Laubholzprodukte und -anwendungen / Anschlüsse

Simon Aicher
Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Laubholzprodukte und -anwendungen / Anschlüsse

1. Einleitung

Laubholz erfährt in den letzten Jahren in Europa eine kontinuierlich ansteigende Bedeutung im Bereich des Forstes, von Holzprodukten und -bauweisen und letztlich in der öffentlichen/politischen Wahrnehmung. Diese verstärkte Beschäftigung mit dem Werkstoff Laubholz erfolgt vor dem Hintergrund eines enormen Zuwachses der Verwendung von Holz im Bauwesen. Mengenmäßig dominiert hierbei Nadelholz. Die einzige Ausnahme bilden Sperrholz- und Furnierplatten bei denen der laubholzbasierte Anteil in Europa um rd. 35 % über demjenigen der Nadelholzprodukte liegt. Die zentralen vollholz- und furnierbasierten Holzbau-Konstruktionswerkstoffe, die heute im europäischen und nordamerikanischen Bausektor eingesetzt werden, wie Vollholz, keilgezinktes Vollholz (KVH), Sperrholz, Brettschichtholz (BSH), Brettsperrholz (BSP), Furnierschichtholz (LVL) sind nahezu ausschließlich aus Nadelholz. Warum also Laubholz?!

Diesbezüglich sind zwei komplementäre treibende Kräfte zu nennen, die beide aus dem Forstsektor stammen. Dies ist zum einem der bereits heute flächenmäßig erhebliche Bestand an Laubbäumen in Europa, der bislang nur in sehr geringem Umfang stofflich-konstruktiv im Bauwesen verwendet und zunehmend primär thermisch genutzt wird. Zum anderen wird diese Bestands- und Nutzungssituation dadurch verschärft, dass forstlich die häufige Standortuntauglichkeit von Nadelholz(plantagen) erkannt wurde und sodann zur Vermeidung verheerender Nadelholz-geförderter Windwurfschäden in sehr großem Umfang Laubholzarten für Neuaufforstungen verwendet werden. Der Rohstofflieferant Wald verändert sich somit zunehmend hin zu Misch- und Laubholzbeständen.

Unabhängig von der im Vergleich zu Nadelholzprodukten heute mengenmäßig noch sehr geringen / sporadischen Verwendung von Laubholz im Bauwesen gibt es dennoch bereits eine breite Palette von Laubholzprodukten, die sowohl das Leistungspotential wie auch die Vielfalt der Laubhölzer wiederspiegeln. In diesem Zusammenhang ist darauf zu verweisen, dass weltweit rd. 600 Nadelholzarten einer hundertfach höheren Anzahl (60000) von Laubholzarten gegenüberstehen.

Im Folgenden werden zunächst einige wesentliche mechanisch-technologische Eigenschaften von europäischen, nordamerikanischen und tropischen Laubhölzern im Vergleich zu Nadelhölzern aufgezeigt, um die große Bandbreite des Leistungspotenzials zu umreißen. Im Anschluss werden wichtige konstruktive Laubholzprodukte, -Bauweisen und Bauwerke vorgestellt. Auf die speziellen Vorzüge von Laubholz wird hierbei beispielhaft eingegangen.

2. Mechanisch-technologische Eigenschaften von Laubhölzern

Im Rahmen des vorliegenden Beitrages können naheliegend die für den konstruktiven Baubereich wesentlichen mechanisch-technologischen Eigenschaften von Laubhölzern, die sich durch eine extreme Arten- und Leistungsspanne auszeichnen nur summarisch oder beispielhaft wiedergegeben werden.

Die Tabelle 1 gibt diesbezüglich auszugsweise die Bandbreite der heutigen europäisch in DIN EN 338 [1] geregelten Festigkeitsklassen von Nadel- und Laubhölzern mit den zugeordneten Festigkeits- und Rohdichtekennwerten wieder. Infolge der bei Laub- und Nadelholz ausgeprägten Korrelation von Festigkeiten und Rohdichten könnten die Festigkeitsklassen auch als Rohdichteklassen bezeichnet werden.

Tabelle 1: Festigkeitsklassen (auszugsweise) für Laub- und Nadelhölzer gemäß DIN EN 338[1]

Festigkeitsklasse		D30	(C30)	D40	(C40)	D50	(C50)	D60	D70
Festigkeitseigenschaften, in N/mm²									
Biegung	$f_{m,k}$	30		40		50		60	70
Zug in Faserrichtung	$f_{t,0,k}$	18	(19)	24	(26)	30	(33,5)	36	42
Zug rechtwinklig zur Faserrichtung	$f_{t,90,k}$	0,6	(0,4)	0,6	(0,4)	0,6	(0,4)	0,6	0,6
Druck in Faserrichtung	$f_{c,0,k}$	24		27		30		33	36
Druck rechtwinklig zur Faserrichtung	$f_{c,90,k}$	5,3	(2,7)	5,5	(2,8)	6,2	(3,0)	10,5	12
Schub	$f_{v,k}$	3,9	(4,0)	4,2	(4,0)	4,5	(4,0)	4,8	5,0
Steifigkeitseigenschaften, in N/mm²									
Mittelwert des E-Moduls bei Biegung in Faserrichtung	$E_{m,0,mean}$	11	(12)	13	(14)	14	(16)	17	20
Mittelwert des E-Moduls bei Biegung rechtwinklig zur Faserrichtung	$E_{m,90,mean}$	0,73	(0,40)	0,87	(0,47)	0,93	(0,53)	1,13	1,33
Mittelwert des Schubmoduls	G_{mean}	0,69	(0,75)	0,81	(0,88)	0,88	(1,0)	1,06	1,25
Rohdichte, in kg/m³									
Charakteristische Rohdichte	ρ_k	530	(380)	550	(400)	620	(430)	700	800

Die Nadelholzfestigkeitsklassen werden hierbei als sogenannte C-Klassen (C = Coniferous = nadelholzig) und die Laubholzklassen als sog. D-Klassen (D = Durable = dauerhaft, hart) bezeichnet. Anmerkung: Die wörtliche Übersetzung der Abkürzung D = dauerhaft und hart trifft für viele Harthölzer nicht zu. Der Zahlenwert der C- und D-Klassen, z. B. C24 oder D40 bezeichnet jeweils den charakteristischen (5%-Quantil) Wert der Biegefestigkeit bei Hochkantbiegung, bezogen auf eine Referenzhöhe des Querschnitts von h = 150 mm.

Wesentlich ist, dass sich die C- und D-Klassen mit gleichem Zahlenwert, d. h. gleichem charakteristischen Biegefestigkeitsniveau z. B. C30 und D30 hinsichtlich aller weiteren Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften nur bei sehr wenigen Eigenschaften unterscheiden. Deutliche Unterschiede gleich hoher C- und D-Festigkeitsklassen zugunsten der Laubhölzer liegen bei der Druck- und Zugfestigkeit sowie beim Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung ($f_{c,90,k}$, $f_{t,90,k}$, $E_{m,90,mean}$) und bei der Rohdichte ρ_k vor (vgl. Tabelle 1 und Abb.1).

