

Lucas Bienert: Plattentragverhalten von aufgelöstem hybridem Brettsperrholz

Vortragender:

Bienert, Lucas

M.Sc.

Lehrstuhl für Holzbau und

Baukonstruktion

Technische Universität München

lucas.bienert@tum.de



- seit 2021 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der TUM
- von 2019 bis 2021 Projektengineer beim Brett-schichtholzhersteller Mayr Melnhof in Olsberg
- bis 2019 Studium des Bauingenieurwesens an der Leibniz Universität Hannover

Autoren: Lucas Bienert, Technische Universität München

Zusammenfassung

Um die Effizienz von Holzbauprodukten zu erhöhen, werden bei aufgelöstem hybridem Brettsperrholz (AHBSP) die Mittellagen von Brettsperrholz (BSP) in Laubholz ausgeführt und die Laubholzbretter im Abstand zueinander angeordnet, um Material einzusparen. Um solche Elemente unter Plattenbeanspruchung bemessen zu können, sind mechanische Versuche durchzuführen, um die nötigen Festigkeiten und Steifigkeiten zu ermitteln. Ergänzt durch Simulationen können daraus Ansätze zur Bemessung hergeleitet werden.

An der Technischen Universität München konnte gezeigt werden, dass aufgelöste hybride Platten die gleiche Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit erreichen können wie vergleichbare herkömmliche BSP-Platten. Es wurden effektive Rollschubfestigkeiten ermittelt, die zwar noch geringer sind als die Rollschubfestigkeit von Fichte, was jedoch durch die Anordnung einer Auflagerverstärkung ausgeglichen werden kann. Die effektiven Biegesteifigkeiten unterscheiden sich praktisch nicht von denen bei herkömmlichem BSP. Eine Herausforderung für die Simulation und Bemessung stellen Spannungskonzentrationen im Inneren der aufgelösten Struktur dar.

1. Einleitung

1.1 Hintergrund

Im Rahmen des Forschungsprojekts LaNaSys [1] an der Technischen Universität München wird an der Weiterentwicklung von Brettsperrholz (BSP) geforscht. Das Ziel des Forschungsprojekts ist einerseits eine Materialeinsparung durch die Auflösung der inneren Lagen des BSPs, d.h. Verlegung der Bretter im Abstand zueinander. Andererseits soll durch die Nutzung der entstehenden Hohlräume z.B. für Litzen zur Vorspannung in Querrichtung auch eine Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten von BSP erreicht werden, um der zukünftigen Nachfrage nach größeren, komplexeren Bauwerken aus Holz gerecht zu werden.

1.2 Konzept und Aufbau von aufgelöstem hybridem Brettsperrholz

Die Auflösung der inneren Lagen des BSPs wird durch die Verwendung von Laubholz ermöglicht, das bessere Materialeigenschaften gegenüber dem Nadelholz aufweist (vgl. Abschnitt 2.2). Ein Beispiel eines Aufbaus des entstehenden aufgelösten hybriden Brettsperrholzes (AHBSP) ist in Abb. 1 dargestellt.

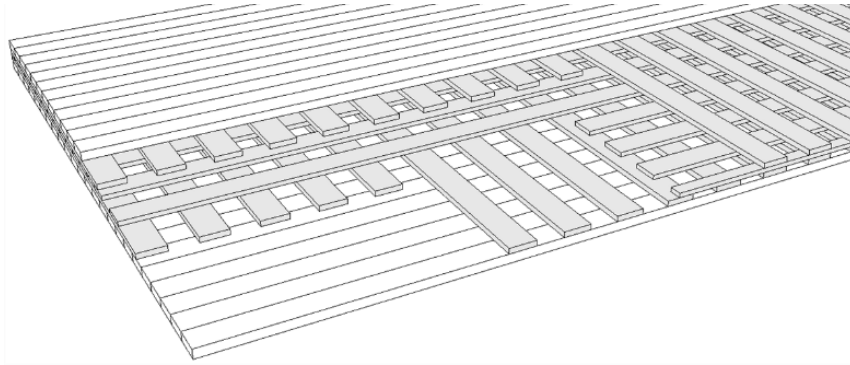


Abb. 1: Blick in eine aufgelöste hybride Brettsperrholzdecke (weiß = Fichte, grau = Buche)

