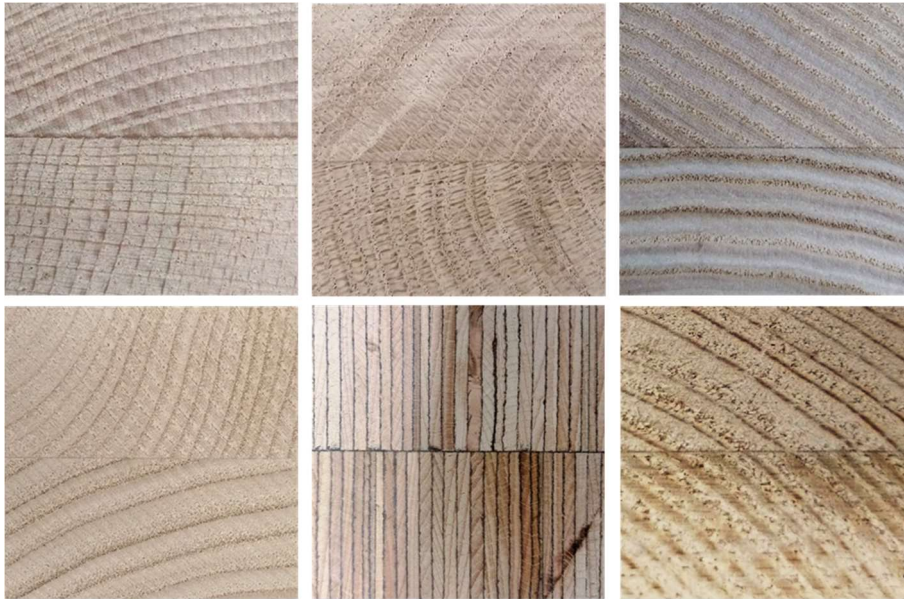




Laubholzstützen

Druckfestigkeit und E-Modul parallel zur Faserrichtung und Einfluss der Holzfeuchte

WHFF-CH 2020.11 Schlussbericht

Datum	30.06.2021	
Fördergeber	Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz (WHFF-CH), BAFU	
Adressen der Projektpartner	¹⁾ ETH Zürich Inst. f. Baustatik und Konstruktion Stefano-Franscini-Platz 5 CH-8093 Zürich www.ethz.ch	²⁾ Empa Dübendorf Abt. Ingenieur-Strukturen Ueberlandstrasse 129 CH-8600 Dübendorf www.empa.ch
	³⁾ neue Holzbau AG Obseestrasse 11 CH-6078 Lungern www.neueholzbau.ch	⁴⁾ HEIG-VD Institut d'ingénierie du territoire Route de Cheseaux 1 CH-1401 Yverdon-les-Bains www.heig-vd.ch
Verfasser	Dr. Thomas Ehrhart ¹⁾ , Dr. René Steiger ²⁾ , Prof. Dr. Andrea Frangi ¹⁾ , Thomas Strahm ³⁾ , Prof. Dr. Andrea Bernasconi ⁴⁾	
Projektleiter	Prof. Dr. Andrea Frangi ¹⁾	

WHFF-CH 2020.11 - Schlussbericht

Kurzfassung

Die Nutzung von Laubholz im konstruktiven Holzbau bietet die Antwort auf zwei grosse Herausforderungen der kommenden Jahrzehnte. Einerseits erlaubt das generell höhere Leistungspotential von Laubholz im Vergleich zu Nadelholz die Erweiterung des Anwendungsbereiches des konstruktiven Holzbaus insgesamt. Dadurch lassen sich mineralische und metallische Baustoffe substituieren und damit die Emissionen von Treibhausgasen im Bausektor reduzieren. Grösstmögliche Einsparungen ergeben sich dann, wenn lokale Ressourcen verwendet und die Bearbeitung und letztlich die Nutzung ohne grosse Transportwege erfolgen. Andererseits befindet sich der Schweizer Wald, bedingt durch den Klimawandel, gegenwärtig stark im Umbau. Eine Konsequenz daraus wird aller Voraussicht nach sein, dass der heutige Brotbaum der Holzindustrie, die Fichte, in Zukunft in geringerem Umfang zur Verfügung steht. Es ist das Gebot der Stunde, jene Holzarten, die vom Klimawandel profitieren – oder zumindest weniger stark darunter leiden – hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz im konstruktiven Holzbau zu untersuchen und damit die Weichen zu stellen für eine künftige ökologisch wie ökonomisch sinnvolle Nutzung des Schweizer Holzvorrates.

Im Rahmen des WHFF-CH Projektes 2020.11, dessen Schlussbericht hier vorliegt, wurden für Brettschichtholz (BSH) aus Buche, Eiche, Esche und Kastanie sowie für Furnierschichtholz (FSH) aus Buche jene Eigenschaften systematisch untersucht, die für den Einsatz in Stützen relevant sind. Es handelt sich hierbei um die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung ($f_{c,0}$), den Druck-Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung ($E_{c,0}$) sowie den Einfluss der Holzfeuchte (u) auf die genannten Eigenschaften. Als «Referenzprodukt» wurde in dieser Studie BSH aus Fichte (Festigkeitsklasse GL 28h) geprüft.

Insgesamt wurden 300 Druckprüfungen zur Bestimmung der Druckfestigkeit und des Druck-Elastizitätsmoduls parallel zur Faser durchgeführt. Der untersuchte Holzfeuchtebereich reichte von 6 bis 18%. Die Holzfeuchte sämtlicher Prüfkörper wurde mit der Darrofenmethode bestimmt. Auch die Dichte der Prüfkörper sowie das Quell- bzw. Schwindmass wurden im Rahmen des Projektes ermittelt.

Basierend auf den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen wurde der Einfluss der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit und den Druck-Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung quantifiziert, Modelle für deren Berücksichtigung erarbeitet sowie für sämtliche untersuchte Lauholzprodukte Bemessungswerte für die Druckfestigkeit ($f_{c,0,d}$) und den Druck-Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung ($E_{c,0,mean}$ und $E_{c,0,05}$) in Feuchteklasse 1 und Feuchteklasse 2 abgeleitet.

Die umfangreichen und systematischen Untersuchungen dieser Studie erlauben eine Mitwirkung bei der Normierung auf europäischer Ebene und damit die durch Daten abgesicherte Vertretung Schweizerischer Interessen. Insbesondere sei in diesem Hinblick auf die derzeit im CEN/TC 124 laufende Erarbeitung einer Produktnorm für Brettschichtholz aus Laubholz (prEN 14080-2) sowie auf die Überarbeitung des Eurocode 5 (EN 1995-1-1) hingewiesen. Auf nationaler Ebene sollen die Ergebnisse im gegenwärtig in Erarbeitung befindlichen Bemessungshandbuch «Lignatec Laubholz» sowie langfristig in die Norm SIA 265 Eingang finden.

Dieses Projekt erfuhr eine massgebliche finanzielle Unterstützung durch das Bundesamt für Umwelt (BAFU) und durch die Kantone (KWL) im Rahmen der Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz (WHFF-CH), welche im Namen des Projektteams verdankt wird.

Abstract

The use of hardwood in structural timber engineering offers a solution to two major challenges of the coming decades. On the one hand, the generally higher performance potential of hardwood compared to softwood allows for the expansion of the range of applications of structural timber construction. Mineral and metallic building materials can thus be substituted, which reduces greenhouse gas emissions in the construction sector. These emissions are further minimised when local wood resources are used and the production of engineered wood product happens without the need for long transports. On the other hand, the Swiss forest is currently undergoing major transformation due to climate change. One consequence of this will most likely be that Norway spruce will be less available in the future. Therefore, it is necessary to investigate the suitability of those wood species that benefit from climate change for use in structural timber engineering and thus prepare the basis for the ecologically and economically sensible use of Switzerland's wood supply in the future.

Within the framework of the project WHFF-CH 2020.11, glued laminated timber (glulam) made of European beech, oak, ash and chestnut as well as laminated veneer lumber (LVL) made of beech for columns were investigated systematically with regard to their use for columns. The mechanical properties that are of key importance for this type of application are the compressive strength parallel to the grain direction ($f_{c,0}$), the compressive modulus of elasticity parallel to the grain direction ($E_{c,0}$) and the influence of the wood moisture content (u) on the properties mentioned. In this study, Norway spruce glulam was investigated as a "reference product".

A total of 300 compression tests were carried out to determine the compressive strength and compressive modulus of elasticity parallel to the grain. The tested wood moisture content ranged from 6 to 18%. The wood moisture content of all test specimens was determined using the dry-oven method. The density of the test specimens as well as the swelling and shrinkage behaviour were also determined.

Based on the results of the experimental investigations, the influence of the wood moisture content on the compressive strength and the compressive modulus of elasticity parallel to the grain was quantified. Models for considering this influence were developed and design values for the compressive strength ($f_{c,0,d}$) and compressive modulus of elasticity parallel to the grain ($E_{c,0,mean}$ and $E_{c,0,05}$) in service class 1 and service class 2 were derived.

The extensive and systematic investigations of this study allow for a contribution to the standardisation at the European level and thus the representation of Swiss interests based on data and empirical evidence. In this respect, particular emphasis should be placed on the current development of a product standard for glulam made of hardwood (prEN 14080-2) in CEN/TC 124 as well as on the revision of Eurocode 5 (EN 1995-1-1). At national level, the outcomes of this study should be considered in the design manual "Lignatec Hardwood", which is currently being prepared, and in the long term view in the Swiss design standard SIA 265.

This project received substantial financial support from the Swiss Federal Office for the Environment (FOEN) and from the Swiss Cantons (KWL) within the framework of the Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz (WHFF-CH), which is gratefully acknowledged on behalf of the project team.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	ii
Résumé	iii
1. Einleitung	1
1.1. Ausgangslage	1
1.1.1. Zusammensetzung und Entwicklung des Schweizer Waldes	1
1.1.1. Literatur und Studien zum Thema «Laubholzstützen»	2
1.2. Zielsetzung	3
1.3. Projektpartner	4
2. Material	4
2.1. Untersuchte Holzarten und Produkte	4
2.1.1. Brettschichtholz (BSH) aus Buche (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	5
2.1.2. Brettschichtholz (BSH) aus Eiche (<i>Quercus robur</i> L.)	7
2.1.3. Brettschichtholz (BSH) aus Esche (<i>Fraxinus excelsior</i> L.)	8
2.1.4. Brettschichtholz (BSH) aus Kastanie (<i>Castanea sativa</i> Mill.)	9
2.1.5. Brettschichtholz (BSH) aus Fichte (<i>Picea abies</i> (L.) H.Karst.)	10
2.1.6. Furnierschichtholz (FSH) aus Buche	11
2.2. Produktion der Prüfkörper	11
2.3. Klimatisierung der Prüfkörper	13
3. Methoden	14
3.1. Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung	14
3.1.1. Prüfaufbau	14
3.1.2. Messtechnik	14
3.1.3. Prüfablauf und Ermittlung der mechanischen Eigenschaften	15
3.2. Bestimmung der Holzfeuchte	16
4. Ergebnisse	18
4.1. Überprüfung des «Vierlings-Ansatz»	18
4.2. Bruchverhalten in Abhängigkeit der Holzfeuchte	18
4.2.1. BSH aus Buche	19
4.2.2. BSH aus Eiche	21
4.2.3. BSH aus Esche	22
4.2.4. BSH aus Kastanie	23
4.2.5. BSH aus Fichte	24
4.2.6. FSH aus Buche	25
4.3. Einfluss der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung	26
4.3.1. BSH aus Buche	26
4.3.2. BSH aus Eiche	28

4.3.3.	BSH aus Esche	29
4.3.4.	BSH aus Kastanie	31
4.3.5.	BSH aus Fichte.....	31
4.3.6.	FSH aus Buche.....	33
4.3.7.	Übersicht zum Einfluss der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung von Laubleimholzprodukten	34
4.4.	Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung.....	34
4.4.1.	BSH aus Buche.....	35
4.4.2.	BSH aus Eiche	37
4.4.3.	BSH aus Esche	37
4.4.4.	BSH aus Kastanie	39
4.4.5.	BSH aus Fichte.....	39
4.4.6.	FSH aus Buche.....	40
4.4.7.	Übersicht zum Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung von Laubleimholzprodukten	41
5.	Diskussion	42
5.1.	Charakteristische Werte der Druckfestigkeiten und Mittelwerte des Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung für die Feuchteklassen 1 und 2	42
5.2.	Vorschlag von normativen Anpassungen.....	44
5.2.1.	Definition von Nutzungsklassen bzw. Feuchteklassen – Anpassungen in den Normen EN 1995-1-1 und SIA 265	44
5.2.2.	Überprüfung der in der Norm SIA 265 definierten Faktoren η_w zur Berücksichtigung des Holzfeuchteeinfluss auf den Tragwiderstand und die Steifigkeit.....	44
5.2.3.	Umrechnung von Prüfergebnissen auf die Referenzholzfeuchten – Anpassungen in der Norm EN 384	45
5.2.4.	Ermittlung der Holzfeuchte – Anpassungen in der Norm EN 13183	45
5.2.5.	Klimatisierung und Prüfung – Anpassungen in der Norm EN 408	46
6.	Danksagung	46
7.	Literatur	46

1. Einleitung

1.1. Ausgangslage

1.1.1. Zusammensetzung und Entwicklung des Schweizer Waldes

Gemäss viertem Schweizerischen Landesforstinventar (LFI4 09/13) beträgt der landesweite Holzvorrat aller lebender Bäume 422 Mio. m³ [1]. Rund zwei Drittel des Vorrates entfallen dabei auf Nadelholz, wobei die Baumarten Fichte (43.7%) und Tanne (14.9%) davon einen Grossteil ausmachen. Jenes Drittel, das der Laubholzvorrat ausmacht, wird von der Buche (18.1%) dominiert. In Abb. 1 wird der Vorratsanteil lebender Bäume ausgewählter Holzarten am Schweizer Wald grafisch dargestellt. Mit einem Asterisk (*) sind dabei jene Holzarten markiert, die im Rahmen dieses Projektes untersucht wurden.

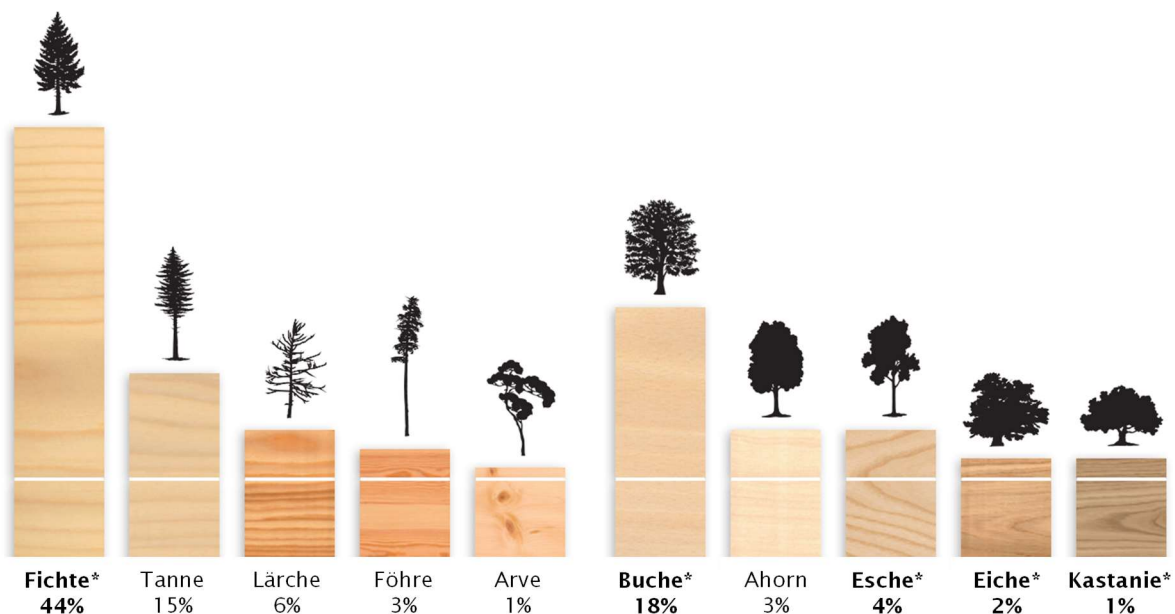


Abb. 1: Vorratsanteil lebender Bäume in der Schweiz. Die mit einem Asterisk (*) markierten Holzarten wurden in diesem Projekt untersucht. Bildquelle: [2] (geändert von Stammzahl- auf Vorratsanteil).