Die in jeder Festigkeitsklasse rd. 2- bzw. 1,8fach höheren $f_{c,90,k}$ und $E_{m,90,mean}$-Werte von Laubholz resultieren unmittelbar aus der je Festigkeitsklasse rd. 40 % höheren Rohdichte. Da der für die Tragfähigkeit stabförmiger Verbindungsmittel grundlegende Wert der Lochleibungsfestigkeit sowie die Ausziehfestigkeit von Schrauben unmittelbar von der Rohdichte abhängen, ist evident, dass Laubhölzer bei gleichem C- und D-Klassenniveau bei der Verbindungsmittelbemessung eine deutlich höhere Effizienz aufweisen (vgl. Abschn. 4).

Vergleichsweise geringe Unterschiede zu Ungunsten der Laubhölzer bei gleichen C- und D-Klassen liegen bei der Zugfestigkeit und beim Biegeelastizitätsmodul jeweils in Faserrichtung vor, die bei den D-Klassen um rd. 5-19% bzw. um rd. 10% unter den C-Klassenwerten liegen. (Anmerkung: die Unterschiede bei der Zugfestigkeit $f_{t,0,k}$ stehen in Verbindung mit einer jüngsten (2016) Neufassung von DIN EN 338 [1], bei der im Vergleich zur Vorgängernorm (DIN EN 338:2013 [2]) die Zugfestigkeiten der Nadelhölzer parallel zur Faserrichtung in allen Festigkeitsklassen um 5–19% heraufgestuft wurden).

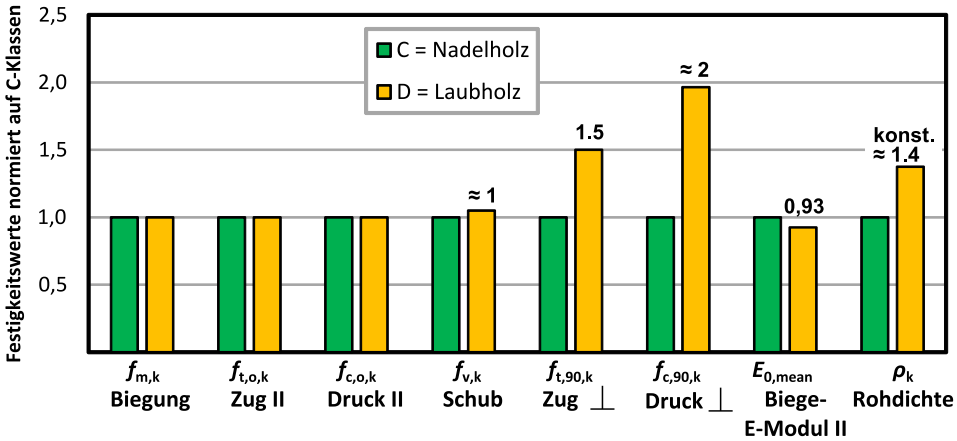

Abbildung 1: Festigkeits-, Steifigkeits- und Rohdichtekennwerte von Laubholz (beliebige D-Klasse) normiert auf den NH-Wert der zugeordneten C-Klasse (Graph basiert auf DIN EN 338[2])

Die Zuordnung visuell sortierter Nadel- und Laubholzarten zu jeweiligen Festigkeitsklassen ist in DIN EN 1912 [3] geregelt. Laubhölzer können hiernach artspezifisch den Klassen D24 bis D70 zugeordnet werden während die Bandbreite visuell sortierten Nadelholzes von C14 bis C35 reicht (maschinell ist eine NH-Sortierung bis C50 möglich, wobei faktisch C45 die höchste verfügbare NH-Klasse repräsentiert). Maschinell sortiertes Laubholz ist bislang nicht bekannt. Wie aus DIN EN 1912 [3] bzw. Abb. 2 ersichtlich, weisen die Laubhölzer in den unteren Rohdichte- bzw. -Festigkeitsklassen (D24–D40) einen deutlichen Überlappungsbereich mit Nadelhölzern auf. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass die Laubholzart Pappelholz „normungshistorisch bedingt" formal durch Nadelholzfestigkeits-klassen C22 bis C27 beschrieben wird. Dies bedeutet letztlich, dass die heute nach DIN EN 1912 festigkeitsklassenmäßig erfassten Laubhölzer die sehr weite Spanne von D22 bis D70 umfassen, wobei nach DIN EN 338 sogar eine Klassifizierung bis D80 möglich wäre, während der Nadelholzbereich von C14 bis C45 reicht.

Die Festigkeitsklassenzuordnung bei Nadel- und Laubhölzern ist in den Abbildungen 2 und 3 exemplarisch anhand wichtiger in DIN EN 1912 aufgeführter Holzarten gezeigt. Die europäischen Laubholzarten Kastanie, Eiche und Buche lassen sich zufolge der italienischen Sortierklasse S bzw. der deutschen Sortierklasse LS10 und besser (DIN 4047-5 [4]) in die Festigkeitsklassen D24, D30 und D35 zuordnen. Mittels der Sortierklasse LS10 und besser bzw. LS13 lassen sich Eschen- bzw. Buchenholz sodann in D40 als heute höchste Festigkeitsklasse europäischen Laubholzes eingruppieren.

Weithin bekannte außereuropäische Laubhölzer der Festigkeitsklasse D40 sind sodann Iroko, Sapeli-Mahagoni und Teak. In der Festigkeitsklasse D50 finden sich u.a. Bangkirai und Keruing sowie amerikanische Weißeiche und in der Klasse D60 sind insbesondere die sügostasiatischen Holzarten Kapur und Kempas zu nennen. Die zufolge Festigkeitsklassezuordnung höchstfesten Laubhölzer Greenheart und Azobe/Bongossi sind der Klasse D70 zugeordnet. Alle genannten asiatischen und afrikanischen Laubhölzer (Ausnahme Bongossi) müssen für die jeweiligen D-Klasseneinstufungen der Sortierklasse HS gemäß britischer Sortiernorm BS 5756[5] entsprechen. Für die Holzart Bongossi erfolgt die D70-Zuordnung über die Sortierklasse C3 STH zufolge niederländischer Sortiernorm NEN 5493 [6].