1.3 Zielsetzung und Methoden

In diesem Beitrag soll es um das Plattentragverhalten der AHBSP-Elemente gehen, zunächst beschränkt auf einachsige spannde Einfeldträger. Das Ziel ist die Erarbeitung der mechanischen Grundlagen für den Entwurf und die Bemessung von AHBSP-Platten. Dabei wird eine Leistungsfähigkeit angestrebt, die derjenigen von herkömmlichem BSP gleicht oder diese übertrifft. Am Ende soll aus den Ergebnissen ein erster Bemessungsansatz entwickelt werden.

Für die Erreichung des genannten Ziels ist die zentrale Methode die Durchführung von mechanischen Versuchen. Diese werden ergänzt durch numerische Simulationen mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) sowie analytische Vergleichsrechnungen.

2. Entwicklung von aufgelöstem hybriden Brettsperrholz

2.1 Vorüberlegungen

Entscheidend für die Entwicklung von AHBSP ist es, die Art und den Grad der Auflösung der inneren Lagen zu quantifizieren. Dafür wird zunächst die Quer- und Längslagedichte definiert, siehe Formeln (1) und (2).

$$\text{Querlagedichte:} \quad d_q = b_q / (b_q + e_q) \quad (1)$$

$$\text{Längslagedichte:} \quad d_l = b_l / (b_l + e_l) \quad (2)$$

mit:	d_q, d_l	[-]	Quer- und Längslagedichte
	b_q, b_l	[mm]	Breite eines Brettes in der Quer- bzw. Längslage
	e_q, e_l	[mm]	Abstand der Bretter in der Quer- bzw. Längslage

Die Auflösung ist konstant über die Länge bzw. Breite einer Platte, kann jedoch ergänzt werden um eine sogenannte Auflagerverstärkung, d.h. Verlegung der Bretter ohne Abstand im Auflagerbereich über eine bestimmte Länge.

2.2 Materialien

Ausgangspunkt für die Entwicklung ist herkömmliches BSP. Dieses zeichnet sich in seiner bestehenden Form u.a. durch hohe Tragfähigkeiten bedingt durch große mögliche Querschnitte in beide Tragrichtungen und ein hohes Maß an Vorfertigung mit passgenauer Geometrie aus [2]. Diese Vorteile sollen beibehalten bzw. genutzt werden.

Das Laubholz, das für die Weiterentwicklung verwendet wird, bietet durch seine höheren Steifigkeiten und Festigkeiten im Vergleich zu Nadelholz dann das Potential zur Materialeinsparung. V.a. der Einsatz in den Querlagen ist vielversprechend, da der Rollschub bei herkömmlichem BSP eine Schwachstelle darstellt. In Tab. 1 sind die Holzarten Fichte und Buche, die im Forschungsprojekt LaNaSys untersucht werden, gegenübergestellt.

Tab. 1: Vergleich der Eigenschaften von Fichten- und Buchenholz, Mittelwerte und charakteristische Werte (in Klammern) [3–5]

Eigenschaft	Fichte (C24)	Buche (D30)
E-Modul längs zur Faser	11.000 N/mm ²	14.000 N/mm ²
Zugfestigkeit längs zur Faser	95,0 (14,5) N/mm ²	135,0 (18,0) N/mm ²
Scherfestigkeit längs zur Faser	10,0 (4,0) N/mm ²	10,0 (8,9 ¹⁾) N/mm ²
Rollschubmodul	100 N/mm ²	357 N/mm ²
Rollschubfestigkeit	1,9 (1,5) N/mm ²	5,4 (4,7) N/mm ²