In ihrer Publikation „*Der Schweizer Wald im Klimawandel - Welche Entwicklungen kommen auf uns zu?*“ untersuchen Allgaier-Leuch et al. [3] die Auswirkungen des Klimawandels auf den heimischen Wald. Durch die zu erwartenden trockeneren und wärmeren Sommer dürfte den Bäumen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts während der Vegetationszeit generell deutlich weniger Wasser zur Verfügung stehen. Extremereignisse, wie der Hitzesommer 2003 und die Jahrhundertniederschläge vom August 2005, dürften häufiger auftreten und die Entwicklung des Buchdruckers und anderer Schadinsekten wird aller Voraussicht nach begünstigt [3]. Die Summe dieser Entwicklungen wird auch die künftige Zusammensetzung des Schweizer Waldes beeinflussen. In ihrem Fazit weisen Allgaier-Leuch et al. [3] darauf hin, dass „davon auszugehen ist, dass der Klimawandel so stark ist und so rasch abläuft, dass sich der Wald ohne menschliche Hilfe nicht genügend rasch anpassen kann“. Entsprechend wichtig sei es, dass „die Waldverantwortlichen die Anpassung des Waldes gezielt unterstützen und rechtzeitig eingreifen, um die Baumartenzusammensetzung sanft und sukzessive anzupassen“. Welche Baumarten letztlich am meisten vom Klimawandel profitieren – bzw. am wenigsten darunter leiden – hängt gemäss Allgaier-Leuch et al. [3] stark vom Waldstandort ab. Generell sei in der Schweiz aber eine abnehmenden Habitateignung insbesondere für die Fichte – dem heutigen Brotbaum der Holzindustrie – zu erwarten.

1.1.1. Literatur und Studien zum Thema «Laubholzstützen»

Wegen ihrer grösseren Härte, Festigkeit und teilweise auch Dauerhaftigkeit wurden Laubhölzer seit jeher dann verwendet, wenn mit den generell einfacher zu bearbeitbaren und meist günstigeren Nadelhölzern die spezifischen Anforderungen für Bauten und sonstige Zwecke nicht mehr erfüllt werden konnten. Bereits in den frühesten «Pionier-Arbeiten» zur Verwendung von Laubholz im «modernen» konstruktiven Ingenieurholzbau, u.a. von Egner und Kolb [4] in den 1960er Jahren und ab den frühen 1980er Jahren von Gehri [5], konnte das enorme Potential, das die Verwendung von Laubholzprodukten für Bauzwecke bietet, auch wissenschaftlich bestätigt werden.

Nach einer mehrere Jahrzehnte andauernden Periode, in der der Holzbau sowohl in der Forschung als auch in der Baupraxis ein Nischendasein führte und der Fokus stark auf metallischen und mineralischen Bauprodukten lag, führten Entwicklungen und Innovationen seit den 90er Jahren dazu, dass der Holzbau wieder vermehrt Beachtung erhielt. Getragen von einer zunehmenden Industrialisierung und Optimierung der Herstellung von Brettschichtholz (BSH), Brettsperrholz (BSP) und Furnierschichtholz (FSH) haben sich die genannten Holzwerkstoffe mittlerweile als technisch und wirtschaftlich konkurrenzfähige Bauprodukte etabliert. In jüngster Vergangenheit erhielten diese Entwicklungen durch ein gesteigertes gesellschaftliches Bewusstsein für die Auswirkungen des Klimawandels einen weiteren Schub.

Die genannten Entwicklungen beschränkten sich grösstenteils auf Nadelholz und die daraus gewonnenen Produkte. Die Beforschung und Entwicklung von Laubleimholzprodukten ist erst in den vergangenen Jahren (wieder) intensiviert worden [6]. Einerseits verlangen immer kühnere Bauwerke aus Holz nach leistungsfähigeren Holzwerkstoffen – diese können mit Laubholz, wie eingangs erwähnt, erreicht werden. Andererseits wird durch den Umbau des Schweizer Waldes in Zukunft aller Voraussicht nach mehr Laubholz zur Verfügung stehen – zu Lasten der Fichte, des heutigen Brotbaums der Forstwirtschaft. Es gilt deshalb bereits heute, den Weg für eine ökonomisch wie ökologisch sinnvolle Nutzung der künftig verfügbaren Ressourcen zu bereiten.

Die Verwendung von Laubholz für den Einsatz als Stützen im konstruktiven Holzbau wurde bereits in [7] als solche ökonomisch wie ökologisch sinnvolle Nutzung identifiziert. Für den Einsatz verschiedener wichtiger Laubhölzer fehlen bislang aber essenzielle Informationen hinsichtlich der Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung, des Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung sowie des Einflusses der Holzfeuchte auf diese Eigenschaften.

Tab. 1: Übersicht bereits erfolgter Untersuchungen zum Thema Laubholz, Druckfestigkeit und Feuchteinfluss.

Ref.	Umfang	Autor(en)
[8]	Ermittlung elastomechanischer Kennwerte an Eschen-Kleinproben bei Holzfeuchten von rund 8.5 bis 19%.	Clauss et al.
[9]	Untersuchung zum feuchte- und zeitabhängigen orthotropen Verhalten von Buchen-Kleinproben.	Ozyhar
[10]	Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Buchen BSH (u.a. Druckfestigkeit; bis GL 55h) bei einer Holzfeuchte von $8 \pm 2\%$.	Steiger et al.
[11]	Zug- und Druckfestigkeit von Buchen BSH «niedriger Qualität» bei einer Holzfeuchte von rund 10%.	Westermayr et al.
[12]	Firmenbezogene Leistungserklärung für Brettschichtholz aus Eiche mit Angabe der Druckfestigkeit und des E-Modul für NK 1 und 2.	Grupo Gamiz
[13]	Firmenbezogene Leistungs- und Herstellererklärung für Brettschichtholz aus Esche und Buche bis GL 48h.	neue Holzbau AG
[14]	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für BSH aus Buche und Buche-Hybridträger	Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V.

Wehrmann und Torno [6] geben eine Übersicht zu laufenden und abgeschlossenen Forschungsprojekten im Bereich «Laubholz für tragende Zwecke» (Stand 2015). In Tab. 1 sind Publikationen angeführt, die sich mit dem Thema Laubholz, Druckfestigkeit und Feuchteinfluss befassen. Sowohl in [6] als auch in Tab. 1 ist ersichtlich, dass der Fokus bisheriger Arbeiten einerseits auf Untersuchungen an Kleinproben einzelner Holzarten beschränken. Andererseits fehlen für BSH Untersuchungen unter Berücksichtigung des Einflusses der Holzfeuchte. Die Hintergrunddokumente und Prüfergebnisse der firmenbezogenen Dokumente sind grösstenteils nicht öffentlich zugänglich und auch hier werden überwiegend keine spezifischen Aussagen zum Einfluss der Holzfeuchte gemacht.

1.2. Zielsetzung

Das **übergeordnete Ziel** des WHFF-CH 2020.11 Projektes wurde wie folgt definiert:

Laubholzstützen können – durch experimentelle Untersuchungen abgesichert und technisch wie wirtschaftlich konkurrenzfähig – in den Feuchteklassen 1 und 2 (jedoch nicht direkt bewittert) eingesetzt werden. Dadurch entsteht eine neue Verwendungsmöglichkeit für die bisher nur in geringem Umfang für Bauzwecke eingesetzten heimischen Laubholzarten Buche, Eiche, Esche und Kastanie. Diese Verwendung ist mit einer hohen Wertschöpfung verbunden und trägt – durch die Substitution von mineralischen und metallischen Bauprodukten – zur Reduktion des Energiebedarfs und der Treibhausgas-Emissionen in der Schweizerischen Bauindustrie bei.

Um zur Erreichung des übergeordneten Projektzieles beizutragen, sollen innerhalb des Projektes die folgenden **fünf konkreten Projekt-Hauptziele** erreicht werden:

- I. Die für die Bemessung von Stützen essenziellen Eigenschaften Druckfestigkeit ($f_{c,0}$) und E-Modul parallel zur Faserrichtung ($E_{c,0}$) werden für Brettschichtholz (BSH) aus Buche, Eiche, Esche und Kastanie sowie für Furnierschichtholz (FSH) aus Buche für verschiedene Holzfeuchten bestimmt.
- II. Der Bemessungswert der Druckfestigkeit ($f_{c,0,d}$), der mittlere E-Modul parallel zur Faserrichtung ($E_{c,0,mean}$), sowie der für die Knickbemessung erforderliche 5%-Fraktilwert des E-Moduls parallel zur Faserrichtung ($E_{c,0,05}$) wird für die genannten Laubholzprodukte für die Feuchteklassen 1 und 2 gemäss Norm SIA 265 [15] bzw. für die Nutzungsklassen 1 und 2 gemäss Eurocode 5 [16] definiert.
- III. Der Einfluss der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit und den E-Modul parallel zur Faserrichtung wird quantifiziert und die resultierenden Funktionen zur Beschreibung dieses Einflusses in die Europäische Normierung (EN 384 [17]) getragen.
- IV. Die Ergebnisse werden im Bemessungshandbuch *Lignatec Laubholz* aufgenommen und stehen Ingenieurinnen und Architektinnen für die Tragwerksplanung von Laubholzstützen zur Verfügung.
- V. Die Ergebnisse werden in die Arbeitsgruppe CEN/TC124/WG3/TG1 getragen, die sich gegenwärtig mit der Erstellung der europäischen Produktnorm prEN 14080-2 [18] für Brettschichtholz aus Laubholz beschäftigt. Dadurch sollen die schweizerischen Interessen vertreten und Laubleimholz Produkte als leistungsfähige, den Einsatzbereich von Holzprodukten erweiternde, Produkte auf europäischer Ebene normiert werden.

1.3. Projektpartner

Das Projektteam setzte sich aus den drei Schweizer Forschungsinstitutionen ETH Zürich (Institut für Baustatik und Konstruktion / IBK – Holzbau), Empa Dübendorf (Abteilung Ingenieur-Strukturen) und HEIG-VD (Institut d'ingénierie du territoire / insit) sowie dem Unternehmen neue Holzbau AG (Lungern/OW) zusammen. Eine Übersicht zu den am Projekt beteiligten Institutionen und Personen bietet Tab. 2.

Die Projektleitung lag bei Andrea Frangi (ETH Zürich). Bei der Produktion der Prüfkörper konnte auf das langjährige Knowhow der neue Holzbau AG, vertreten durch Thomas Strahm, zurückgegriffen werden. Die Konzipierung und Durchführung der Versuche erfolgte an der ETH Zürich durch Thomas Ehrhart. Die Erarbeitung der Publikationen und Normenvorschläge erfolgte durch Thomas Ehrhart, Andrea Frangi und René Steiger (Empa) unter Berücksichtigung der Inputs von Andrea Bernasconi (HEIG-VD) und Thomas Strahm.

Tab. 2: Übersicht der am Projekt beteiligten Institutionen und Personen.

	Institution	Person(en)
	ETH Zürich Institut für Baustatik und Konstruktion	Prof. Dr. Andrea Frangi (Projektleitung) Dr. Thomas Ehrhart (Co-Projektleitung)
	HEIG-VD Institut d'ingénierie du territoire (insit)	Prof. Dr. Andrea Bernasconi
	neue Holzbau AG	Thomas Strahm
	Empa Abteilung Ingenieur-Strukturen	Dr. René Steiger

2. Material

2.1. Untersuchte Holzarten und Produkte

Die im Projekt WHFF-CH 2020.11 untersuchten Laubholzarten wurden hinsichtlich (i) ihres Anteils am Schweizer Wald sowie (ii) hinsichtlich ihres Potentials für den Einsatz im konstruktiven Holzbau ausgewählt. Es handelt sich um die Holzarten Rotbuche (nachfolgend kurz „Buche“; *Fagus sylvatica* L.), Stieleiche (nachfolgend kurz „Eiche“; *Quercus robur* L.), Gemeine Esche (nachfolgend kurz „Esche“; *Fraxinus excelsior* L.) und Edelkastanie (nachfolgend kurz „Kastanie“; *Castanea sativa* Mill.). Details zum Anteil dieser Holzarten am Schweizer Wald sowie zur Holzanatomie sind den nachfolgenden Kapiteln zu entnehmen.

Da in der Schweiz zahlreiche Sägereien unterschiedlicher Grössen mit teils langer Tradition existieren, wurde der Schwerpunkt im Projekt WHFF-CH 2020.11 auf das Produkt Brett-schichtholz (BSH) gelegt. Folglich wurden BSH aus Buche (Abb. 2a), Eiche (Abb. 2b), Esche (Abb. 2c) und Kastanie (Abb. 2d) untersucht. Wegen seiner zunehmend wichtigen Rolle im Ingenieurholzbau wurde zudem Buchen Furnierschichtholz (FSH aus Buche) untersucht (Abb. 2e). Es handelt sich dabei um das Produkt «BauBuche» ohne Querlagen der Firma «Pollmeier» (GL 75) [19]. Als Referenzprodukt wurde BSH aus Fichte (GL 28h) untersucht (Abb. 2f).

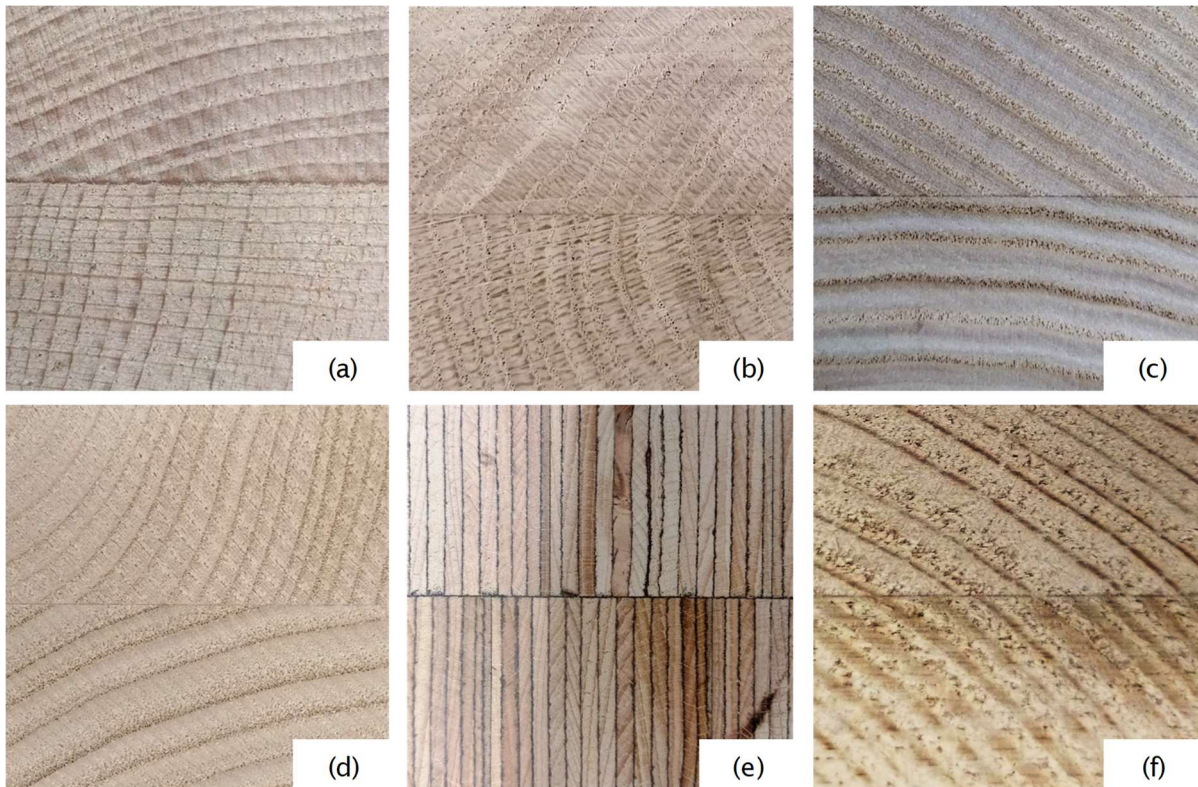


Abb. 2: Es wurde Brettschichtholz (BSH) aus Buche (a), Eiche (b), Esche (c) und Kastanie (d), sowie Furnierschichtholz aus Buche (e) untersucht. Als Referenzprodukt wurde BSH aus Fichte (f) untersucht.