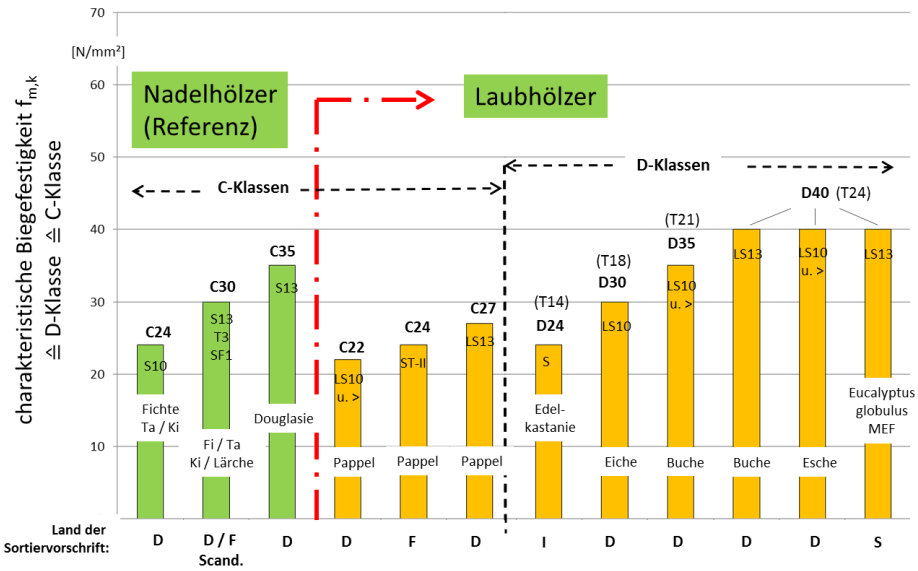

Abbildung 2: Festigkeitsklassen (D-Klassen, C-Klassen für Pappelholz) europäischer Laubhölzer gemäß DIN EN 1912 [3] ; zum Vergleich sind typische europäische Nadelholzfestigkeitsklassen-Zuordnungen mit angegeben

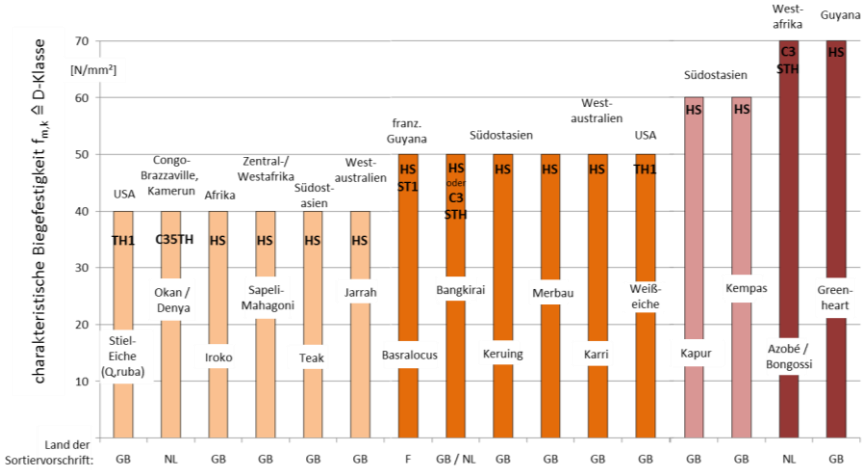

Abbildung 3: Festigkeitsklassen (D-Klassen) ausgewählter amerikanischer, afrikanischer, südostasiatischer und australischer Laubhölzer gemäß DIN EN 1912 [3]

3. Laubholzbasierte Produktgruppen

Im Folgenden wird ein Überblick über die generischen Produktgruppen in denen Laubhölzer vollholz- oder furnierbasiert Verwendung finden, gegeben. Es werden hierbei ausschließlich Werkstoffe betrachtet, die durch Verklebung weiterbearbeitet wurden, d.h. Vollhölzer in Form von Brettern, Bohlen und Kanthölzern und deren spezifische Verwendung bleiben unberührt. Ergänzend ist hierzu auszuführen, dass die sehr schweren, hochfesten und extrem dauerhaften Laubhölzer Greenheart und Bongossi kaum/nicht dauerhaft verklebbar sind und im Allgemeinen mit sehr großen Vollholzquerschnitten bei extremen Klima- und Wasserbeanspruchungen im Wasserbau, Schleusentor- und Brückenbau Verwendung finden.

Bei einigen Gruppen werden die heute am Markt erhältlichen Produkte benannt, die Leistungspotenziale grob umrissen und auf weiterführende Literatur verwiesen.

3.1. Furnier- und vollholzbasierte plattenförmige Laubholzwerkstoffe

In der Produktgruppe von Plattenwerkstoffen aus Laubholz sind drei wichtige Untergruppen zu nennen. Dies sind zum einen die querschnittsaufbauähnlichen bzw. -überlappenden furnierbasierten Produkte

- Sperrholz (DIN EN 636 [7], DIN EN 139861 [8])
- Furnierschichtholz (DIN EN 14374 [9])

  und zum anderen das vollholz/brettbasierte Produkt

- Brettsperrholz (in Anlehnung an EN 16351 [10]).

Die aus kreuzweise (Sperrholz immer) bzw. optional oder ausschließlich aus unidirektional (Furnierschichtholz) verklebten Furnieren hergestellten LH-Plattenprodukte repräsentieren nahezu durchweg Bauprodukte mit einem gegenüber vergleichbaren NH-Produkten höheren Leistungspotential.

Sperrholz

Sperrholz stellt die einzige LH-Produktgruppe dar, bei der in Europa mehr LH- als NH-basierte Produkte produziert/verwendet werden. So entfielen von der Gesamtmenge des europäisch produzierten Sperrholz- und Furnierplattenmaterials im Jahr 2014 ca. 70 % auf LH-Produkte, sodann überwiegend hergestellt aus den Holzarten Pappel, Birke und Buche. Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass die genannten furnierbasierten Werkstoffe (Sperrholz und Furnierplatten) in Europa nur rd. 15 % des gesamten Holzplattenmaterials ausmachen und der Anteil der in Deutschland gefertigten Produkte < 1 % ist. Zum Anteil des hergestellten Plattenmaterials im konstruktiven Bauwesen liegen dem Verfasser keine belastbaren Zahlen vor. Das hohe Leistungspotenzial der Laubholz-Sperrhölzer wird exemplarisch in Abbildung 4 anhand von drei typischen LH-Sperrholzplattenprodukten ([11], [12], [13]) im Vergleich zu üblichem NH-Sperrholz aufgezeigt. Birken- und Buchensperrholz erreichen lagenaufbauabhängig charakteristische, d.h. mittlere Elastizitätsmoduln, die bis zu einem Faktor 3 über üblichen Sperrhölzern aus Nadelholz liegen. Die Leistungsfähigkeit der Laubholz-Sperrhölzer wird u.a. auch dadurch evident, dass z.B. das Pappelsperrholz der Fa. Welde Bestandteil des heute weltweit leistungsfähigsten Holzschalungsträgers, I tec 20 [32], der Fa. Doka, Amstetten, Österreich ist.