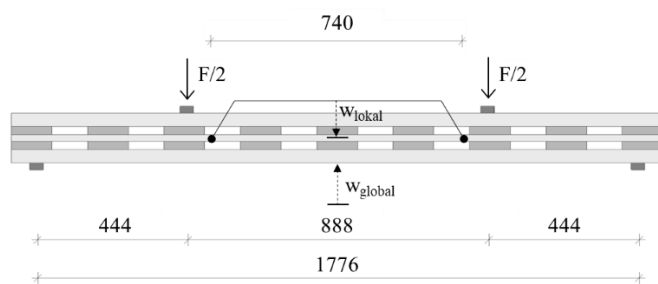
1) Vorgeschlagener Wert nach [6]

2.3 Mechanische Versuche

Für die Untersuchung des Plattentragverhaltens wurden Druckscherversuche, Biegeschubversuche und Biegeversuche durchgeführt. In der vorliegenden Arbeit wird v.a. auf die Biegeversuche eingegangen, die Biegeschubversuche werden in [7] eingehend beschrieben. Die Druckscherversuche dienen hauptsächlich dazu, für die folgenden Versuche eine Vorauswahl grundsätzlich geeigneter Varianten zu treffen. Diese werden daher hier nicht weiter betrachtet.

Die Versuchsaufbauten wurden jeweils aus der BSP-Produktnorm DIN EN 16351:2021-06 [8] entnommen und ggf. an die speziellen Randbedingungen der aufgelösten Aufbauten angepasst. Je Variante wurden drei identische Prüfkörper geprüft.

Bei den Biegeschubversuchen lag der Fokus auf der Schubtragfähigkeit der verschiedenen Varianten. Die geringe Spannweite im Verhältnis zur Plattendicke ($L/h = 12$) führt zu einer erhöhten Schubbelastung bei geringem Biegemoment. Das Ziel war die Bestimmung der Schubsteifigkeit der Elemente und die Bestimmung von effektiven Rollschubfestigkeiten für die Querlagen. Mit der Querschnittshöhe von 148 mm ergibt sich eine Spannweite von ca. 1,8 m, die Breite der Prüfkörper beträgt 600 mm. Der Prüfaufbau ist in Abb. 2 dargestellt.



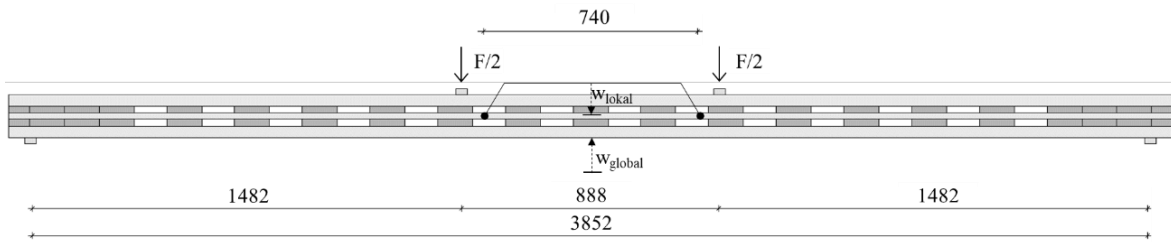
a) Zeichnung mit einem beispielhaften Aufbau



b) Beispiel eines Prüfkörpers im Prüfstand

Abb. 2: Prüfaufbau der Biegeschubversuche

Die Biegeversuche wiesen eine größere Spannweite im Vergleich zur Plattendicke von ca. 3,8 m ($L/h = 26$) auf. Dies führt zu einer stärker ausgeprägten Biegebeanspruchung, der Einfluss von Schubverformungen nimmt ab. Ziel war daher die Bestimmung von Biegesteifigkeiten, sowie die Klärung der Frage, ab wann ein Biegeversagen gegenüber dem Schubversagen maßgebend wird. Es können ebenfalls effektive Rollschubfestigkeiten ermittelt und mit den Werten der Biegeschubversuche verglichen werden. Der Prüfaufbau ist in Abb. 3 dargestellt.



a) Zeichnung mit einem beispielhaften Aufbau



b) Beispiel eines Prüfkörpers im Prüfstand

Abb. 3: Prüfaufbau der Biegeversuche

Ein Überblick über die untersuchten Prüfkörpervarianten ist in Tab. 2 dargestellt.

