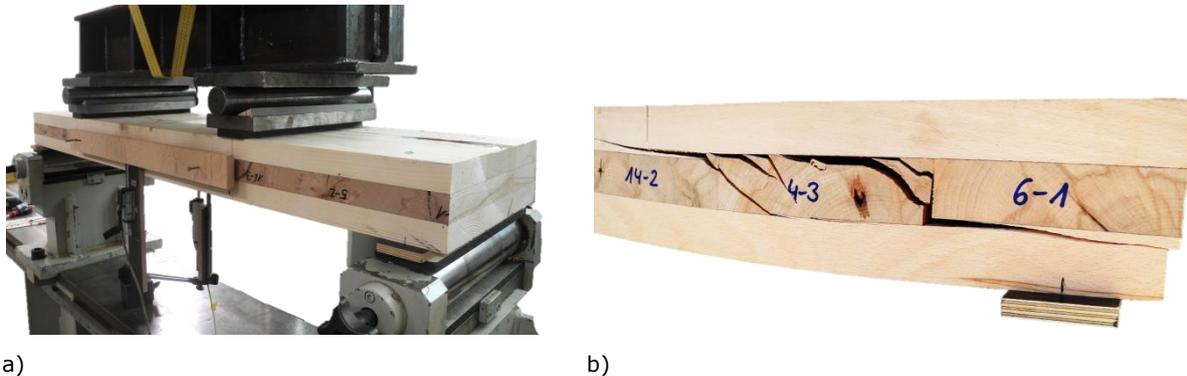


Abbildung 9: Biege-Schubversuche an Hybrid-BSP mit Buchen-Mittellagen: Versuchsaufbau (a) und typisches Bruchbild: Rollschub in den Buchen-Lamellen (b)

Tabelle 1 enthält eine Zusammenstellung der wichtigsten Versuchsergebnisse. Die Prüfergebnisse wurden mittels Schubanalogieverfahren ausgewertet. Für die wesentlichen Eingangsgrößen der Berechnung – Elastizitätsmodul und Längsschubmodul der Decklagen – wurden bei den Fichtenholzdecklagen die Werte der Festigkeitsklasse C30 gemäß DIN EN 338 mit  $E_{0,mean} = 12000 \text{ N/mm}^2$  und  $G_{mean} = 750 \text{ N/mm}^2$  verwendet.

Für die homogen aus Buche aufgebauten Elemente erfolgte die Berechnung ausgehend von den in der Zulassung für Buchen-Brettschichtholz Z-9.1-679 [8] für GL 28h bis GL 36c festgelegten Steifigkeitskennwerten,  $E_{0,g,mean} = 13500 \text{ N/mm}^2$  und  $G_{g,mean} = 1000 \text{ N/mm}^2$ . Für ein Element wurde der Elastizitätsmodul entsprechend der um rd. 10% niedrigeren Rohdichte der Decklagen auf  $0,9 \times 13500 \text{ N/mm}^2 = 12150 \text{ N/mm}^2$  reduziert.

Die Iterationsberechnungen ergaben einen mittleren Rollschubmodul von  $380 \text{ N/mm}^2$ , der dem im Scherversuch an einzelnen Lamellen ermittelten mittleren Rollschubmodul von  $370 \text{ N/mm}^2$  sehr gut entspricht.

Tabelle 1: Experimentelle und rechnerische Ergebnisse der Rollschub-Biegeprüfung von homogenen und hybriden Brettsperrholzelementen mit Querlagen aus Buche; angegeben sind jeweils die Mittelwerte für 4 Prüfkörper (homogen) bzw. 2 Prüfkörper (hybrid)

Aufbau	Buche-/Fichte-Längslagen		Buche-Querlagen	Prüfergebnisse				Rechen-ergebnisse	
	$\rho_{12,mean}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$E_{m,est}$ [N/mm <sup>2</sup> ]		$\rho_{12,mean}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$w_{max}$ [mm]	$E_{m,g}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{m,l}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{90,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
homogen: Buchedecklagen	649	13413	686	173	17,0	11275	13250	403	4,4
hybrid: Fichtedecklagen	472	12000	693	128	14,3	10300	13250	350	3,2