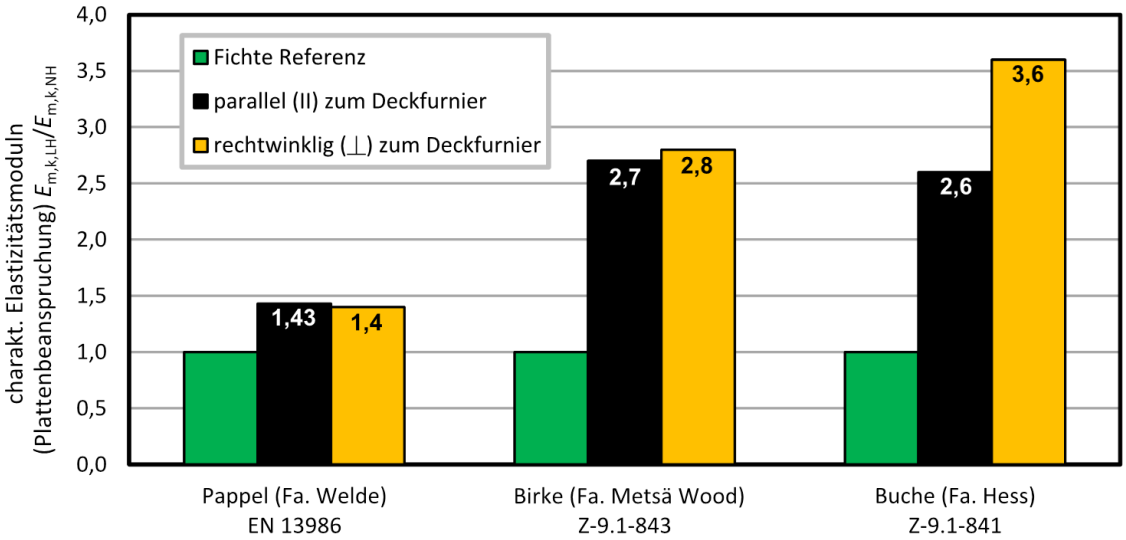

Abbildung 4: Elastizitätsmoduln von ausgewählten LH-Sperrhölzer[11],[12],[13] im Vergleich zu einem typischen Nadelholz-Referenz-Sperrholz

Furnierschichtholz

Das hinsichtlich des Querschnittsaufbaus ähnlich/gleich wie Sperrholz aufgebaute Plattenprodukt Furnierschichtholz (FSH) ist europäisch in DIN EN 14374 [9] geregelt, wobei sowohl Nadel- wie Laubhölzer für die Furniere verwendet werden können. Bei FSH wird

unterschieden zwischen Produkten, die aus unidirektional/faserparallel verklebten Furnieren aufgebaut sind (und damit keine Entsprechung bei Sperrholz haben) und Plattenaufbauten mit kreuzweiser Lagenanordnung wobei der Längslagenanteil deutlich dominiert.

Bis zum Jahr 2013 wurde weltweit (Europa, USA, Neuseeland) FSH ausschließlich aus Nadelholz hergestellt. Mit dem seitens der Fa. Pollmeier, Creuzburg, hergestellten Furnierschichtholz aus Buche wurde zum genannten Zeitpunkt sodann erstmalig ein LH-basiertes Furnierschichtholz industriell produziert und sodann bauaufsichtlich national (Anwendungszulassung Z-9.1-838 [14]) und europäisch CE-zertifiziert [15] auf den Markt gebracht. Die gegenüber bestehenden NH-basierten Furnierschichthölzern deutlich höheren Festigkeitseigenschaften sowie die erhöhten Steifigkeitskennwerte eröffneten dem Ingenieurholzbau eindeutig neue konstruktive Optionen und eine geänderte, deutlich verbesserte Ausgangslage gegenüber den konkurrierenden Baumaterialien Stahl und Stahlbeton. Mittels brettförmiger aus dem Plattenwerkstoff geschnittener Lamellen wurde sodann des Weiteren ein neuer ultrahochfestes Brettschichtholz generiert (vgl. Abschnitt 3.2). Der jüngste LH-FSH-Werkstoff besteht aus Birkenholzfurnieren. Das von der Fa. MLT Ltd., St. Petersburg, Russland, gemäß DIN EN 14374 hergestellte, noch in 2016 CE-zertifizierte Bauprodukt weist gemäß Leistungserklärung Festigkeits- und Rohdichtekennwerte auf, die zwischen den Werten von Buchen-FSH einerseits und den höchsten Werten für FSH aus Nadelholz (aus Kiefer) andererseits liegen.

Brettsperrholz (EN 16351)

Das plattenförmige Bauprodukt Brettsperrholz (BSP) das vergleichbar Sperrholz aus in Querschnittsausrichtung kreuzweise übereinander angeordneten Brettlagen besteht, wird heute industriell nahezu ausschließlich aus Nadelholzlamellen/brettlagen hergestellt. Das zukünftig in DIN EN 16351 geregelte Plattenprodukt, das bis heute anhand nationaler und europäischer technischer Zulassungen produziert und verwendet wird, hat unstrittig von allen neuen Holzbauprodukten die größten Impulse für den heutigen Stand des Ingenieurholzbaus gebracht. Vergleichbar den Plattenprodukten Sperrholz und Furnierschichtholz liegt auch bei Brettsperrholz die vollständige oder partielle Verwendung von Laubholzlamellen beim Querschnittsaufbau nahe, auch wenn laubholzbasiertes BSP bis heute noch nicht in den Markt eingeführt ist.

Das in [16] beschriebene BSP-Plattenprodukt auf Basis von Birkenholzlamellen besitzt infolge der holzspezifisch höheren mechanischen Eigenschaften von Birken- gegenüber Nadelholz signifikant erhöhte Plattenleistungseigenschaften gegenüber dimensionsmäßig gleichen NH-Produkten. Über die marktmäßige Durchsetzung des technisch hochwertigen LH-BSP-Produkts werden letztlich technisch-ökonomische Marktfaktoren entscheiden.

Eine weitergehende partielle Laubholzvariante von Brettsperrholz besteht in hybrid aufgebautem Nadelholz- Laubholz- BSP, wobei insbesondere die Querlagen (rechtwinklig zur Hauptspannrichtung der Platten) aus Laubhölzern bestehen. Laubhölzer mittlerer und hoher Rohdichte zeichnen sich allgemein und speziell auch bei Buche für die Verwendung in Querlagen insbesondere durch ihre deutlich höhere Steifigkeits- und Festigkeitskennwerte bei Rollschubbeanspruchung aus [17]. Laborversuche und industriell hergestellte vollmaßstäbliche BSP-Hybrid-Aufbauten mit Querlagen aus Buchenholz [18] belegten die bezüglich Rollschubbeanspruchbarkeit und globaler Biegesteifigkeit deutlich erhöhten Werte von hybriden Buche-Fichte-BSP-Aufbauten.