Tab. 2: Überblick über die verschiedenen Varianten für die Biegeschub- und Biegeversuche

Bezeichnung	Ansicht	Querschnitt	Querlagen- dichte ¹⁾	Breite Quer- lagenbretter	Längslagen- dichte ¹⁾	Versuche ²⁾
F-0			100% F	120 mm	100% F	BS + B
B-0			100% B	120 mm	100% F	BS + B
B-1			50% B	120 mm	100% F	BS + B
B-2			50% B	120 mm	50% B	BS
B-3			50% B	40 mm	50% B	BS
B-4			50% * B	120 mm	100% F	BS + B
B-5			50% * B	120 mm	50% B	BS + B

1) Längs- und Querlagen: F = Fichte B = Buche * mit Auflagerverstärkung

2) Versuche: BS = Biegeschubversuche B = Biegeversuche

2.4 Simulation

Im Simulationsprogramm ANSYS wurden dreidimensionale Modelle der Prüfkörper erzeugt und mittels FEM untersucht. Das Materialverhalten wurde dabei rein linear-elastisch ohne Versagenskriterium definiert. Der Schwerpunkt der Auswertungen lag zunächst auf den Steifigkeiten sowie den qualitativen Verläufen der Spannungen im Inneren der Prüfkörper.

3. Ergebnisse und Auswertung

Bei den Versuchen konnten folgende Versagensarten festgestellt werden, vgl. Abb. 4 und 5:

- Biegezugversagen
- Rollschubversagen der Querlagen
- Längsschubversagen in den Längslagen
- Abscheren der Querlagenbretter bei den aufgelösten Varianten
- Abrollen ganzer Querlagenbretter

Ein Rollschubversagen wurde praktisch nur bei Fichten-Querlagen in den Biegeschubversuchen festgestellt (Abb. 4a)). Bei der Buche ist die Rollschubfestigkeit offensichtlich höher als die entsprechende Längsschubfestigkeit der angrenzenden Fichten-Längslagen (Abb. 4b)). In den Biegeversuchen verlagerte sich das Versagen in Richtung eines Biegezugversagens in Feldmitte (Abb. 5a)) und b)). Auch bei den aufgelösten Varianten trat bei einigen Prüfkörpern ein Biegezugversagen auf (Abb. 5c)), die meisten versagten jedoch auf Schub und sind durch ein Abrollen der Querlagenbretter charakterisiert (Abb. 5d)). Prüfkörper mit Auflagerverstärkung zeigten wieder ein Längsschubversagen ähnlich den Referenzprüfkörpern mit vollen Buchen-Querlagen (Abb. 5e)). Eine Ausnahme bilden die Prüfkörper mit Auflagerverstärkung und aufgelöster Mittellage aus Buche, bei der sämtliche Prüfkörper auf Schub versagten (Abb. 5f)). Das ist darauf zurückzuführen, dass diese Prüfkörper in der Mittellage aus Buche einen stumpfen Stoß enthielten, da eine Keilzinkung von Buchenlamellen bei auf Nadelholz ausgelegten Anlagen nicht ohne weiteres möglich ist. Da der Stoß sich im Bereich einer Lücke in den Querlagen befand, stellte er eine erhebliche Schwächung der Schubtragfähigkeit des Aufbaus dar.