2.1.1. Brettschichtholz (BSH) aus Buche (*Fagus sylvatica* L.)

Mit einem Anteil von 18.1% am Schweizerischen Gesamtbestand ist die Buche nach der Fichte (43.7%) die zweithäufigste Baumart. Ihr Anteil am heimischen Laubholzbestand beträgt 56.4%, was sie zur dominierenden Laubholzart in der Schweiz macht [1].

Hinsichtlich der Holz Anatomie ist die Buche den Zerstreutporern zuzuordnen, wobei die Jahrringgrenzen durch porenarme Zonen deutlich sichtbar sind. Besonders auffallend sind die grossen mehrreihigen Holzstrahlen, die Höhen von bis zu 4000 μm erreichen und auch mit blossen Auge deutlich sichtbar sind [20].

Buchenholz besitzt eine Dichte (ρ_{12}) von 540 bis 910 kg/m^3 , gilt als gut zu sägen und hobeln, neigt aber aufgrund des relativ starken Schwindens zum Reißen und Werfen, wenn die Trocknung nicht sorgfältig erfolgt. Das Holz der Buche ist nur gering dauerhaft und sollte ohne Vorbehandlung (gute Imprägnierbarkeit) keinesfalls direkt bewittert eingesetzt werden [20].

Das im Projekt WHFF-CH 2020.11 untersuchte BSH aus Buche wurde aus unbeschädigten Abschnitten von Biegeträgern gewonnen, die im AP-Holz Projekt „Brettschichtholz aus Buche“ [10] geprüft wurden. Es wurde von der neue Holzbau AG produziert. Die Lamellendicke betrug 25 mm. Es wurden die Festigkeitsklassen GL48h (Zug-Festigkeitsklasse der Bretter: T42), GL40h (T33) und GL32h (T26) geprüft. Die Sortierung erfolgte dabei wie in [21] beschrieben.

Die Tab. 3 gibt einen Überblick zur Anzahl der Prüfkörper je Holzart, Festigkeitsklasse und Klimatisierung. Das Vorgehen bei der Produktion der Prüfkörper und deren Zuteilung in die verschiedenen Klimakammern wird in den Kapiteln 2.2 und 2.3 näher beschrieben.

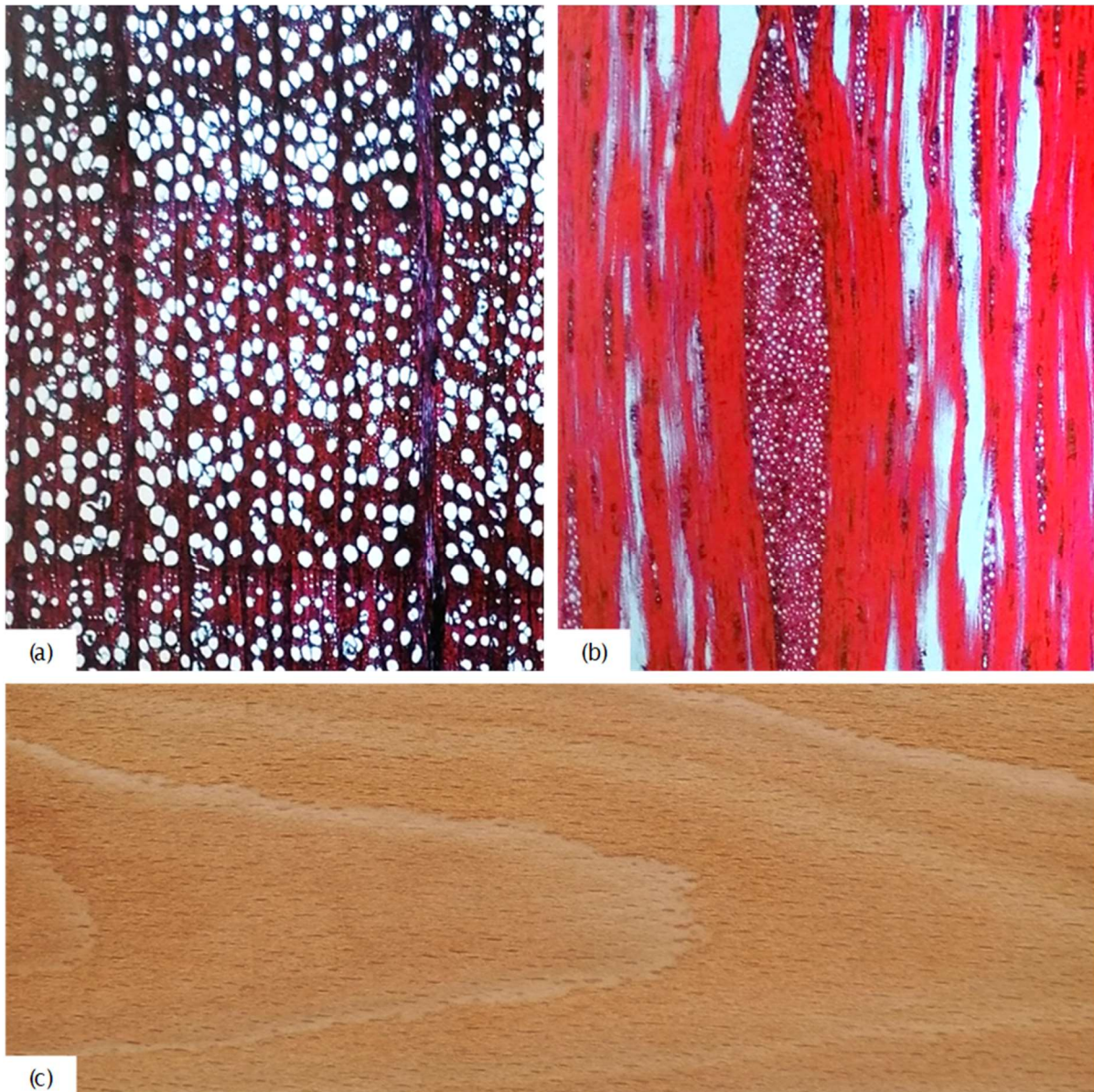


Abb. 3: Das Holz der Buche (*Fagus sylvatica* L): Mikroskopische Aufnahme eines Quer- (a) und Tangentialschnitts (b) sowie makroskopische Aufnahme eines Tangentialschnitts (c). Bildquelle: [20].

Tab. 3: Anzahl der Prüfkörper je Produkt und Klima (Lufttemperatur in °C | relative Luftfeuchte in %).

Holzart	Produkt	20°C 30%	20°C 50%	20°C 65%	20°C 75%	20°C 85%	20°C 95%
Buche	BSH GL 48h	4	4	8	4	-	4
	BSH GL 40h	8	8	14	6	-	8
	BSH GL 32h	14	14	20	6	-	14
Esche	BSH GL 48h	6	6	6	-	-	6
	BSH GL 40h	6	6	6	-	-	6
Kastanie	BSH GL 24h	11	11	11	-	-	11
Eiche	BSH GL ?	6	6	6	-	-	6
Buche	FSH GL 75	6	6	6	-	-	6
Fichte	BSH GL 28h	6	6	6	-	6	-

2.1.2. Brettschichtholz (BSH) aus Eiche (*Quercus robur* L.)

Der Anteil der Eiche am Schweizerischen Gesamt-Holzvorrat beträgt 1.9%. Nach der Buche, Esche und dem Ahorn ist die Eiche die vierthäufigste Laubholzart in der Schweiz [1]. Insbesondere in Frankreich und auf der iberischen Halbinsel zählt Eiche zu den wichtigsten Laubholzarten, europaweit ist sie die zweitwichtigste Laubholzart [20].

Hinsichtlich der Holzanatomie ist die Eiche den Ringporern zuzuordnen. Die Jahrringgrenzen, Frühholzporen und die Holzstrahlen sind mit bloßem Auge sichtbar. Eichenholz besitzt eine Dichte (ρ_{12}) von 430 bis 960 kg/m³. Es gilt als manuell und maschinell gut zu bearbeiten. Bei der Trocknung zeigt es eine Neigung zum Reißen und Werfen, weshalb die Trocknung langsam und bei geringen Temperaturen erfolgen sollte [20].

Die Aufnahme von BSH aus Eiche in das Projekt erfolgte als Auflage der Gutachter seitens des WHFF-CH. Das Eichen-BSH wurde von der neuen Holzbau AG hergestellt – mangels Erfahrung und Normierung ohne eine spezielle Sortierung der Bretter. Die Lamellendicke betrug 30 mm.

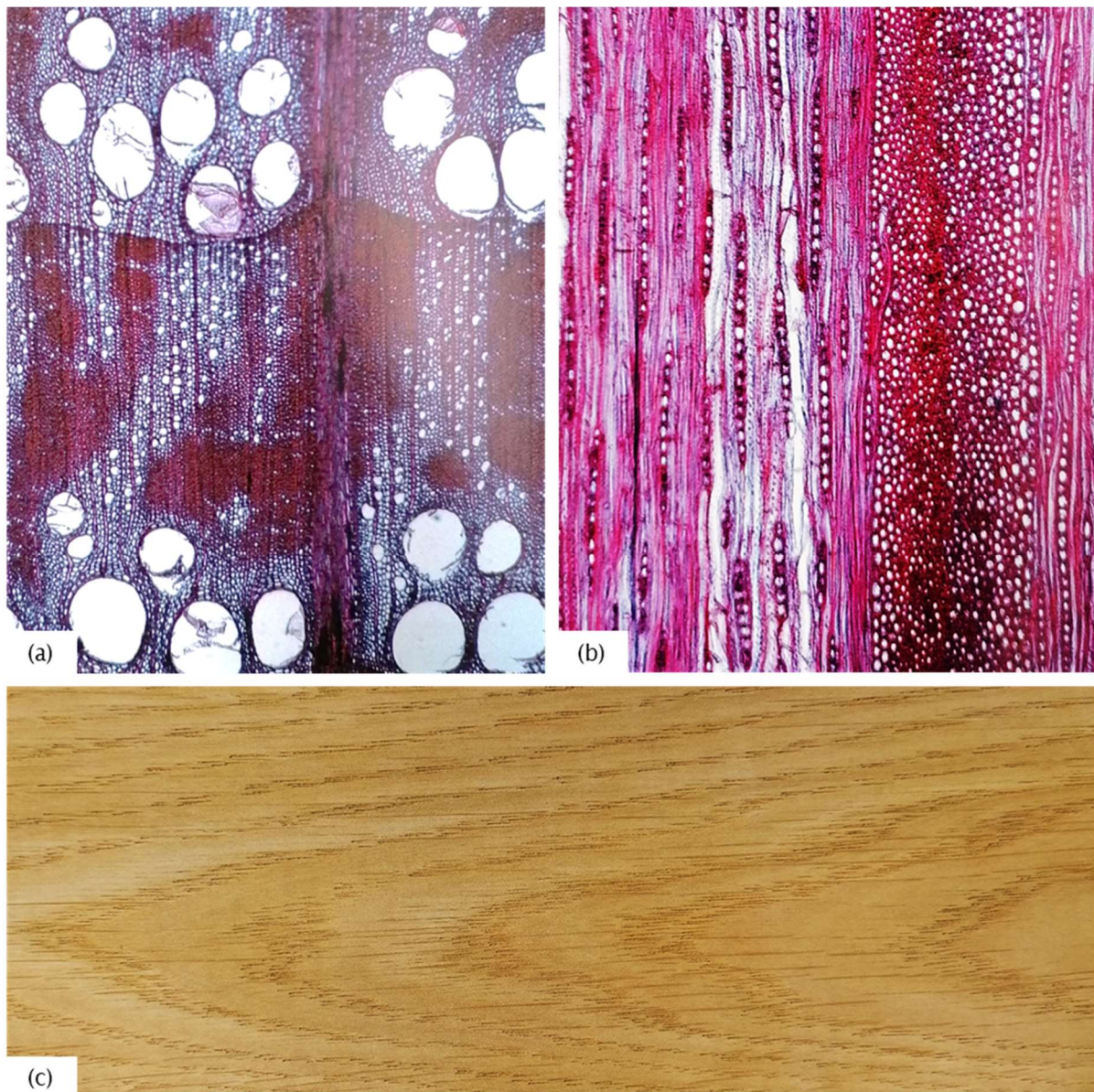


Abb. 4: Das Holz der Eiche (*Quercus robur* L.): Mikroskopische Aufnahme eines Quer- (a) und Tangentialschnitts (b) sowie makroskopische Aufnahme eines Tangentialschnitts (c). Bildquelle: [20].

2.1.3. Brettschichtholz (BSH) aus Esche (*Fraxinus excelsior* L.)

Der Anteil der Esche am Schweizerischen Gesamtvorrat beträgt 4.1%. Damit ist die Esche nach der Buche (18.1%) die zweithäufigste Laubholzart. Ihr Anteil am heimischen Laubholzvorrat beträgt 12.8% [1].

Hinsichtlich der Holzanatomie ist die Esche den Ringporern zuzuordnen. Die Jahrringgrenzen, Frühholzgefässe und das Längsparenchym sind, ebenso wie die Holzstrahlen, mit blosssem Auge sichtbar [20]. Eschenholz besitzt eine Dichte (ρ_{12}) von 450 bis 860 kg/m³ und gilt als manuell und maschinell gut zu bearbeiten. Wegen des vergleichsweise geringen Schwindmasses ist i.d.R. auch die Trocknung unproblematisch. Das Holz der Esche gilt, ebenso wie jenes der Buche, als nur gering dauerhaft (mässige bis schlechte Imprägnierbarkeit) und sollte nicht direkt bewittert eingesetzt werden [20].

Das BSH aus Esche wurde von der neuen Holzbau AG in den Festigkeitsklassen GL 48h und GL 40h, gemäss internen Sortierregeln, hergestellt. Die Lamellendicke betrug 30 mm.