3.2. Stabförmige lamellierte Laubholz-Produkte

Bei den stabförmigen lamellierten LH-Produkten handelt es sich einerseits um Fenster- und Türkanteln, die im Allgemeinen dem nichttragenden Bereich zuzuordnen sind und andererseits um primär tragend verwendetes Brettschichtholz größerer Querschnitts- und Längendimensionen. Ungeachtet der Tatsache, dass lamellierte Fenster-und Türkanteln vorwiegend nichttragend im Sinne einer planmäßigen statischen Berechnung eingesetzt werden, liegt im Bereich von Pfosten-Riegel-Fenstern bzw. Fassadenkonstruktionen häufig ein Übergang zu tragend nachzuweisenden Konstruktionselementen vor und des Weiteren existiert in dieser Produktgruppe auch ein vergleichsweise hoher LH-Anteil.

Lamellierte Fensterkanteln

In Deutschland betrug der Anteil von reinen Holz bzw. von Holz-Aluminiumfenstern am gesamten Fensterrahmenmarkt im Jahr 2014 rd. 25%, was rd. 200000 m^3 lamellierten Holzkanteln entspricht. Rund 30% aller Holz- bzw. Holz-Metallfenster entfallen sodann auf Laubholz, wobei hier Dark Red Meranti- Kanteln mit einem Marktanteil von 75% (rd. 45000 m^3) bei Weitem dominieren (vgl. auch [19]).

Brettschichtholz

Das klassische Ingenieurholzbauprodukt Brettschichtholz wird heute weltweit nahezu ausnahmslos aus Nadelholzlamellen hergestellt. In Europa, der weltweit mengenmäßig größten Herstellregion von BSH, wird der Werkstoff heute auf Grundlage von DIN EN 14080 [20] hergestellt und CE-gekennzeichnet. Die Norm umfasst ausschließlich NH-basiertes Brettschichtholz. Sieht man von vereinzelten Prototyp-bzw. Einzelobjekt-Fertigungen ab, so wurde das erste LH-basierte Brettschichtholz mit baurechtlichem Verwendungsnachweis, sodann hergestellt aus Dark Red Meranti im Jahr 2004 mittels deutscher allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung [21] baurechtlich vergleichbar wie NH-BSH seitens der Firmen Samtraco und Enno Roggemann auf den Markt gebracht. In der Folge wurden sodann ab 2009 tragend verwendbare Brettschichthölzer aus Buche [22] , europäischer Eiche [23], [24], [25], Kastanie [26] sowie aus Buche-Furnierschichtholz [27], [28] baurechtlich national/europäisch verwendbar auf den Markt gebracht. Tabelle 2 beinhaltet eine Zusammenstellung aller bisher national (deutsch) und europäisch mit baurechtlichem Verwendbarkeitsnachweis existierenden Laubholz-Brettschichthölzer. Detaillierte Beschreibungen der jeweiligen Produktaufbauten (homogen, inhomogen, Lamellendicken, etc.), der zulässigen Dimensionen und der mechanischen Eigenschaften (Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte) sind neben den jeweiligen Zulassungen vergleichend in [19], [30] zusammengestellt.

Mit Ausnahme von Brettschichtholz aus Buchen(voll)holzlamellen werden alle in Tabelle 2 aufgeführten Produkte europaweit zunehmend verwendet. Ursächlich für die kaum/nicht existierende Verwendung bzw. Verfügbarkeit von Buchen-BSH sind im Wesentlichen die schwierige Verarbeitbarkeit von Buchenholzlamellen insbesondere größerer Querschnitte infolge des ausgeprägten Schwind/Quellverhaltens und von trocknungsbedingten Lamellenverdrehungen. Anmerkung: Der in der Schweiz ansässige BSH-Hersteller „Neue Holzbau", Lungern, stellt objektbezogen Buche-BSH mit firmenspezifischen Leistungsdaten unter Verwendung deutlich geringerer Lamellendicken (20mm) als nach [22] her.

Summarisch ist festzuhalten, dass Brettschichthölzer aus Eiche, Kastanie und Dark Red Meranti (sodann nach erteilter Zulassungsänderung) charakteristische Biegefestigkeiten im Bereich von 30-36 N/mm^2 aufweisen. Das Biegefestigkeitsniveau liegt damit ausnahmslos am oberen Rand des Leistungsspektrums von Brettschichtholz aus Nadelholz nach DIN EN 14080, das mit homogen und kombiniert aufgebauten Querschnitten von GL20 bis GL32 spannt, wobei GL30c die im Regelfall höchste verfügbare Klasse darstellt.

Neben dem vergleichsweise hohen Biegefestigkeitsniveau zeichnen sich Brettschichthölzer aus den genannten Laubhölzern insbesondere durch eine sehr hohe Druckfestigkeit parallel und rechtwinklig zur Faserrichtung, $f_{c,0,k}$ und $f_{c,90,k}$ aus. Während die (sehr) hohen $f_{c,90,k}$-Werte, die um den Faktor 2-4 über dem NH-BSH-Wert von $f_{c,90,k}$ = konst.= 2,5 N/mm^2 liegen, unmittelbar in Verbindung mit den jeweiligen LH-Vollholzwerten stehen (vgl. Tabelle 1), erschließen sich die sehr hohen Druckfestigkeitswerte parallel zur Faserrichtung (wenngleich mechanisch plausibel) nicht unmittelbar aus den heute genormten Vollholzwerten. Während bei NH-BSH die $f_{c,0,k}$-Werte bei homogenem BSH der Biegefestigkeit entsprechen und bei inhomogen aufgebautem NH-BSH rd. (0,8-0,9) $f_{m,k}$ betragen, liegen die faserparallelen Druckfestigkeiten der LH-Brettschichthölzer bei Nutzungsklasse 1 Klima/Feuchtebedingungen um den Faktor 1,5 über der jeweiligen Biegefestigkeit. Dieser Sachverhalt zeigt das sehr hohe Leistungspotential von LH-BSH insbesondere für druckbeanspruchte Stützen geringerer und mittlere Schlankheit auf.

Tabelle 2: Zusammenstellung national (deutsch) und europäisch verfügbarer/geregelter Laubholz-Brettschichthölzer mit baurechtlichem Verwendbarkeitsnachweis (deutsche ABZ bzw. ETA)

Jahr der Erst-zulassung	Baurechtlicher Verwendbarkeitsnachweis		BSH-Bauprodukte aus Laubhölzern der Art	Nutzungs-klasse	Antragsteller
	Deutsche ABZ Z-9.1-...	Europäisch technische Zulassung ETA			
2004	577	-	Dark Red Meranti	1, 2	Enno Roggemann, Bremen
2008 – 2012	Zustimmungen im Einzelfall der Obersten Baubehörden in Deutschland		Eiche-BSH-Kanteln für Pfosten-Riegel-Fassadenkonstruktionen	1	Diverse Antragsteller
2009	679	-	Buche- und Buche-Fichte-Hybridträger	1	Studiengemeinschaft Holzleimbau, Wuppertal
2012 2013	704 -	- 13/0642	Eiche (VIGAM)	1, 2	Elaborados y Fabricados Gamiz, S.A., Spanien
2013	821	-	Eiche-Pfosten-Riegel-BSH	1, 2	Holz Schiller GmbH, Regen
2013	-	13/0644	Edelkastanie	1, 2	SIEROLAM SA., Spanien
2013 2015	837 -	- 14/0354	Buche-Furnierschichtholz	1, 2	Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH, Creuzburg

Stellvertretend für zwischenzeitlich viele anspruchsvolle, ästhetisch sehr ansprechende Laubholzkonstruktionen insbesondere mit Eichenholz, zeigen die Abbildungen 5 und 6 Ansichten des in Brettschichtholz aus Eiche ausgeführten Daches des Plenarsaals des neuen schottischen Parlaments sowie eine kunstvolle Treppen- und Säulenkonstruktion in einer spanischen Kirche.