Der Effekt des Abrollens entsteht durch konzentrierte Querspannungen jeweils an den gegenüberliegenden Ecken der Bretter, die durch die Schubbeanspruchung hervorgerufen werden. Aus der FE-Berechnung ist zu entnehmen, dass an diesen Ecken nicht nur die Querspannungen Spannungskonzentrationen ausbilden, sondern auch die Schub- und Längsspannungen, die miteinander interagieren. Im FE-Modell handelt es sich bei diesen Spannungskonzentrationen um Singularitäten. Eine Auswertung hinsichtlich der erwarteten Tragfähigkeit ist daher nicht ohne weiteres möglich.

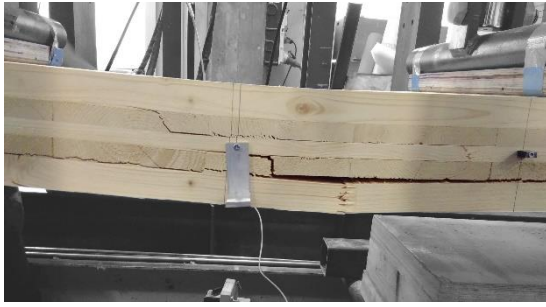


a) Referenz Fichte F-0: Rollschubversagen

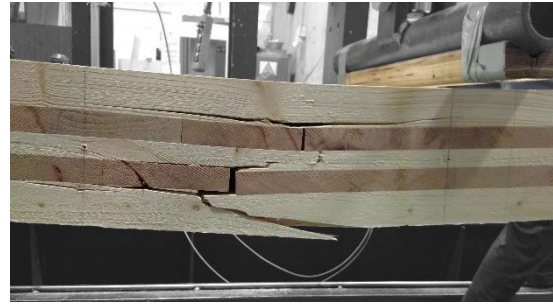


b) Referenz Buche B-0: Längsschubversagen

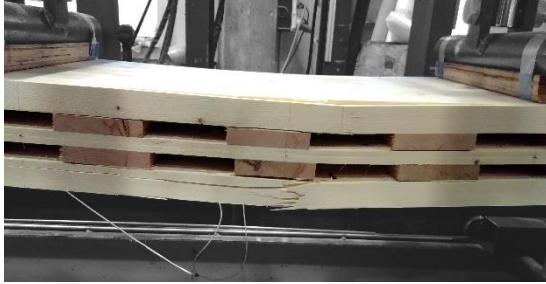
Abb. 4: Versuchsbeobachtungen bei den Biegeschubversuchen (Auswahl)



a) Referenz Fichte F-0: Biegezugversagen



b) Referenz Buche B-0: Biegezugversagen



c) aufgelöste Varianten B-1 und B-4: teilweise Biegezugversagen



d) aufgelöste Variante ohne Auflagerverstärkung B-1: Abrollen der Querlagenbretter



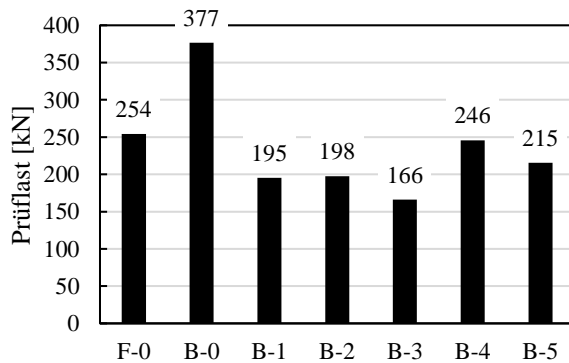
e) aufgelöste Variante mit Auflagerverstärkung B-4: Längsschubversagen an der Auflagerverstärkung



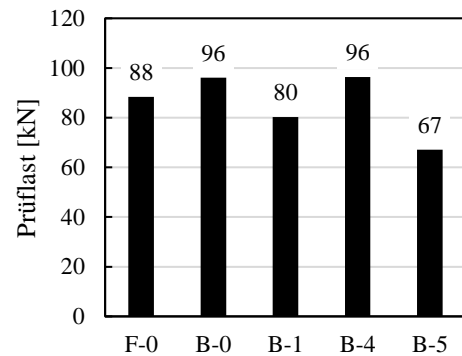
f) Variante mit Auflagerverstärkung und aufgelöster, stumpf gestoßener Mittellage aus Buche B-5: Schubversagen