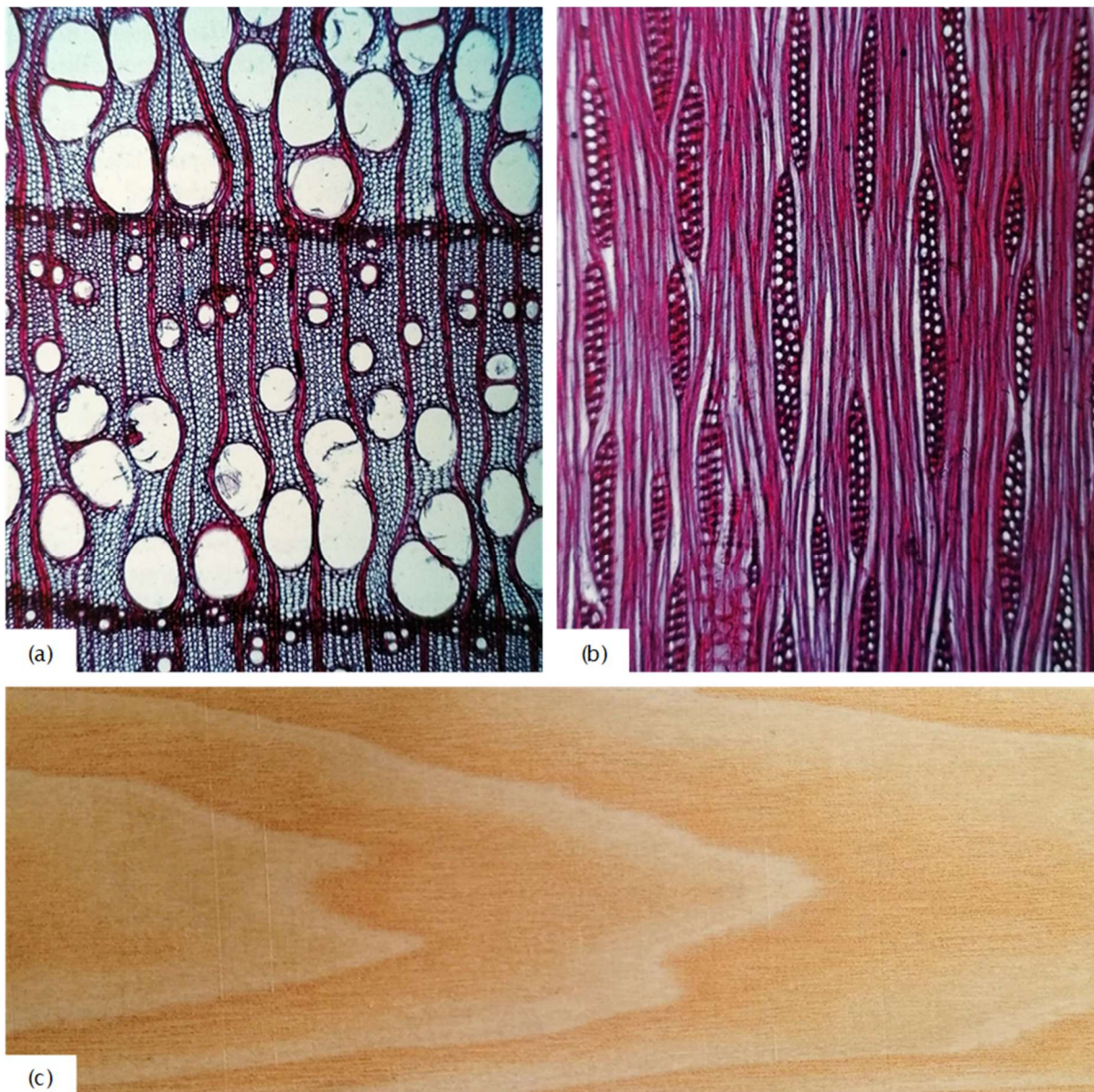


Abb. 5: Das Holz der Esche (*Fraxinus excelsior* L.): Mikroskopische Aufnahme eines Quer- (a) und Tangentialschnitts (b) sowie makroskopische Aufnahme eines Tangentialschnitts (c). Bildquelle: [20].

2.1.4. Brettschichtholz (BSH) aus Kastanie (*Castanea sativa* Mill.)

Der Anteil der Kastanie am Schweizerischen Gesamtvorrat beträgt 1.3%. Nach der Buche (18.1%), Esche (4.1%), Ahorn (3.1%) und Eiche (1.9%), ist die Kastanie damit die fünfhäufigste Laubholzart in der Schweiz [1]. In der Schweiz wächst sie, oft in grossen Reinbeständen, zu 98% auf der Alpensüdseite, wo ihr Anteil am Gesamtvorrat über 14% beträgt [1].

Hinsichtlich der Holzanatomie ist die Kastanie den Ringporern zuzuordnen. Die Jahrringgrenzen und Frühholzgefässe sind mit blossen Auge sichtbar, die Holzstrahlen sind erst unter der Lupe erkennbar [20]. Das Holz der Kastanie besitzt eine Dichte (ρ_{12}) von 590 bis 680 kg/m³ und gilt als sehr gut zu sägen, hobeln und bohren. Die Trocknung ist i.d.R. unproblematisch. Kastanienholz ist im Vergleich zu Buche und Esche dauerhafter, das Kernholz gilt als weitgehend pilz- und insektenresistent [20].

Details zum von der Filippi SA (Airolo, TI) produzierten BSH aus Kastanie sind in [22] ersichtlich. Die Lamellendicke betrug 40 mm.

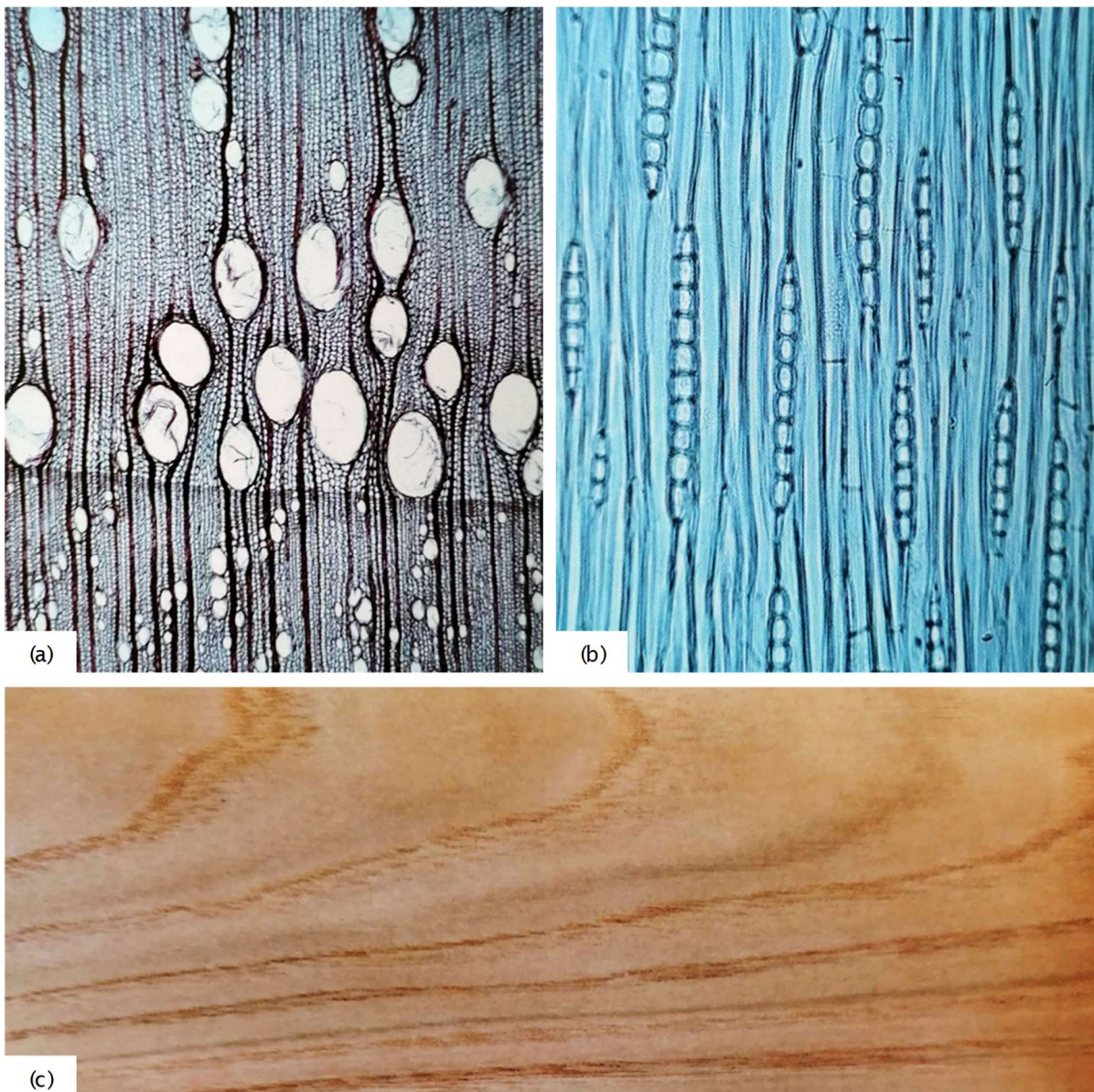


Abb. 6: Das Holz der Kastanie (*Castanea sativa* Mill.): Mikroskopische Aufnahme eines Quer- (a) und Tangentialschnitts (b) sowie makroskopische Aufnahme eines Tangentialschnitts (c). Bildquelle: [20].

2.1.5. Brettschichtholz (BSH) aus Fichte (*Picea abies* (L.) H.Karst.)

Der Anteil der Fichte am Schweizerischen Gesamtvorrat beträgt 43.7%. Die Fichte ist damit die mit Abstand häufigste Baumart der Schweiz und wird als Brotbaum der Holzindustrie bezeichnet [1].

Das Holz der Fichte besitzt eine Dichte (ρ_{12}) von 330 bis 680 kg/m³. Es ist einfach zu sägen, hobeln fräsen, schälen und zu nageln, allerdings schwer imprägnierbar. Die Trocknung ist i.d.R. unproblematisch mit einer geringen Neigung zum Reißen und Werfen [20].

BSH aus Fichte wurde als Referenzprodukt in dieser Untersuchung berücksichtigt, da zahlreiche Studien zu diesem Material verfügbar sind und auch die Europäische Normierung im Wesentlichen auf diese Holzart abzielt.

Das BSH aus Fichte wurde von der neuen Holzbau AG in der Festigkeitsklasse GL 28h gemäss EN 14080 [23] hergestellt. Die Lamellendicke betrug 30 mm.

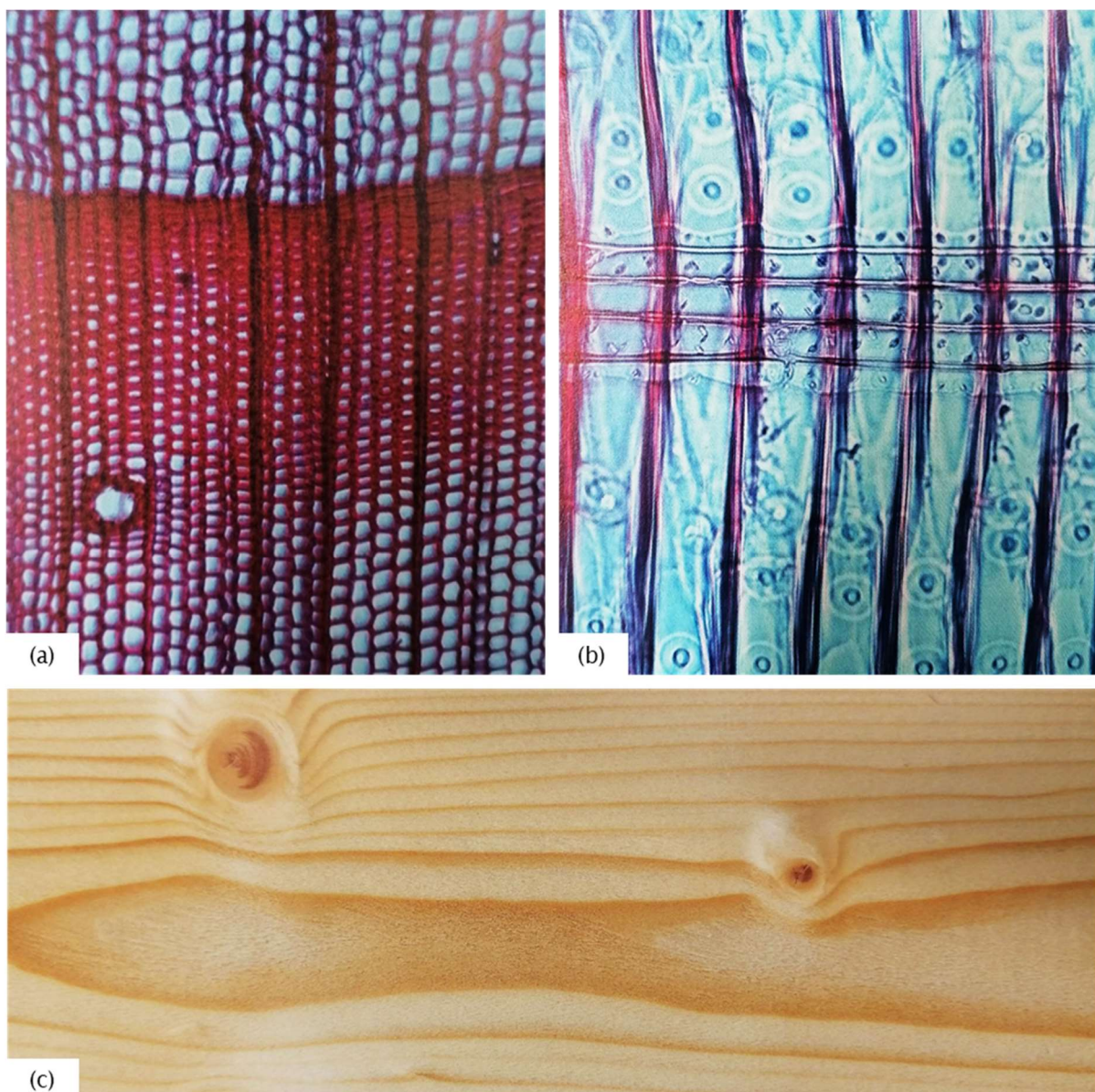


Abb. 7: Das Holz der Fichte (*Picea abies* (L.) H.Karst.): Mikroskopische Aufnahme eines Quer- (a) und Tangentialschnitts (b) sowie makroskopische Aufnahme eines Tangentialschnitts (c). Bildquelle: [20].

2.1.6. Furnierschichtholz (FSH) aus Buche

Wegen seiner zunehmenden Relevanz in der Baupraxis, wurde als weiteres Laubholzprodukt FSH aus Buche untersucht. Es handelt sich dabei um das von der Firma Pollmeier hergestellte Produkt «BauBuche» des Typs «GL 75» (FSH ohne Querlagen) [19].

2.2. Produktion der Prüfkörper

Ziel der vorliegenden Studie war es, den Einfluss der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit und den Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung zu ermitteln. Um den Einfluss anderer Parameter als der Holzfeuchte – etwa der Rohdichte, der Jahrringdichte oder der Stammlage – möglichst auszuschliessen, wurde folgendes Vorgehen bei der Produktion der Prüfkörper gewählt:

1. Zunächst wurden BSH Rohlinge mit einer Länge von 1100 mm und Querschnittsabmessungen von 160 mm × 90 mm produziert (Abb. 9a). Diese Abmessungen wurden gewählt, da aus dem AP-Holz Projekt zu BSH aus Buche [10] zahlreiche unbeschädigte Abschnitte von Biegeträgern mit kombinierten Aufbauten mit einer Breite von 160 mm und einer Höhe von 400 mm vorhanden waren (Abb. 8a). Daraus liessen sich homogene BSH Rohlinge mit einer Breite von 160 mm und einer Höhe von 90 mm gewinnen. Bei den Buchen FSH Rohlingen handelte es sich um rund 2000 mm lange Pfosten mit einem Querschnitt von 80 mm × 80 mm.
2. Die Kastanien BSH Rohlinge wurden von der HEIG-VD geliefert. Die Eichen, Eschen und Fichten BSH Rohlinge wurden von der neuen Holzbau AG produziert und geliefert.
3. In weiterer Folge wurden die Rohlinge an der ETH Zürich zunächst mit einer Kreissäge mit einem Längsschnitt geteilt, wodurch sich die finalen Querschnittsabmessungen von 78 mm × 90 mm ergaben (Abb. 9b; Sägeblattbreite 4 mm). Anschliessend wurden die beiden Pfosten in der Länge halbiert und auf die finale Länge von 468 mm (= 6 × 78 mm = Prüflänge gemäss EN 408 [24]) geschnitten.
4. Die aus einem BSH Rohling resultierenden «Vierlinge» weisen eine nahezu identische Rohdichte, Jahrringweite und Stammlage auf und unterscheiden sich auch in weiteren Aspekten kaum. Durch die Zuteilung der Vierlinge in jeweils unterschiedliche Klimas (Abb. 10a) konnte somit der Einfluss der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit und den Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung isoliert untersucht werden.
5. Die bei der Produktion angefallenen Restabschnitte (Abb. 10b) jedes BSH und FSH Rohlings wurden zur Ermittlung der Holzfeuchte beim Zuschnitt (= Startfeuchte) verwendet. In Tab. 4 sind die mit der Darrofenmethode gemäss EN 13183-1 [25] (siehe Abschnitt 3.2) ermittelten Holzfeuchten zum Zeitpunkt des Zuschnittes zusammengefasst.