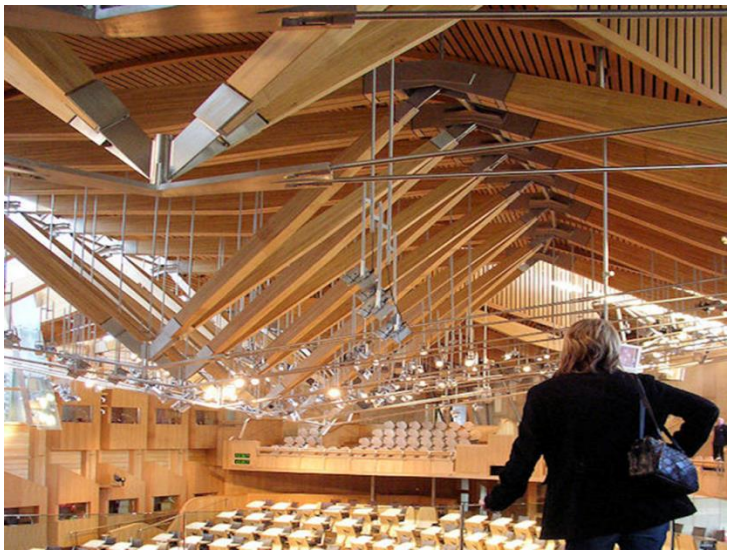

Abbildung 5: Dachkonstruktion des neuen schottischen Parlaments aus unterspannten Eichenbrettschichtholzträgern

Abbildung 6: Treppen- und Säulenkonstruktion aus Eichenbrettschichtholz (Fa. Gamiz, Spanien)

Das heute leistungsfähigste Brettschichtholz aus Laubholz besteht aus Buche-Furnierschichtholzlamellen gemäß DIN EN 13474 der Fa. Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH, Creuzburg, und wurde für denselben Antragsteller erstmalig 2013 mit deutscher allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung Z-9.1-837 [27] und sodann 2015 mittels ETA [28] europaweit baurechtlich vollumfänglich anwendbar gemacht. Brettschichtholz aus Buchen-Furnierschichtholz (Buche FSH-BSH) entspricht der Festigkeitsklasse GL70, d.h. zeichnet sich durch eine charakteristische Biegefestigkeit von 70 N/mm^2, einen Mittelwert des Elastizitätsmoduls in Faserrichtung von 16700 N/mm^2 sowie eine Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung von rd. 70 bzw. 58,4 N/mm^2 (Nutzungsklasse 1 bzw. 2 und Bauteilhöhe ≥ 320 mm) aus.

Abbildung 7 zeigt das Biegefestigkeits-Elastizitätsmodul-Leistungspotential des Buche FSH-BSH im Vergleich zu anderen oben angesprochenen LH-BSH-Produkten sowie in Bezug auf die Leistungsspanne von Brettschichtholz aus Nadelholz nach DIN EN 14080. Abbildung 8 veranschaulicht das Leistungspotential des Buche FSH-BSH-Werkstoffs bezüglich der Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung im Vergleich zu Normalbeton und hochfestem Beton. Gegenüber Normalbeton liegt der charakteristische Wert der Druckfestigkeit am absoluten oberen Rand des Beton-Leistungsspektrums. Betrachtet man die Verhältnisse sodann gewichtsbezogen so übertrifft der Werkstoff steifigkeits- und festigkeitsmäßig hochfesten Beton.

Mit dem neuen Laubholz-Höchstleistungswerkstoff wurden zwischenzeitlich eine Reihe technisch sehr anspruchsvoller mehrgeschossiger Konstruktionen ausgeführt [29], die mit herkömmlichem Nadelholz-basiertem Brettschichtholz in dieser Form nicht hätten realisiert werden können. Abbildung 9 zeigt exemplarisch einen Stützenanschluss mit dem neuen Werkstoff, bei dem von der sehr hohen Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung Gebrauch gemacht wird.

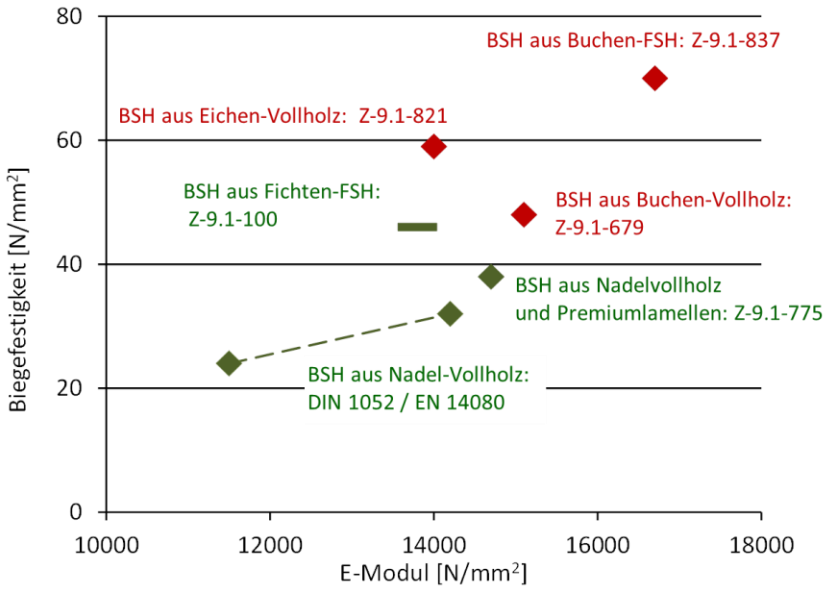

Abbildung 7: Biegefestigkeits- E-Modul- Beziehungen unterschiedlicher Laubholz- und Nadelholz-basierter Brettschichtholzprodukte