Unter Annahme der berechneten Rollschubmodule wurden mittels des Schubanalogieverfahrens die Rollschubfestigkeiten der Brettsperrholzelemente näherungsweise berechnet. Für die homogenen Buchen-Brettsperrholzelemente liegen die Rechenergebnisse für  $f_{v,90,90}$  im Bereich von  $4,0 \text{ N/mm}^2$  bis  $5,2 \text{ N/mm}^2$  und entsprachen damit den in den Rollschub-Scherversuchen ermittelten Werten gut. Die mittlere Rollschubfestigkeit

der hybrid aufgebauten Brettsperrholzelemente betrug  $3,2 \text{ N/mm}^2$ . Damit liegt auch die Rollschubfestigkeit der Hybridbauten bei mehr als dem Doppelten von homogenem Fichte-BSP.

Der Einfluss unterschiedlicher Einschnittarten auf die Rollschubeigenschaften von Buchenlamellen wird in [9] ausführlich dargestellt und analysiert.

## 5. Zusammenfassung

In den vorgestellten Untersuchungen wurden weitere Schritte auf dem Weg einer verbesserten und wirtschaftlicheren Anwendung von Buchenholz für tragende Zwecke gegangen:

- Für den Werkstoff Furnierschichtholz aus Buchenholz und die daraus durch Verklebung hergestellten Brettschichtholzquerschnitte konnte gezeigt werden, dass das bisher für kleinere Bauteile festgestellte hohe Festigkeitsniveau auch bei sehr großen Bauteildimensionen erhalten bleibt. Dies eröffnet – nach Umsetzung in der entsprechenden europäisch technischen Bewertung – einen deutlich größeren Spielraum der Anwendbarkeit.
- Die Kombination von Fichten-Vollholz als preisgünstigem Standard-Werkstoff mit hochwertigen Lamellen aus Buchen-Furnierschichtholz hat ein besonders großes Potential im konstruktiven Ingenieurbau. In einer ersten Studie konnte die Machbarkeit und der prinzipiell mögliche Tragfähigkeitsgewinn quantitativ nachgewiesen werden.
- Dass auch Buchenholz niedrigerer Qualitäten bei geschicktem Einsatz als Mittellage in Brettsperrholz eine erhebliche Verbesserung der entscheidenden Rollschubeigenschaften bewirken kann, wurde in der dritten vorgestellten Studie experimentell gezeigt. Damit eröffnet sich potentiell für tragende Anwendungen von Buchenholz eine mengenmäßig eventuell nicht ganz unbedeutende Verwendungsmöglichkeit im Holzbau.

## 6. Literatur

- [1] DIN EN 408:2012 Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften
- [2] DIN EN 14358:2007 Holzbauwerke – Berechnung der 5%-Quantile für charakteristische Werte und Annahmekriterien für Proben
- [3] Aicher, S., Dill-Langer, G. (2015) BauBuche im XXL-Format – Versuche und Europäische technische Zulassung, Tagungsband 3. Stuttgarter Holzbausymposium, MPA Universität Stuttgart, S. 79-87
- [4] AbZ Z-9.1-837 (2013) Brettschichtholz aus Buchen-Furnierschichtholz, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
- [5] ETA -14/0354 (2014) Brettschichtholz aus Laubholz – Buchenfurnierschichtholz für tragende Zwecke, Österreichisches Institut für Bautechnik, Wien
- [6] Dill-Langer, G. (2015) Hybrid-Brettschichtholz aus Fichte und BauBuche, Tagungsband 3. Stuttgarter Holzbausymposium, MPA Universität Stuttgart, S. 55-68
- [7] Aicher, S. Hirsch, M. (2015) Brettsperrholz mit Buchenholzlagen - Leistungspotential, erste Ergebnisse, Tagungsband 3. Stuttgarter Holzbausymposium, MPA Universität Stuttgart, S. 69-77
- [8] AbZ Z-9.1-679 (2014) BS-Holz aus Buche und BS-Holz Buche-Hybridträger. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
- [9] Aicher, S., Christian, Z., Hirsch, M. (2015) Rolling shear modulus and strength of beech wood laminations, eingereicht in Holzforschung