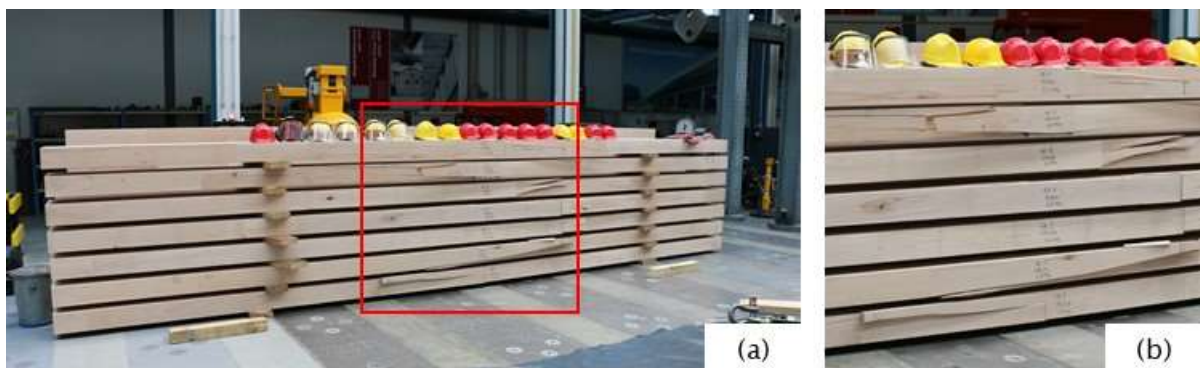


Abb. 8: Buchen BSH Prüfkörper mit den Abmessungen $L \times B \times H = 7600 \times 160 \times 400 \text{ mm}^3$ nach erfolgter 4-Punkt Biegeprüfung an der Empa Dübendorf (a). Da sich die Beschädigungen durch das Biegeversagen nahezu ausschliesslich auf das mittlere Drittel der Prüfkörperlänge beschränkten (b), konnten die Randbereiche für weitere Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses der Holzfeuchte auf die Druckeigenschaften verwendet werden.

Tab. 4: Mittlere Holzfeuchte der BSH und FSH Rohlinge zum Zeitpunkt des Zuschnittes (u_{start}) vor der Zuführung zur jeweiligen Klimatisierung. Für die Buchen BSH Rohlinge wurde dieser Wert nicht ermittelt. Aufgrund der Lagerung in der Bauhalle der ETH Zürich wird hier von einer Start-Holzfeuchte beim Zuschnitt von rund 9% ausgegangen.

Holzfeuchte u_{start}	Eiche BSH	Esche BSH	Kastanie BSH	Fichte BSH	Buche FSH
Mittelwert	9.3%	9.3%	9.6%	10.8%	6.7%



(a)



(b)

Abb. 9: Angelieferte BSH-Rohlinge mit den Abmessungen $1100 \times 160 \times 90 \text{ mm}^3$ (a). Jeder Rohling wurde sowohl in der Länge als auch in der Breite geteilt, um Prüfkörper mit den Abmessungen $468 \times 78 \times 90 \text{ mm}^3$ zu erhalten (b).



(a)



(b)

Abb. 10: Zugeschnittene, beschriftete und nach den zugeordneten Klimabereichen gruppierte BSH Prüfkörper (hier Kastanie) mit den Abmessungen $468 \times 78 \times 90 \text{ mm}^3$ (a). Die beim Zuschnitt anfallenden Restabschnitte (b) wurden zur Bestimmung der Holzfeuchte bei der Anlieferung mit dem Darrverfahren nach EN 13183-1 [25] verwendet.

2.3. Klimatisierung der Prüfkörper

Nach dem Zuschnitt, der Beschriftung und der Ausmessung der Prüfkörper erfolgte deren Klimatisierung in Klimäräumen bzw. Klimaschränken des Instituts für Baustoffe an der ETH Zürich. Ziel der Untersuchungen war es, ein möglichst breites Spektrum an verschiedenen Feuchtebereichen abzudecken, um den Einfluss der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit und den Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung untersuchen zu können.

Als trockenstes Klima (1F) wurde eine Lufttemperatur von 20°C und eine relative Luftfeuchte von 30% (20°C/30%) angestrebt und mithilfe eines Klimaschranks realisiert (Abb. 11a). Als zweites Klima (2F) wurde 20°C/50% angestrebt, wobei die Schwankungen der Luftfeuchte in diesem Raum rund $\pm 5\%$ betrugen (Abb. 11b).

Das «Normklima» 20°C/65% (3F) wurde durch die Lagerung in einem aktiv klimatisierten Laborraum erreicht (Abb. 11c). Als viertes Klima (4F) wurde für BSH aus Esche und Fichte 20°C/85% (Abb. 11d) untersucht. Wegen der späteren Lieferung der Prüfkörper, der Auslastung der Klimaschränke und des angestrebten Abschlusstermins des Projektes musste für BSH aus Eiche und Kastanie sowie für FSH und BSH aus Buche als viertes Klima 20°C/95% vorgesehen werden. Aufgrund der zahlreichen verfügbaren Prüfkörper wurden zusätzliche Buchen BSH Prüfkörper im Klima 20°C/75% gelagert (5F).

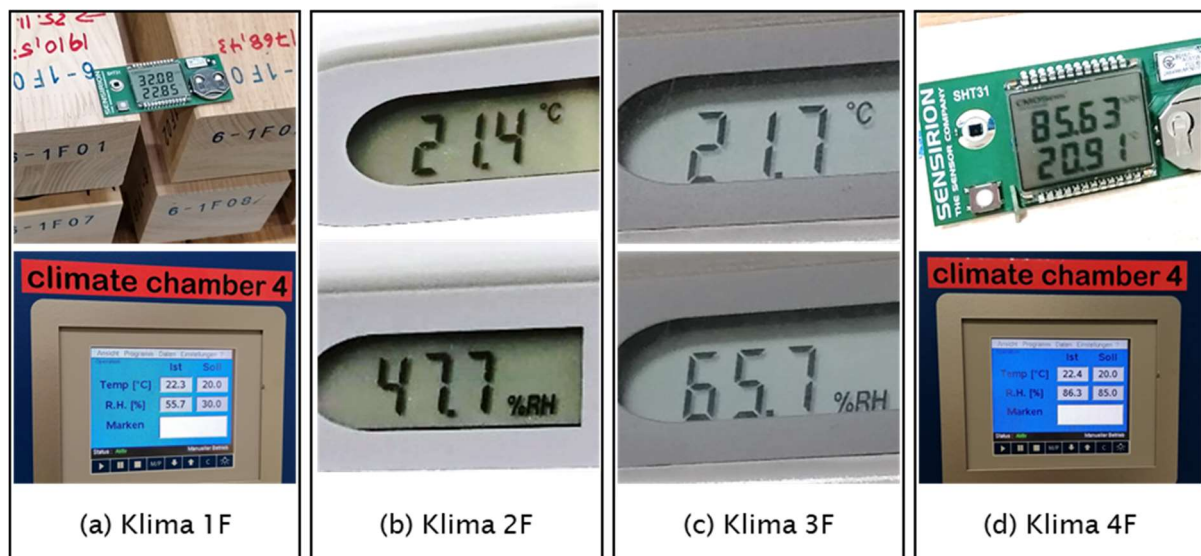


Abb. 11: Um die angestrebten Holzfeuchten zu erreichen wurden die Prüfkörper vor den Prüfungen in Klimatas («F») von rund 20°C/30% r.F. = «1F» (a), 20°C/50% r.F. = «2F» (b), 20°C/65% r.F. = «3F» (c) und 20°C/85% r.F. = «4F» (d) vorkonditioniert. BSH aus Buche wurde zusätzlich im Klima 20°C/75% r.F. = «5F» vorkonditioniert.

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass das Hauptziel der Untersuchungen nicht die Feststellung der Ausgleichsfeuchten für bestimmte klimatische Bedingungen war. Dies lässt sich anhand von Kleinstproben wesentlich einfacher und genauer untersuchen.

Da die Holzfeuchte eines jeden Prüfkörpers mit dem Darrverfahren nach EN 13813-1 [25] ermittelt wurde und Funktionen zur Beschreibung der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit der Holzfeuchte entwickelt werden sollten, lassen sich für bestimmte Feuchteklassen bzw. Nutzungsklassen – und die damit verbundenen Holzfeuchten – später Werte für die zugehörigen Druckeigenschaften auf einfache Weise berechnen.

3. Methoden

Die Bestimmung der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung erfolgte gemäss EN 408 [24]. Alle Prüfkörper besaßen den vollen Prüfquerschnitt und die 6-fache Länge ihres kleineren Querschnittsmasses.

3.1. Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung

3.1.1. Prüfaufbau

Für die Druckprüfungen wurde eine Universalprüfmaschine vom Typ «Schenck 1600» mit einer Maximalkraft von 1600 kN verwendet (Abb. 12a). Der Prüfkörper wurde zentrisch in der Kraftachse platziert (Abb. 12b). Eine obenliegende Kugelkalotte wurde zunächst offen belassen, um eine Einleitung der Druckkraft ohne Biegebelastung sicherzustellen. Nach dem Erreichen einer Anfangskraft von rund 8 kN wurde die Kugelkalotte gesperrt und die Prüfung fortgesetzt.



Abb. 12: Zur Bestimmung der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung genutzte Prüfmaschine «Schenck 1600». Die Prüfungen wurden weggesteuert mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von 0.02 mm/s durchgeführt.

3.1.2. Messtechnik

Die Bestimmung der maximalen Prüfkraft und in weiterer Folge der Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung erfolgte mit einer in die Prüfmaschine integrierten Kraftmessdose, welche regelmässig überprüft und kalibriert wird.

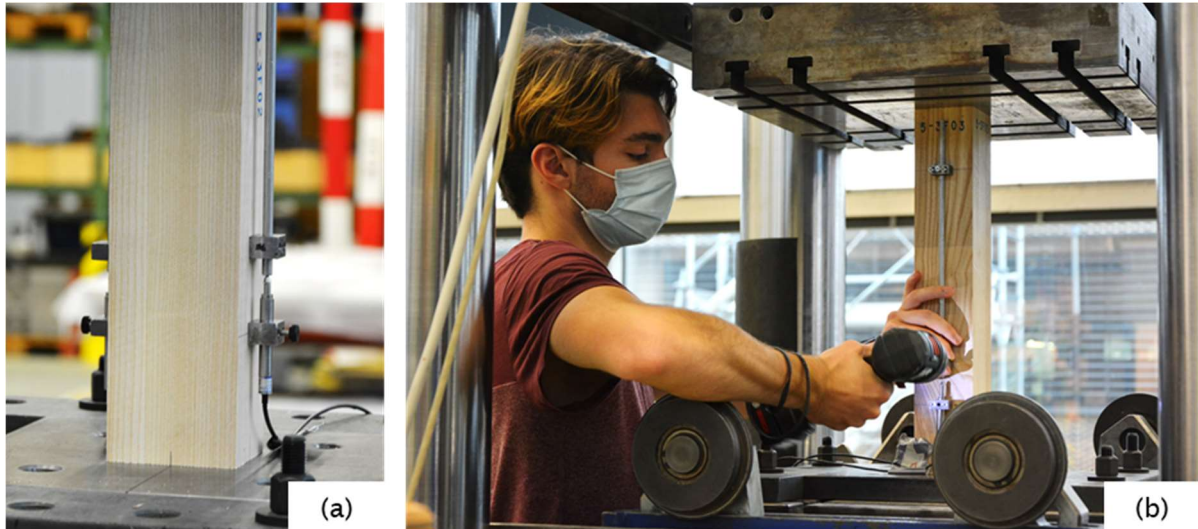


Abb. 13: Zur Bestimmung des Druck-Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung $E_{c,0}$ wurden induktive Wegsensoren (LVDTs) beidseitig am Prüfkörper montiert (Messlänge = $6 \times b$) (a). Bei 50% der geschätzten Höchstlast F_{max} wurden die Sensoren und das Messgestänge demontiert (b).

Zur Bestimmung der Stauchungen im Prüfkörper und in weiterer Folge des Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung, wurden auf zwei gegenüberliegenden Seiten induktive Wegsensoren (LVDTs) montiert (Abb. 13a). Die Länge der Messbasis entsprach dabei jeweils (rund) der 4-fachen Länge der kleineren (nominellen) Querschnittsabmessung.

Bei sämtlichen BSH Prüfkörpern betrug die Länge der Messbasis 300 mm ($\approx 4 \times 78 \text{ mm} = 312 \text{ mm}$), bei den Buchen FSH Prüfkörpern war die Länge der Messbasis 320 mm ($= 4 \times 80 \text{ mm}$).

Die induktiven Wegsensoren wurden während der sich über mehrere Monate erstreckenden Prüfkampagne (insgesamt 300 Prüfkörper) regelmässig überprüft und gegebenenfalls neu kalibriert. Ein stetiger Abgleich zwischen den gemessenen Verformungen auf beiden Seiten erlaubte zudem, mögliche Unstimmigkeiten unmittelbar zu erkennen.

3.1.3. Prüfablauf und Ermittlung der mechanischen Eigenschaften

Die Prüfkörper wurden bis unmittelbar vor der Durchführung der Druckprüfungen im jeweiligen Klima gelagert. Die Masse der Prüfkörper, sowie die tatsächlichen Querschnittsabmessungen (a_{ist} und b_{ist}) zum Zeitpunkt der Prüfung wurden mit einer Waage (Skalenteilungswert: 0.1 g) und einer digitalen Schiebelehre (Skalenteilungswert: 0.01 mm) ermittelt.

Die Druckprüfungen wurden weggesteuert mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von 0.02 mm/s durchgeführt. Dabei wurde in die folgenden Phasen unterschieden:

1. **Aufbringung der Anfangskraft:** Um eine zentrische Belastung ohne Biegemomente sicherzustellen, wurde die obenliegende Kugelkalotte zunächst bis zu einer Anfangskraft von rund 8 kN offen belassen und dann gesperrt.
2. **Steigerung der Prüfkraft bis auf 60% der geschätzten Maximalkraft:** Nach Überschreiten der Anfangskraft wurde die Prüfkraft (bei gesperrter Kugelkalotte) mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von 0.02 mm/s erhöht, bis eine Kraft von rund 60% der geschätzten Maximalkraft erreicht wurde. Damit sollte sichergestellt werden, dass der Messbereich zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls (Vorgabe gemäss EN 408 [24]: 10 bis 40% der maximalen Prüfkraft) abgedeckt werden kann. Nach Erreichen dieser Kraftstufe wurden die induktiven Wegsensoren abmontiert (Abb. 13b), um deren Beschädigung beim Versagenseintritt zu vermeiden.