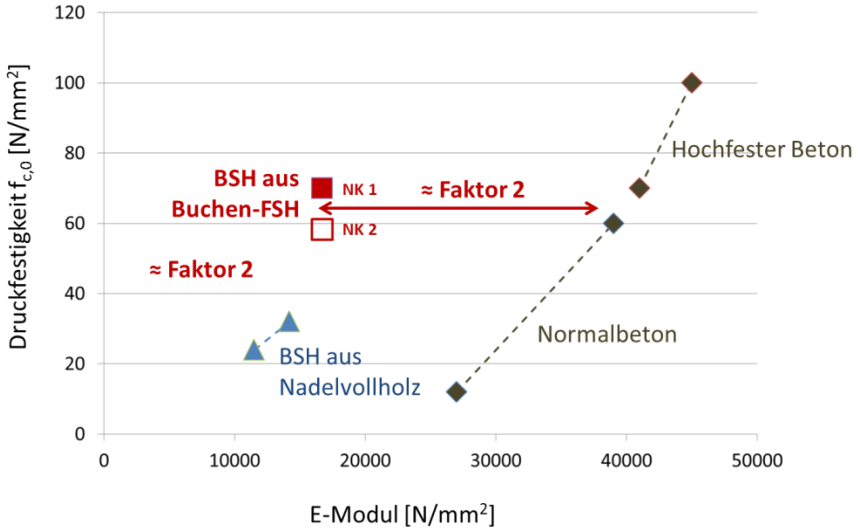

Abbildung 8: Druckfestigkeits-E-Modul- Beziehungen unterschiedlicher Laubholz- und Nadelholz-basierter Brettschichtholzprodukte im Vergleich zu normal- und hochfestem Beton

Abbildung 9: Stützenanschluss mit Buche FSH-BSH bei einem mehrgeschossigen Bauvorhaben der Fa. Holzbau Vorholz Hawran

4. Anschlüsse in Laubholzbauteilen

Neben dem Fließmoment bzw. der Zugfestigkeit des Verbindungsmittels ist die Lochleibungsfestigkeit des Füge/Anschlussteils von zentraler Bedeutung für die Tragfähigkeit und damit für die Auslegung von Anschlüssen mittels quer zur Stabachse beanspruchter stiftförmiger Verbindungsmittel (Stabdübel und Bolzen).

Nach DIN EN 1995-1-1 [31] gilt für den charakteristischen Wert der Lochleibungsfestigkeit bei Beanspruchung des Verbindungsmittels unter einem Winkel α zwischen Kraft- und Faserrichtung

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90}\,\sin^2\alpha + \cos^2\alpha} \qquad (1)$$

mit

$$f_{h,0,k} = 0{,}082\,(1 - 0{,}01\,d)\,\rho_k \qquad (2)$$

und

$$k_{90} = \begin{cases} 1{,}35 + 0{,}015\,d & \text{für Nadelhölzer} \\ 1{,}30 + 0{,}015\,d & \text{für Furnierschichtholz LVL} \\ 0{,}90 + 0{,}015\,d & \text{für Laubhölzer} \end{cases} \qquad (3)$$

wobei

$f_{h,0,k}$ der charakteristische Wert der Lochleibungsfestigkeit in Faserrichtung des Holzes in N/mm²;
ρ_k der charakteristische Wert der Rohdichte des Holzes in kg/m³;
α der Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung;
d der Bolzendurchmesser in mm.

Wie aus den Gleichungen (1) – (3) ersichtlich hängt zum einen die Lochleibungsfestigkeit bei faserparaller Beanspruchung direkt proportional von der charakteristischen Rohdichte ab (Gl. (2)) und zum anderen wird auch der Modifikationswert k_{90} für eine Beanspruchung schräg zur Faserrichtung deutlich durch die Holzartgruppe (Nadel- bzw. Laubholz) beeinflusst. Die Lochleibungsfestigkeit für 0° und 90° zur Faserrichtung des Anschlußteils aus

Laubholz liegt somit bei Laubhölzern unabhängig von der Holzart, bedingt durch den hohen Unterschied der Rohdichten von C- und D-Klasse gleicher charakteristischer Biegefestigkeitsklasse um die Faktoren 1,4 bzw. 2,0 (Verbindungsmitteldurchmesser: 8–16 mm) über denjenigen des Nadelholzes. Für Verbindungsmittel-Versagensmodi die völlig/weitgehend durch die Lochleibungsfestigkeit bestimmt werden, d.h. bei sehr kompakten, dicken stiftförmigen Verbindungsmitteln ergeben sich sodann unmittelbar quantitativ entsprechende Erhöhungen der charakteristischen Tragfähigkeiten bei Beanspruchung auf Abscheren im Vergleich zu Verbindungen in Nadelhölzern. Anschlüsse mit stiftförmigen rechtwinklig zur Verbindungsmittelachse beanspruchten Verbindungsmitteln (Stabdübel, Bolzen) lassen sich somit mit Laubholz-Anschlussteilen im Vergleich zu Nadelholzanschlüssen deutlich wirtschaftlicher ausführen, was auf die Gesamtwirtschaftlichkeit des Bauvorhabens erheblichen Einfluss haben kann.

Vergleichbar wie bei auf Abscheren beanspruchten Verbindungsmitteln wirkt sich auch bei axial beanspruchten Schrauben eine erhöhte Rohdichte deutlich tragfähigkeitserhöhend aus. Die Gln. (4) – (6) spezifizieren die EC5 [31] Beziehungen für den Ausziehwiderstand axial beanspruchter Schrauben für Schrauben nach DIN EN 14592 mit Durchmessern von 6 bis einschließlich 12 mm.

$$F_{ax,\alpha,Rk} = \frac{n_{ef}\, f_{ax,k}\, d\, l_{ef}\, k_d}{1{,}2\cos^2\alpha + \sin^2\alpha} \tag{4}$$

$$f_{ax,k} = 0{,}52\, d^{-0{,}5} l_{ef}^{-0{,}1}\, \rho_k^{0{,}8} \tag{5}$$

$$k_d = \min\begin{cases}\frac{d}{8}\\ 1\end{cases} \tag{6}$$

und

$F_{ax,\alpha,Rk}$ der charakteristische Wert des Auszugswiderstands der Verbindung unter einem Winkel α zur Faserrichtung, in N;
$f_{ax,k}$ der charakteristische Wert der Ausziehfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung in N/mm²;
n_{ef} die wirksame Anzahl von Schrauben;
l_{ef} die Eindringtiefe des Gewindeteils, in mm;
ρ_k der charakteristische Wert der Rohdichte in kg/m³;
α der Winkel zwischen der Schraubenachse und der Faserrichtung, mit $\alpha \geq 30°$.

Der Basiswert der charakteristischen Ausziehfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung hängt hierbei nicht linear sondern mit dem Exponenten 0,8 von der charakteristischen Rohdichte ab, wodurch sich der tragfähigkeitserhöhende Effekt der rd. 1.4fach höheren Rohdichte von Laubholz gleicher C- und D-Biegefestigkeitsklassen auf einen Faktor von rd. 1.3 reduziert. Bei vorgebohrten Holzschrauben darf sodann bei bestimmten LH-Produkten (z.B. [14]) der Beiwert k_d nach Gl. (6) durchweg zu 1 angesetzt werden, was sich bei Schrauben mit Durchmessern ≤ 8 mm zunehmend deutlich auf einen höheren Ausziehwiderstand auswirkt.