Abb. 5: Versuchsbeobachtungen bei den Biegeversuchen (Auswahl)

Abb. 6 zeigt die zugehörigen maximal erreichten Prüflasten.



a) Biegeschubversuche



b) Biegeversuche

Abb. 6: Versuchsergebnisse der Biegeschub- und Biegeversuche: Prüflasten

Die Referenz aus Fichte F-0 bildet die Messlatte für die aufgelösten Varianten. Die Referenz mit vollen Buchen-Querlagen B-0 stellt die maximal erreichbare obere Grenze dar. Wie zu erkennen, bleiben die aufgelösten Varianten bei den Biegeschubversuchen noch hinter der Referenz aus Fichte zurück, bei den Biegeversuchen kann jedoch B-4 sogar die obere Grenze erreichen. Die Materialersparnis von B-4 gegenüber F-0 liegt bei 16% bzw. sogar 32% wenn nur das Fichtenholz betrachtet wird. In einem realistischen Bemessungsfall ist außerdem die effektive Biegesteifigkeit für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit wichtig. Effektiv bedeutet in diesem Fall, dass der Einfluss aus der Nachgiebigkeit der Querlagen enthalten ist. Es zeigt sich, dass alle Prüfkörper, unabhängig von der inneren Struktur, praktisch die gleiche Steifigkeit von ca. 1750 kNm² besitzen.

4. Bemessungsansatz für das Plattentragverhalten

Für die vorliegende Arbeit wird der Fokus auf die offensichtlich maßgebende Schubtragfähigkeit gelegt. Der Ansatz für die Bemessung besteht darin, die für herkömmliches BSP bekannten Berechnungsformeln anzuwenden, allerdings mit angepassten Werten für die Rollschubfestigkeit der Querlagen. Anstelle der Rollschubfestigkeit als ein Materialparameter (z.B. 1,9 N/mm² für Fichtenholz, vgl. Tab. 1) wird die effektive Rollschubfestigkeit als ein Bauteilparameter angegeben. Diese kann aus den durchgeführten Versuchen für jede Variante separat berechnet werden. Das Vorgehen bei der Berechnung der effektiven Rollschubfestigkeiten ist in [7] beschrieben, die Ergebnisse sind in Tab. 3 zusammengefasst.

Tab. 3: Effektive Rollschubfestigkeiten $f_{r,eff}$ verschiedener Varianten aufgelösten hybriden BSPs und effektive Schubfestigkeiten der Auflagerverstärkungen $f_{v,eff}^*$

Bezeichnung	Biegeschubprüfungen		Biegeprüfungen
	$f_{r,eff}$	$f_{v,eff}^*$	$f_{r,eff}$
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
F-0	1,87	-	> 0,65 ¹⁾
B-0	2,77	-	> 0,71 ¹⁾
B-1	1,44	-	0,59
B-2	1,45	-	-
B-3	1,22	-	-
B-4	1,44 ²⁾	2,55	0,59 ²⁾
B-5	1,45 ²⁾	2,24	(< 0,49) ³⁾

1) Die Prüfkörper sind auf Biegung versagt, daher kann nur ein unterer Grenzwert für die effektive Rollschubfestigkeit angegeben werden.

2) Für die Varianten mit Auflagerverstärkung B-4 und B-5 wurden die gleichen effektiven Rollschubfestigkeiten wie bei den entsprechenden Varianten ohne Auflagerverstärkung B-1 und B-2 angesetzt und der Anteil der Auflagerverstärkung separat berechnet ($f_{v,eff}^*$).

3) Da für die entsprechende Variante ohne Auflagerverstärkung B-2 bei den Biegeprüfungen keine Ergebnisse vorliegen, beinhaltet die Festigkeit in diesem Fall die Auflagerverstärkung und stellt daher einen oberen Grenzwert dar. Außerdem wurde B-5 bei den Biegeprüfungen mit stumpf gestoßener Mittellage ausgeführt und ist daher nicht direkt vergleichbar mit B-5 bei den Biegeschubversuchen.