3. **Steigerung der Prüfkraft bis zum Versagen bzw. bis zu einem Lastabfall um mindestens 20%:** Nachdem die Wegsensoren entfernt worden waren, wurde die Prüfkraft mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von 0.02 mm/s erhöht. Da vor allem bei Prüfungen mit höheren Holzfeuchten ein ausgeprägtes duktileres Versagensverhalten beobachtet wurde, wurde als Versuchsabbruchkriterium ein Abfallen der Prüfkraft um zumindest 20% definiert.

Die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung ($f_{c,0}$) wurde mit Gleichung 1 auf Basis der maximalen Prüfkraft ($F_{\max}$) und der tatsächlichen Querschnittsabmessungen zum Zeitpunkt der Prüfung (a_{test} und b_{test}) berechnet.

$$f_{c,0} = \frac{F_{\max}}{a_{\text{test}} \cdot b_{\text{test}}} \quad (1)$$

Die Bestimmung des Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung ($E_{c,0}$) erfolgte durch eine lineare Regressionsanalyse der Spannungs-Dehnungs-Wertepaare, wobei die Dehnungen auf Basis der gemittelten Verformungen an den zwei gegenüberliegenden Seiten berechnet wurden. Der Bereich, der zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung herangezogen wurde, entsprach 10 bis 40% der mittleren Maximalkraft je Serie (Tab. 5). Der Korrelationskoeffizient sämtlicher Regressionsanalysen überstieg den in der EN 408 [24] geforderten Wert von 0.99 [-].

Tab. 5: Zur Ermittlung des Druck-Elastizitätsmodul parallel zur Faser ($E_{c,0}$) herangezogener Prüfkraftbereich (in kN) je Laubholzprodukt und Feuchtebereich.

Produkt		1F	2F	3F	4F	5F
BSH aus Buche	GL 48h	48→192	43→172	39→156	27→109	32→129
	GL 40h	48→190	42→167	38→153	26→106	31→124
	GL 32h	42→169	39→156	33→132	25→98	29→114
BSH aus Esche	GL 48h	46→184	42→168	39→156	31→122	-
	GL 40h	43→172	40→158	36→144	28→110	-
BSH aus Eiche	GL ?	38→151	38→151	36→142	27→107	-
BSH aus Kastanie	GL 24h	33→132	35→141	30→121	24→96	-
BSH aus Fichte	GL 28h	33→130	30→121	28→113	22→86	-
FSH aus Buche	GL 75	52→206	47→187	41→164	25→100	-

Die Rohdichte zum Zeitpunkt der Prüfungen (ρ_{test}) wurde mit Gleichung 2 auf Basis der Prüfkörpermasse (M_{test}) und der tatsächlichen Prüfkörperabmessungen zum Zeitpunkt der Prüfung (a_{test} , b_{test} und l_{test}) berechnet.

$$\rho_{\text{test}} = \frac{M_{\text{test}}}{a_{\text{test}} \cdot b_{\text{test}} \cdot l_{\text{test}}} \quad (2)$$

3.2. Bestimmung der Holzfeuchte

Die Bestimmung der Holzfeuchte erfolgte gemäss EN 13183-1 [25] mit dem Darrverfahren. Dazu wurde jedem Prüfkörper unmittelbar nach erfolgter Durchführung der Druckprüfungen in Längsrichtung mittig ein Abschnitt mit einer Länge von rund 50 mm entnommen, der den gesamten Querschnitt des Prüfkörpers umfasste (Abb. 14a). Alle Darrproben waren frei von lokalen Holzmerkmalen wie Rinde, Äste und Harzgallen. Die Masse der mit einem Schleifpapier von Spänen befreiten Darrproben wurde anschliessend mit einer Waage mit einer Genauigkeit von 0.01 g ermittelt und dokumentiert.

Ein Trockenschrank mit freier interner Luftzirkulation und einer Temperatur von 103°C wurde zur Trocknung der Darrproben verwendet (Abb. 14b). Durch zwei Wägevorgänge im Abstand von mindestens 2 Stunden wurde nach etwa 5 – 7 Tagen Lagerung im Trockenschrank sichergestellt, dass die Darrproben den darrtrockenen Zustand erreicht hatten. Der ermittelte Masseunterschied lag dabei jeweils deutlich unter dem gemäss EN 13183-1 [25] zulässigen Unterschied von bis zu 0.1%.

Die Holzfeuchte u (= Feuchtegehalt als Massenteil in Prozent) wurde anschliessend mit Gleichung 3 anhand der Probenmasse in Gramm vor dem Trocknen (m_1) und der Probenmasse in Gramm im darrtrockenen Zustand (m_0) ermittelt (Abb. 14b).

$$u = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (3)$$

Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben wurde die Masse sämtlicher Prüfkörper auch unmittelbar nach dem Zuschnitt, also vor der Klimatisierung in den verschiedenen Klimakammern, ermittelt (M_{start}). Da auch die Holzfeuchte der Prüfkörper zu diesem Zeitpunkt anhand von anfallenden Restabschnitten bestimmt wurde (u_{start}), konnte für jeden Prüfkörper die theoretische darrtrockene Masse (M_0) mit Gleichung 4 ermittelt werden.

$$M_0 = \frac{M_{\text{start}} \cdot 100}{u_{\text{start}} + 100} \quad (4)$$

Mit der theoretischen darrtrockenen Masse (M_0) konnte in weiterer Folge zu jedem Zeitpunkt der Klimalagerung die aktuelle Holzfeuchte (u_{test}) anhand der aktuellen Prüfkörpermasse (M_{test}) mit Gleichung 5 abgeschätzt werden.

$$u_{\text{test}} = \frac{M_{\text{test}} - M_0}{M_0} \cdot 100 \quad (5)$$

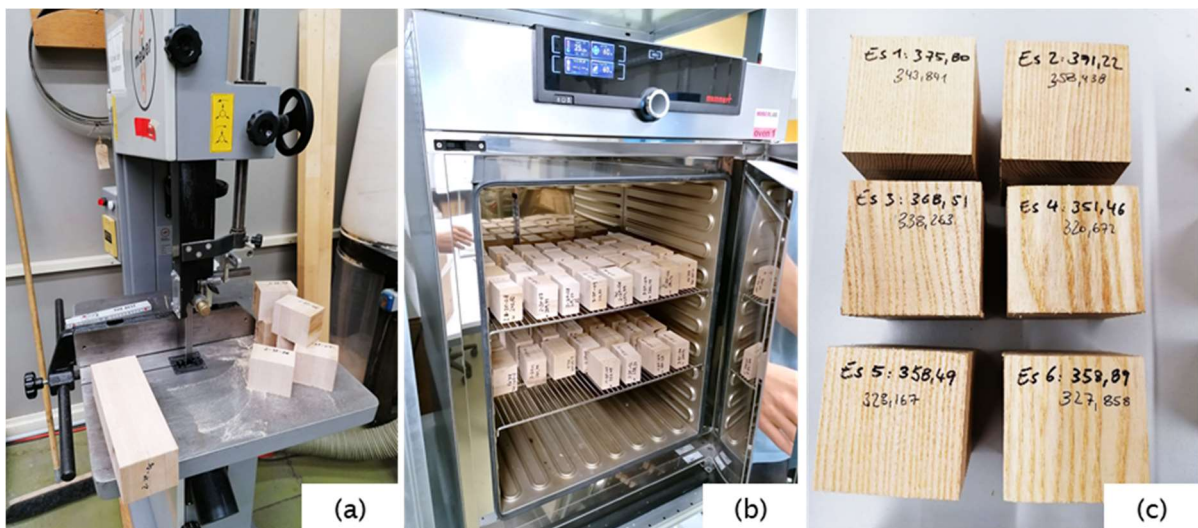


Abb. 14: Im Anschluss an die Druckprüfung erfolgte der Zuschnitt der Proben zur Bestimmung der Holzfeuchte (a). Die Abmessung und Position der Proben im Prüfkörper folgte den Bestimmungen der EN 13183-1 [25]. Zur Trocknung wurde ein Darrofen mit einer Zieltemperatur von 103°C genutzt (b). Aus dem Masseverlust bei der Trocknung konnte die Holzfeuchte bestimmt werden (c).

4. Ergebnisse

4.1. Überprüfung des «Vierlings-Ansatz»

Um den Einfluss der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit und den Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung möglichst isoliert betrachten zu können, wurde der in Abschnitt 2.2 näher beschriebene «Vierlings-Ansatz» gewählt.

Wie in Tab. 6 ersichtlich, konnte durch dieses Vorgehen sichergestellt werden, dass die mittlere Rohdichte der einzelnen Holzarten bzw. Festigkeitsklassen über alle Klimabereiche nahezu konstant war. Die Abweichungen betrugen jeweils maximal 3%.

Tab. 6: Mittlere Rohdichte (in kg/m³) nach dem Zuschnitt der Prüfkörper und vor der Klimatisierung. Eine möglichst einheitliche Rohdichte in den unterschiedlichen Klimabereichen (1F - 5F) (bei noch identer Holzfeuchte) wurde mit dem «Vierlings-Ansatz» angestrebt, um den Einfluss der Holzfeuchte isoliert betrachten zu können.

Holzart	Serie	1F	2F	3F	4F	5F
Buche	GL 48h	686	683	687	693	694
	GL 40h	686	677	681	665	674
	GL 32h	667	669	669	670	665
Esche	GL 48h	689	687	672	685	-
	GL 40h	645	643	645	642	-
Eiche	GL ?	691	686	687	693	-
Kastanie	GL 24h	558	545	548	547	-
Fichte	GL 28h	439	443	438	436	-
BauBuche	GL 75	805	805	804	804	-

4.2. Bruchverhalten in Abhängigkeit der Holzfeuchte

Im Folgenden werden für die Produkte BSH aus Buche, Eiche, Esche, Fichte und Kastanie sowie für FSH aus Buche jeweils exemplarisch typische Kraft-Verformungsverhalten bei verschiedenen Holzfeuchtebereichen (u) dargestellt und diskutiert.

Da das Messsystem zur Bestimmung der Verformungen und in weiterer Folge zur Ermittlung des Druck-Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung bei einem Kraftniveau von 60% der geschätzten Maximalkraft entfernt wurde (um eine mögliche Beschädigung zu vermeiden), stand für diese Darstellung lediglich der Maschinenweg zur Verfügung. Die in den Abb. 15ff dargestellten Kraft-Verformungsverläufe beinhalten deshalb auch zunächst die Phase des Kontaktfahrens (rot hinterlegt in Abb. 15) und die Phase des Überwindens des Maschinenschlupf (blau hinterlegt in Abb. 15; bis rund 10 kN dominierender Weganteil).

Bei den (vier) dargestellten Kurven handelt es sich jeweils um Prüfkörper, die aus demselben BSH bzw. FSH Rohling gewonnen wurden und deshalb hinsichtlich Start-Rohdichte, Jahrringweite und sonstiger Eigenschaften sehr ähnlich sind. Damit kann der Einfluss der Holzfeuchte isoliert betrachtet werden (siehe Abschnitte 2.2 und 4.1).

Generell konnte beobachtet werden, dass die maximal erreichbare Prüfkraft mit zunehmender Holzfeuchte abnahm (mehr dazu in Abschnitt 4.3). Eine Ausnahme bildeten hier die BSH Prüfkörper aus Eiche und Kastanie, wo für die Feuchtebereiche «1F» und «2F» nahezu idente maximale Prüfkraften erreicht wurden. Umgekehrt stieg die Duktilität des Versagens mit zunehmender Holzfeuchte.

4.2.1. BSH aus Buche

In Abb. 15 ist das Kraft-Verformungsverhalten von Prüfkörpern aus Buchen BSH der Festigkeitsklasse GL 48h dargestellt. Es handelt sich um jene «Vierlinge», die aus dem Rohling Nr. 3 hergestellt wurden und deshalb sehr ähnliche Start-Dichten (bei noch identer Holzfeuchte), Jahrringweiten und Jahrringlagen aufwiesen (siehe auch Abschnitte 2.2 und 4.1).

Es ist deutlich ersichtlich, dass die maximale Prüfkraft $F_{\max,u}$ – und damit die Druckfestigkeit $f_{c,0,u}$ – mit zunehmender Holzfeuchte u kontinuierlich abnimmt. Für die Feuchtebereiche «1F» (hier: $u = 8.3\%$), «2F» ($u = 9.4\%$), «3F» ($u = 10.4\%$) und «4F» ($u = 17.3\%$) sank die maximale Prüfkraft von 497 kN auf 455, 401 bzw. 290 kN. Eine ausführlichere Diskussion des Einflusses der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung folgt in Abschnitt 4.3.

Generell nahm für BSH aus Buche die Duktilität mit zunehmender Holzfeuchte zu. In einigen wenigen Prüfkörpern des trockensten Feuchtebereiches «1F» kam es, nachdem sich zunächst lokale Druckfalten ausgebildet hatten, zu einem Aufspalten des Prüfkörpers, welches mit einem signifikanten und plötzlichen Kraftabfall verbunden war.

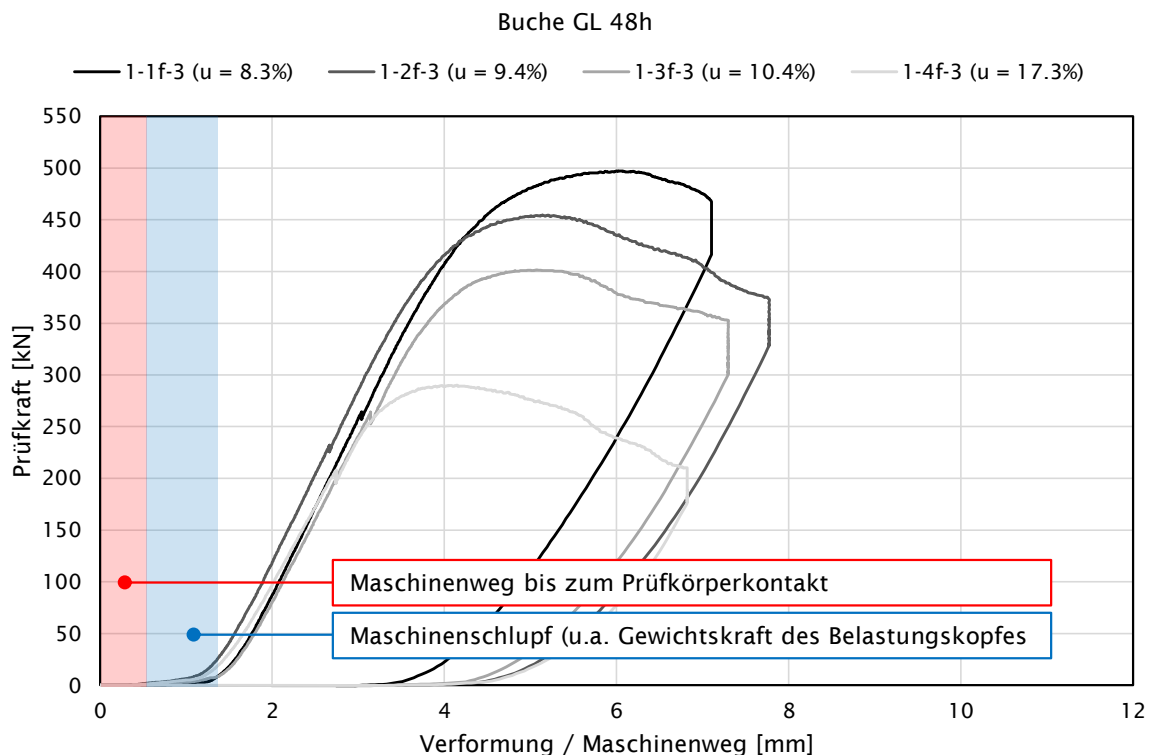


Abb. 15: Typischer Kraft-Verformungsverlauf von BSH aus Buche der Festigkeitsklasse GL 48h bei verschiedenen Holzfeuchtebereichen (u). Die Prüfung wurde Weg-gesteuert mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von 0.02 mm/s durchgeführt. Bevor die Prüfkraft annähernd linear zunahm, musste zunächst auf Kontakt gefahren und anschliessend der Maschinenschlupf überwunden werden.