5. Ausblick

Ungeachtet der Tatsache, dass Laubholz-basierte sogenannte engineered wood products erst in den letzten Jahren und sodann mit noch wenigen Produkten hergestellt und baurechtlich einsetzbar wurden, so ist doch das sehr hohe Potential von Bauwerkstoffen aus Laubholz eindeutig erkennbar. Es ist absehbar, dass das Bauen mit Laubholzprodukten deutlich zunehmen wird und hierbei auch mit dazu beitragen wird, das Leistungsspektrum von Holz im Wettbewerb mit anderen konkurrierenden Baustoffen deutlich auszuweiten.

6. Literaturverzeichnis

[1] DIN EN 338:2016 Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen

[2] DIN EN 338:2013 Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen

[3] DIN EN 1912:2013 Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen – Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten

[4] DIN 4074-5:2008 Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 5: Laubschnittholz

[5] BS 5756:2007+A1:2011 Visual strength grading od hardwood

[6] NEN 5493:2010 Quality requirements for hardwoods in civil engineering works and other structural applications

[7] DIN EN 636:2012 Sperrholz – Anforderungen

[8] DIN EN 13986:2005 Holzwerkstoffe zur Verwendung im Bauwesen – Eigenschaften, Bewertung der Konformität und Kennzeichnung

[9] DIN EN 14374: 2005 Holzbauwerke – Furnierschichtholz für tragende Zwecke – Anforderungen

[10] FprEN 16351:2013 Timber structures – Cross laminated timber – Requirements

[11] Z-9.1-843: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) vom 04.08.2014. Zulassungsgegenstand: Sperrhölzer aus Nadelholz „Metsä Wood Spruce" und Sperrhölzer aus Birkenholz „Metsä Wood Birch". Antragsteller: Metsäliitto Cooperative Metsä Wood, Finnland

[12] DOP for WELDE FILM ROBUSTA 01/07/2013: Declaration of performance for product type „WELDE FILM ROBUSTA" poplar plywood external use as structural components in exterior conditions (EN 636-3S), Manufacuterer: WELDE BULGARIA AD, Troyan, Bulgarien

[13] Z-9.1-841: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) vom 25.11.2013. Zulassungsgegenstand: Sperrholz aus Buchefurnieren. Antragsteller: Hess & Co. AG, Döttingen, Schweiz

[14] Z-9.1-838: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) vom 25.09.2013. Zulassungsgegenstand: Furnierschichtholz aus Buche zur Ausbildung stabförmiger und flächiger Tragwerke „Buchen-FSH längslagig" „Buchen-FSH querlagig". Antragsteller: Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH, Creuzburg

[15] Leistungserklärung PM-001-2013 betr. Furnierschichtholz aus Buche, Zertifikat der Leistungsbeständigkeit 0672-CPR-0415 , Pollmeier Furnierwerkstoffe Gmbh, Creuzburg

[16] Jeitler, G., Augustin, M., Schickhofer, G. (2016): Mechanical properties of glued laminated timber and cross-laminated timber produced with the wood species birch. Proceedings World Conference on Timber Engineering (WCTE 2016), Wien

[17] Aicher, S., Christian, Z., Hirsch, M. (2016) Rolling shear modulus and strength of beech wood laminations. Holzforschung 70(8):773-781

[18] Aicher, S., Hirsch, M., Christian, Z. (2016) Hybrid cross-laminated timber plates with beech wood cross-layers. Construction and Building Materials, Vol. 124: 1007 – 1018

[19] Aicher, S. Laubholzprodukte und –anwendungen im Bauwesen – Aktueller Stand in Europa. Tagungsband 20. Internationales Holzbau-Forum (IHF 2014), Garmisch

[20] DIN EN 14080:2013: Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen

[21] Z-9.1-577: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) vom 01.04.2010 (Erstzulassung 05.04.2004). Zulassungsgegenstand: Brettschichtholz aus Dark Red Meranti, Antragsteller Enno Roggemann GmbH, Bremen

[22] Z-9.1-679 (2014) Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung – BS-Holz aus Buche und BS-Holz Buche-Hybridträger. Geltungsdauer: 27.10.2014 bis 27.10.2019. Erstzulassung 07.10.2009. Antragssteller: Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V., Wuppertal

[23] Z-9.1-704: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) vom 04.05.2012. Zulassungsgegenstand: VIGAM Brettschichtholz aus Eiche. Antragsteller: Elaborados y Fabricados Gamiz S.A., Sta. Cruz de Campezo, Spanien

[24] ETA-13/0642: Europäisch Technische Zulassung des Österreichischen Instituts für Bautechnik (OIB) vom 28.06.2013. Zulassungsgegenstand: Brettschichtholz (BSH) aus Laubholz, Antragsteller: Elaborados y Fabricados Gamiz S.A., Sta. Cruz de Campezo, Spanien

[25] Z-9.1-821: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) vom 02.03.2013. Zulassungsgegenstand: Holz Schiller Eiche-Pfosten-Riegel-Brettschichtholz. Antragsteller: Holz Schiller GmbH, Regen

[26] ETA-13/0646: Europäisch Technische Zulassung des Österreichischen Instituts für Bautechnik (OIB) vom 28.06.2013. Zulassungsgegenstand: Brettschichtholz (BSH) aus Laubholz. Antragsteller: SIEROLAM S.A., Siero 33188 Asturias, Spanien

[27] Z-9.1-837: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) vom 02.12.2013. Zulassungsgegenstand: Brettschichtholz aus Buchen-Furnierschichtholz. Antragsteller: Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH, Creuzburg

[28] ETA-14/0354: Europäisch Technische Zulassung des Österreichischen Instituts für Bautechnik (OIB) vom 20.02.2015. Zulassungsgegenstand: Brettschichtholz aus Laubholz – Buchenfurnierschichtholz für tragende Zwecke. Antragsteller: Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH, Creuzburg

[29] Merz, K. 2016: Tragwerke aus Buchen-Furnierschichtholz. Tagungsband 22. Internationales Holzbau-Forum (IHF2016), Garmisch; im Druck

[30] Aicher, S., Christian, Z.; Dill-Langer, G. (2014): Hardwood glulams – emerging timber products of superior mechanical properties. Proccedings World Conf. on Timber Engineering (WCTE 2014).

[31] DIN EN 1995-1-1:2010 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Alllgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008

[32] Z-9.1-773: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) vom 8.4.2014 (erstmalig zugelassen am 2.11.2011). Zulassungsgegenstand: Holzschalungsträger DOKA-Träger I tec 20, Antragsteller: DOKA Industrie GmbH, Amstetten, Österreich