Hier wird erkennbar, dass die effektive Rollschubfestigkeit kein konstanter Wert je Variante ist, sondern bei den Biegeprüfungen viel geringer ausfällt als bei den Biegeschubprüfungen. Eine mögliche Erklärung ist, dass es nicht die Spannungen aus der Schubbeanspruchung (Rollschub- und Querspannungen) allein sind, die zum Versagen führen, sondern eine Spannungsinteraktion mit den Normalspannungen. Letztere sind bei den Biegeversuchen wesentlich höher, was zu den geringeren Tragfähigkeiten führt. Die Frage nach dem mechanischen Zusammenhang zwischen dem Verhältnis von Schub- zu Normalspannungen und den effektiven Rollschubfestigkeiten ist zurzeit noch unbeantwortet und wird im folgenden Abschnitt diskutiert.

5. Diskussion und Schlussfolgerung

Ein möglicher Ansatz, um bei der Bemessung die variablen effektiven Rollschubfestigkeiten zu berücksichtigen, kann aus einer Formel bestehen, die auf einer Grund-Festigkeit aufbaut, welche über das Verhältnis von Schub- zu Normalspannungen abgemindert wird. Mit der ermittelten Festigkeit kann dann der Schubnachweis wie bei herkömmlichem BSP geführt werden. Ein anderer Ansatz besteht darin, den Schubnachweis nur mit der Grund-Festigkeit zu führen und anschließend einen Interaktionsnachweis mit den Normalspannungen zu führen.

Für beides ist es wahrscheinlich erforderlich, noch mehr Werte für die effektiven Rollschubfestigkeiten bei unterschiedlichen Spannweiten zu ermitteln. Dies kann ggf. mithilfe der FE-Modelle erreicht werden, wenn diese in der Lage sind, trotz der Spannungssingularitäten verlässliche Vorhersagen zur Tragfähigkeit der Elemente zu liefern.

Trotz der offenen Fragen bei der Bemessung haben die vorgestellten Ergebnisse gezeigt, dass es möglich ist, mit aufgelöstem hybridem BSP eine signifikante Materialeinsparung zu erreichen, ohne die Tragfähigkeit oder Gebrauchstauglichkeit zu beeinträchtigen. Im Gegenteil können durch das Buchenholz z.T. sogar höhere Tragfähigkeiten als bei reinem Fichten-BSP erreicht werden. Für die Bemessung besteht weiterer Forschungsbedarf.

Literatur

- [1] TUM.WOOD: *Entwicklung eines material- und energieeffizienten Holzbausystems aus Laub- und Nadelholz (LaNaSys)*. München, Laufendes Forschungsprojekt, gefördert durch: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., 2024.
- [2] GUSTAFSSON, A. et al.: *The CLT Handbook: CLT Structures – facts and planning*. Swedish Wood, Stockholm, 2019.
- [3] EHRHART, T. UND BRANDNER, R.: *Rolling shear: Test configurations and properties of some European soft- and hardwood species*. Engineering Structures, Jg. 172, S. 554–572, 2018.
- [4] DIN EN 338:2016-07: *Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen*. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- [5] DIN 68364:2003-05: *Kennwerte von Holzarten – Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten*. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- [6] HUNGER, F. UND VAN DE KUILEN, J.-W.: *Festigkeitsprofile von heimischen Laubhölzern: Bericht zum Projekt 13508 / X40*. 2015.
- [7] BIENERT, L., SCHUMACHER, N., WINTER, S. UND RICHTER, K.: *Development of disintegrated hybrid cross laminated timber*. Experimental Mechanics in Engineering and Biomechanics – Proceedings ICEM20, Porto, 2023.
- [8] DIN EN 16351:2021-06: *Holzbauwerke – Brettsper Holz – Anforderungen*. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.