In Abb. 16 ist ein typisches Versagensbild eines Prüfkörpers aus Buchen BSH der Festigkeitsklasse GL 48h (Feuchtebereich «2F») dargestellt. In dieser Serie führten ausgeprägte Faserstauchungen in Bereichen lokaler Faserabweichung, nahe Keilzinkenverbindungen aber auch – wie in diesem Fall – in augenscheinlich ungestörten Bereichen zu einem duktilen Versagen. Die Druckfestigkeit des in Abb. 16 dargestellten Prüfkörpers «1-2F-02» betrug $f_{c,0} = 61.1$ MPa.

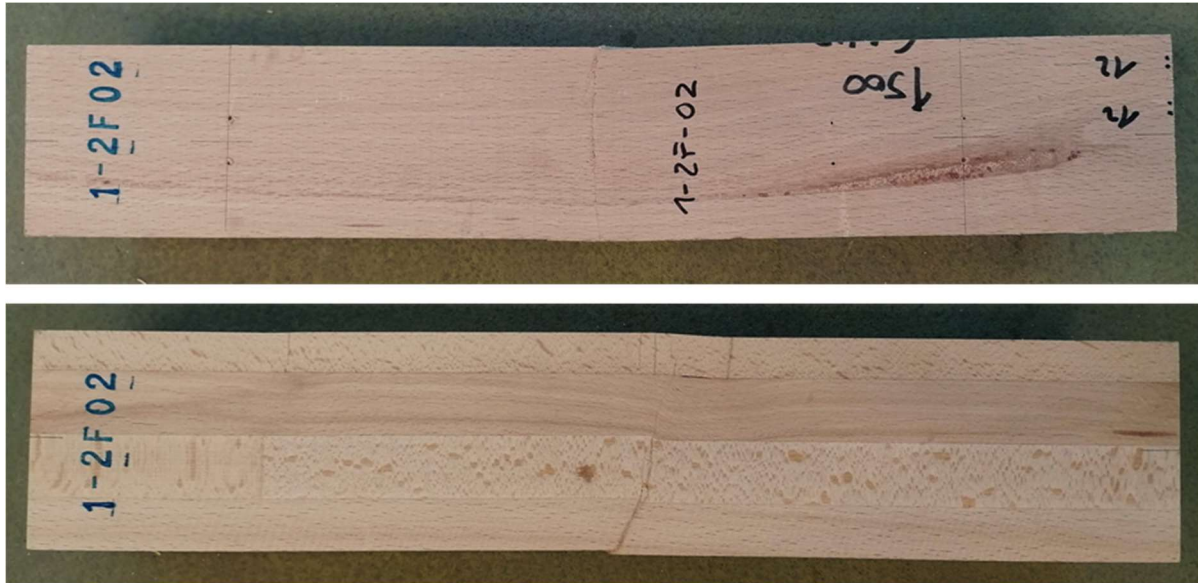


Abb. 16: Typisches Versagensbild eines Prüfkörpers aus Buchen BSH der Festigkeitsklasse GL 48h (Feuchtebereich «2F»). Ausgeprägte Faserstauchungen in Bereichen lokaler Faserabweichung, nahe Keilzinkenverbindungen aber auch in augenscheinlich ungestörten Bereichen, führen zu einem duktilen Versagen ($f_{c,0} = 61.1$ MPa).

In der Prüferie zur Festigkeitsklasse GL 32h wurde auch Buchen BSH getestet, welches aus Lamellen der Festigkeitsklasse T24 produziert worden war. In diesen Prüfkörpern waren verbreitet sehr grosse Äste und starke lokale Faserabweichungen präsent.

Ein typisches Versagensbild eines solche Prüfkörpers aus BSH aus Buche der Festigkeitsklasse GL 32h (Feuchtebereich «3F») ist in Abb. 17 dargestellt. Bei diesem Prüfkörper «3-3F-04» führten ausgeprägte Faserstauchungen auf der Höhe eines grossen Astes zu einem duktilen Versagen bei einer Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung von $f_{c,0} = 50.1$ MPa.

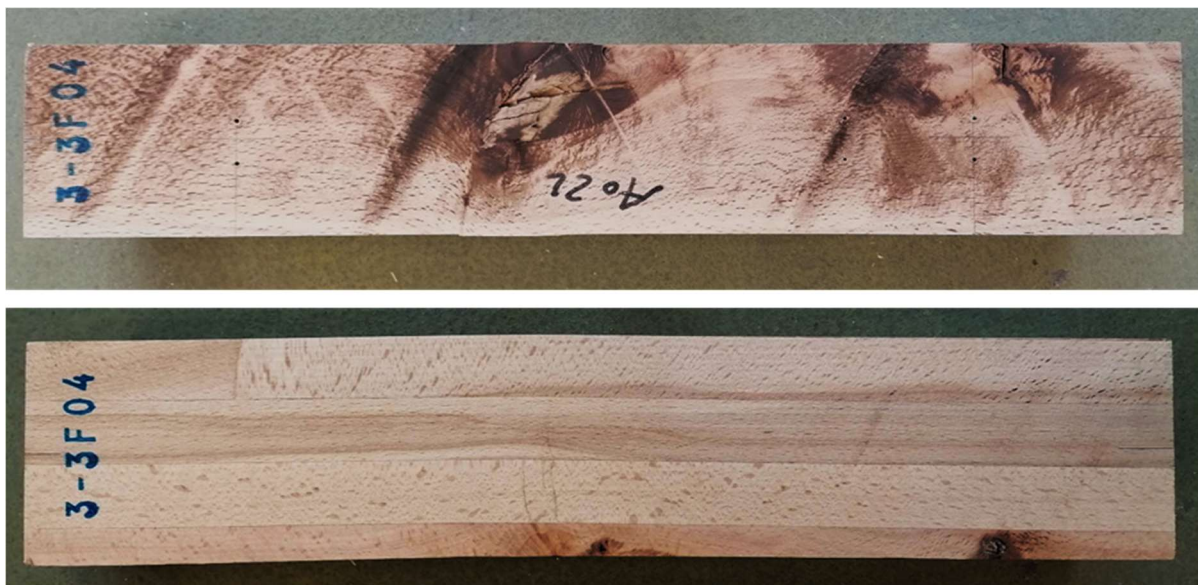


Abb. 17: Typisches Versagensbild eines Prüfkörpers aus Buchen BSH der Festigkeitsklasse GL 32h (Feuchtebereich «3F»). Ausgeprägte Faserstauchungen auf der Höhe eines grossen Astes führten zu einem duktilen Versagen ($f_{c,0} = 50.1$ MPa).

4.2.2. BSH aus Eiche

Für BSH aus Eiche wurde ein ähnliches Verhalten wie für BSH aus Buche beobachtet (siehe Abschnitt 4.2.1), wobei ein noch deutlich ausgeprägtes duktiles Versagen festgestellt wurde (Abb. 18). Ein typisches Versagensbild eines Prüfkörpers aus Eichen BSH ist in Abb. 19 dargestellt. Die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung betrug für den Prüfkörper «9-2F-06» $f_{c,0} = 47.6 \text{ MPa}$.

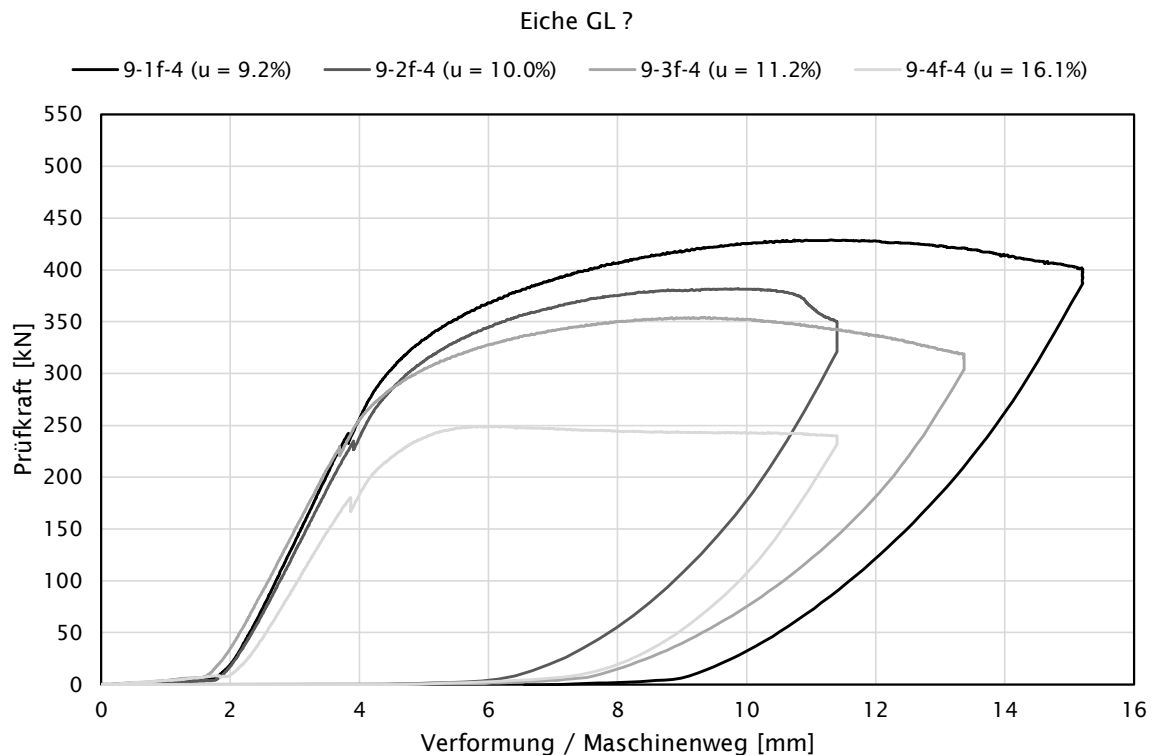


Abb. 18: Typisches Kraft-Verformungsverhalten von BSH aus Eiche bei verschiedenen Holzfeuchtebereichen (u).



Abb. 19: Typisches Versagensbild eines Prüfkörpers aus Eichen BSH (Feuchtebereich «2F»). Ausgeprägte Faserstauungen über den gesamten Querschnitt, oftmals im Bereich von Ästen oder Keilzinkenverbindungen, führten zu einem sehr duktilen Versagen ($f_{c,0} = 47.6 \text{ MPa}$).

4.2.3. BSH aus Esche

Für BSH aus Esche wurde ein ähnliches Verhalten wie für BSH aus Buche beobachtet (siehe Abschnitt 4.2.1) (Abb. 20). Ein typisches Versagensbild eines Prüfkörpers aus Eschen BSH ist in Abb. 21 dargestellt. Die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung betrug für den dargestellten Prüfkörper «4-2F-03» $f_{c,0} = 65.2 \text{ MPa}$.

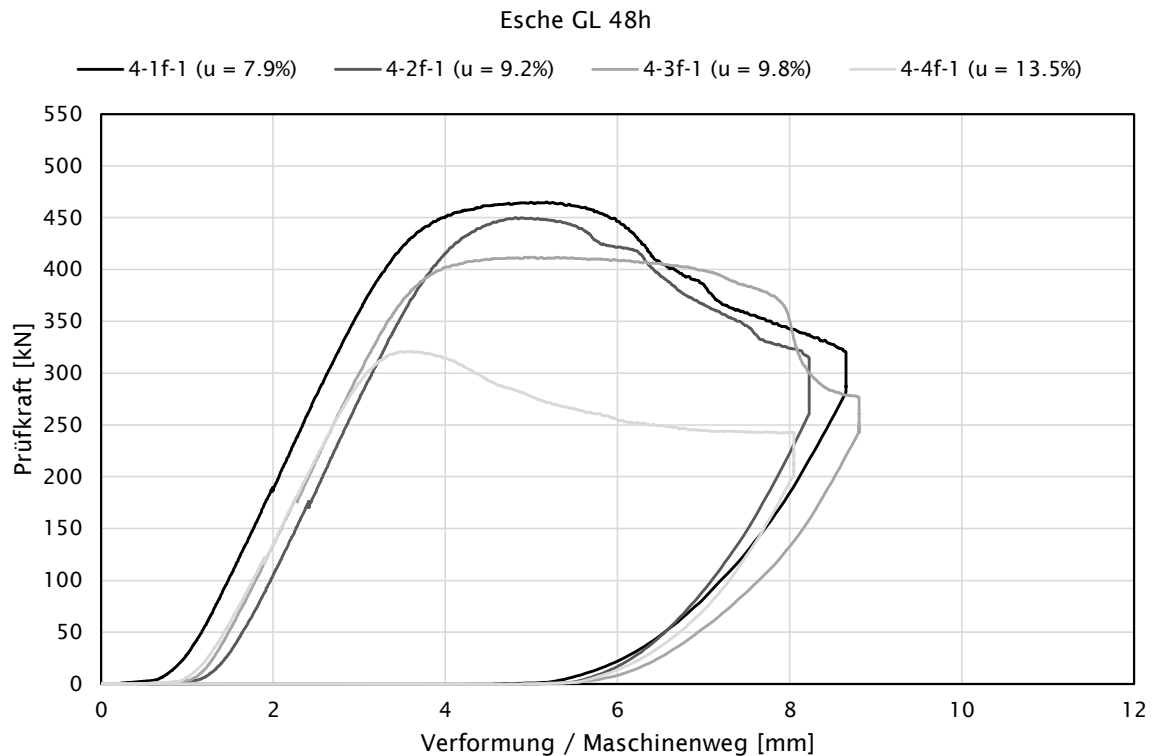


Abb. 20: Typisches Kraft-Verformungsverhalten von BSH aus Esche der Festigkeitsklasse GL 48h bei verschiedenen Holzfeuchtebereichen (u).



Abb. 21: Typisches Versagensbild eines Prüfkörpers aus Eschen BSH der Festigkeitsklasse GL 48h (Feuchtebereich «2F»). Ausgeprägte Faserstauchungen, oftmals im Bereich von Keilzinkenverbindungen oder Astbereichen, führten zu einem sehr duktilen Versagen ($f_{c,0} = 65.2 \text{ MPa}$).

4.2.4. BSH aus Kastanie

Für BSH aus Kastanie wurde ein ähnliches Verhalten wie für BSH aus Buche beobachtet (siehe Abschnitt 4.2.1) (Abb. 22), wobei die Duktilität insbesondere für die Feuchtebereiche «1F» und «2F» geringer war. Ein typisches Versagensbild eines Prüfkörpers aus Kastanien BSH ist in Abb. 23 dargestellt. («6-2F-03»; $f_{c,0} = 45.5 \text{ MPa}$).

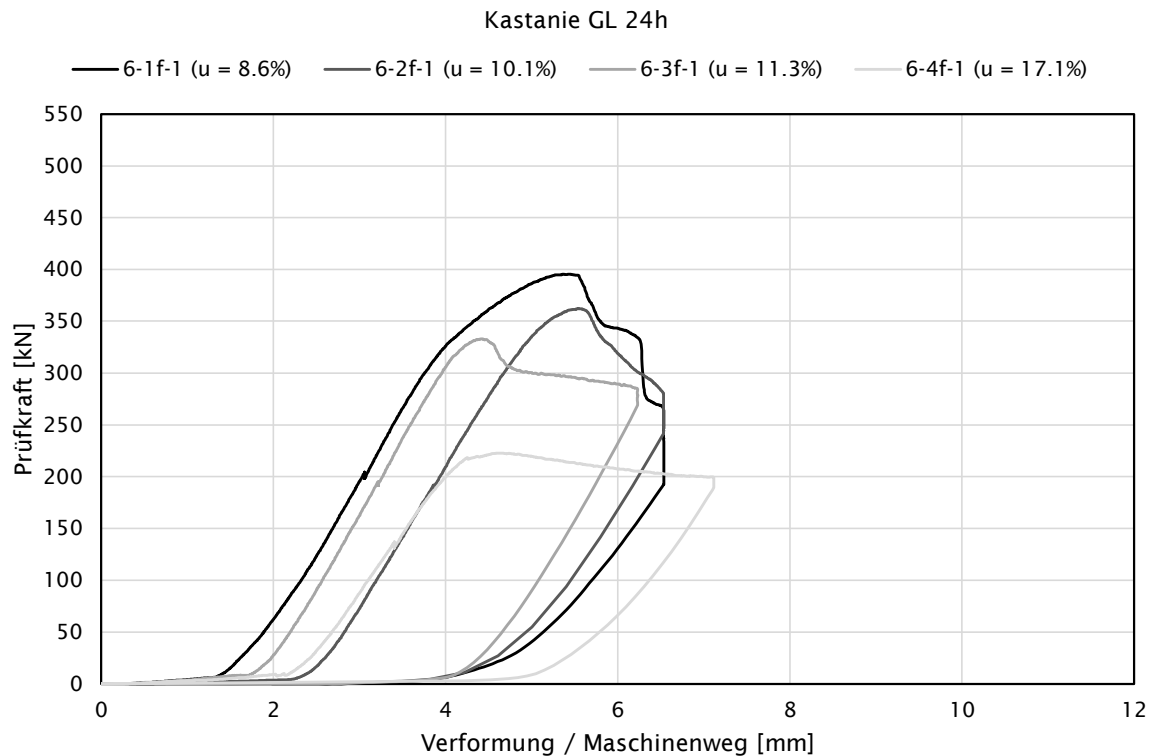


Abb. 22: Typisches Kraft-Verformungsverhalten von BSH aus Kastanie der Festigkeitsklasse GL 24h bei verschiedenen Holzfeuchtebereichen (u).



Abb. 23: Typisches Versagensbild eines Prüfkörpers aus Kastanien BSH (Feuchtebereich «2F»). Ausgeprägte Faserstauchungen, oftmals im Bereich von Keilzinkenverbindungen oder Astbereichen, führten zu einem duktilen Versagen ($f_{c,0} = 45.5 \text{ MPa}$).

4.2.5. BSH aus Fichte

Für BSH aus Fichte wurde ein ähnliches Verhalten wie für BSH aus Buche beobachtet (siehe Abschnitt 4.2.1) (Abb. 24), wobei die Duktilität insbesondere für die Feuchtebereiche «1F», «2F» und «3F» deutlich geringer war. Ein typisches Versagensbild eines Prüfkörpers aus Fichten BSH ist in Abb. 25 dargestellt. («7-3F-05»; $f_{c,0} = 42.5 \text{ MPa}$).

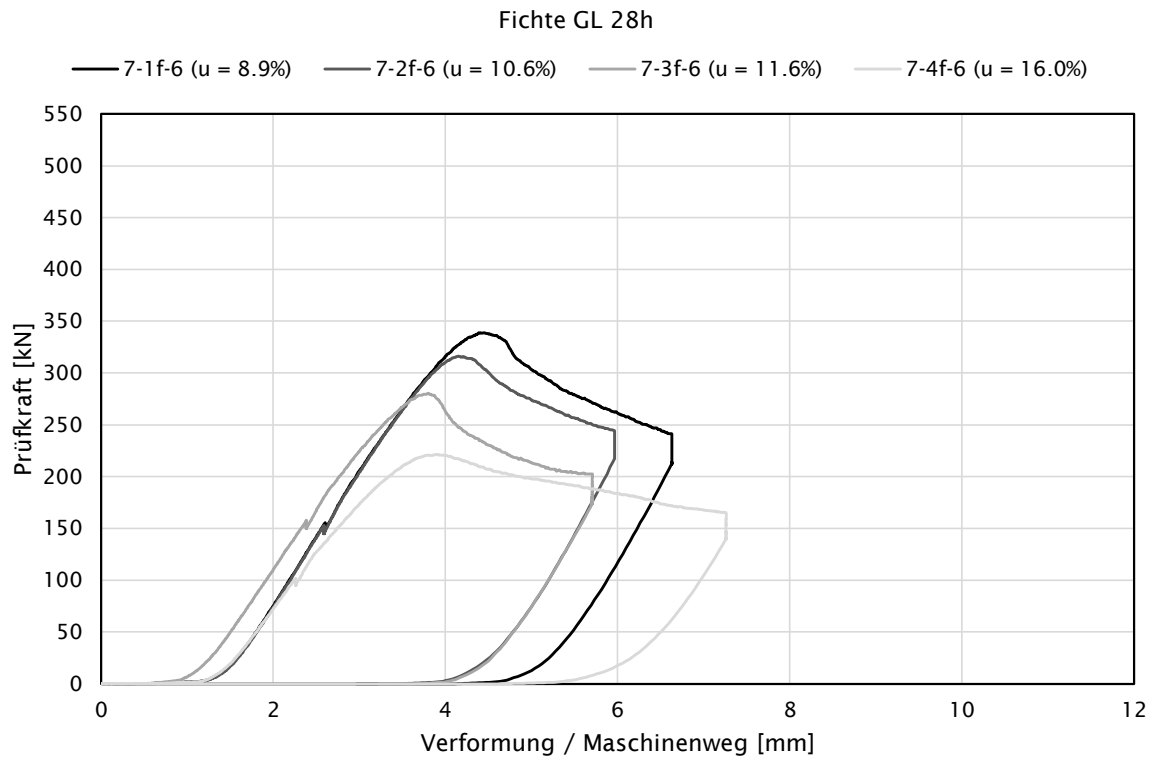


Abb. 24: Typisches Kraft-Verformungsverhalten von BSH aus Fichte der Festigkeitsklasse GL 28h bei verschiedenen Holzfeuchtebereichen (u).



Abb. 25: Typisches Versagensbild eines Prüfkörpers aus Fichten BSH (Feuchtebereich «3F»). Ausgeprägte Faserstauungen, oftmals im Bereich von Keilzinkenverbindungen und Ästen oder Astgruppen, führten zu einem duktilen Versagen ($f_{c,0} = 42.5 \text{ MPa}$).

4.2.6. FSH aus Buche

Für FSH aus Buche konnten in den Feuchtebereichen «3F» und «4F» ähnliche duktile Versagensverhalten wie für BSH aus Buche und Esche beobachtet werden (Abb. 26). Für Prüfkörper der Feuchtebereiche «1F» und «2F» kam es allerdings regelmässig zu einem plötzlichen Abfall der Prüfkraft, ausgelöst durch ein Ausknicken der Furniere (Abb. 27).

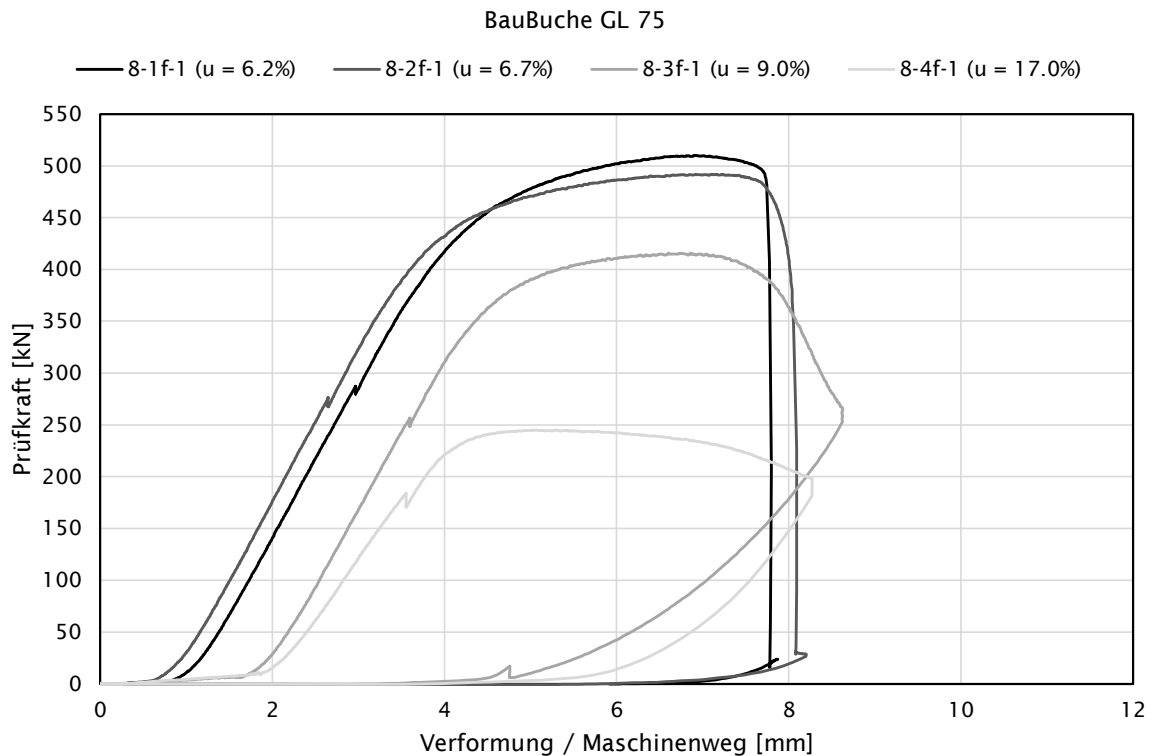


Abb. 26: Typisches Kraft-Verformungsverhalten von Buchen FSH der Festigkeitsklasse GL 75 bei verschiedenen Holzfeuchtebereichen (u).

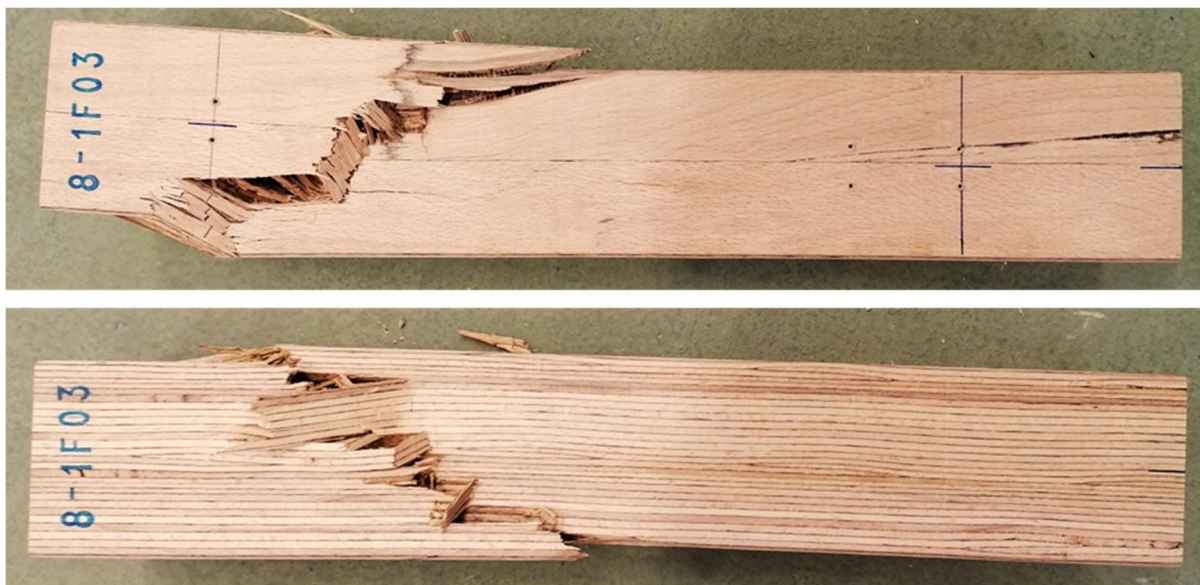


Abb. 27: Typisches Versagensbild eines Buchen FSH Prüfkörpers (Feuchtebereich «1F»). Insbesondere für Prüfkörper der niedrigen Holzfeuchtebereiche «1F» (ca. 6%) und «2F» (ca. 6.8%) wurde, ausgelöst durch ein Ausknicken der Furniere, ein plötzlicher Lastabfall beobachtet ($f_{c,0} = 81.8 \text{ MPa}$).

4.3. Einfluss der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung

Für jeden der insgesamt 300 Prüfkörper wurde sowohl die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung bei einer bestimmten Holzfeuchte ($f_{c,0,u}$) (gemäss EN 408 [24]) als auch die Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Druckprüfung (u_{test}) ermittelt (gemäss EN 13183 [25]). Auf Basis dieser Daten wird nachfolgend der Einfluss der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung für die Produkte BSH aus Buche, Eiche, Esche, Kastanie und Fichte sowie FSH aus Buche untersucht und diskutiert.

Bei Prüfkörpern aus BSH aus Eiche und Kastanie und aus FSH aus Buche des Feuchtebereichs «4F» wurde auffällig oft Versagen nahe der Prüfkörperenden beobachtet. Die Vermutung, dass die Holzfeuchte in diesen Bereichen aufgrund der Lagerung von nur rund 5 Wochen im Klima 20°C/95% relative Luftfeuchte etwas höher war als in den inneren Prüfkörperbereichen konnte anhand zusätzlicher Darrproben, die aus diesen Abschnitten gewonnen wurden, bestätigt werden. Es wird darauf hingewiesen, dass die Massekonstanz gemäss EN 408 [24] (Abweichung von zwei Wägungen innerhalb von 6 Stunden geringer als 0.1%) bei sämtlichen Prüfkörpern eingehalten wurde.

Die festgestellten, um mehr als ein Prozent höheren Holzfeuchten nahe der Prüfkörperenden im Vergleich zur Prüfkörpermitte, lassen darauf schliessen, dass diese für Nadelholz erarbeitete Regelung gemäss EN 408 [24] zu wenig streng ist, d.h., es müsste ein längerer Zeitraum oder eine geringere zulässige Abweichung definiert werden. In weiterer Folge wurde für die Betrachtungen hinsichtlich der Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung die Holzfeuchte im Bereich des Versagens und für den Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung die Holzfeuchte in Prüfkörpermitte herangezogen.

Zur Beschreibung des Einflusses der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung wurde sowohl ein lineares Regressionsmodell (in Abb. 28ff jeweils als strichlierte Linie in blauer Farbe dargestellt) als auch eine Exponentialfunktion (jeweils mit einer roten, kontinuierlichen Linie dargestellt) verwendet.

Die Qualität der beiden Regressionskurven wird dabei jeweils anhand des Bestimmtheitsmasses R^2 bewertet. Der Vorteil des linearen Regressionsmodells besteht vor allem darin, dass diese generell als «einfacher» empfunden wird. Zudem erfolgt die Korrektur der in Prüfungen ermittelten Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung in Abhängigkeit der Feuchte gemäss EN 384 [17] derzeit anhand eines linearen Modells. Der generelle Nachteil des linearen Modells besteht vor allem darin, dass es für höhere Bereiche der Holzfeuchte zu negativen Druckfestigkeiten führen kann und sich dessen Anwendung deshalb auf einen bestimmten, festzulegenden Bereich der Holzfeuchte beschränkt.

4.3.1. BSH aus Buche

In Abb. 28 ist die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung ($f_{c,0}$) von BSH aus Buche der Festigkeitsklasse GL 48h in Abhängigkeit der Holzfeuchte (u) dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der Einfluss der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung sowohl durch die lineare Funktion ($R^2 = 0.896$) als auch durch die Exponentialfunktion ($R^2 = 0.928$) sehr gut abgebildet werden kann.

Die Exponentialfunktion mit einem Exponenten von -0.819 weist für die Festigkeitsklasse GL 48h ein etwas höheres Bestimmtheitsmass auf. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die lineare Funktion die tatsächliche Druckfestigkeit bei einer geringen Holzfeuchte deutlich unterschätzt. Theoretisch ergeben sich mit der linearen Funktion für eine Holzfeuchte von $u > 27.7\%$ negative Druckfestigkeiten (Abb. 28).

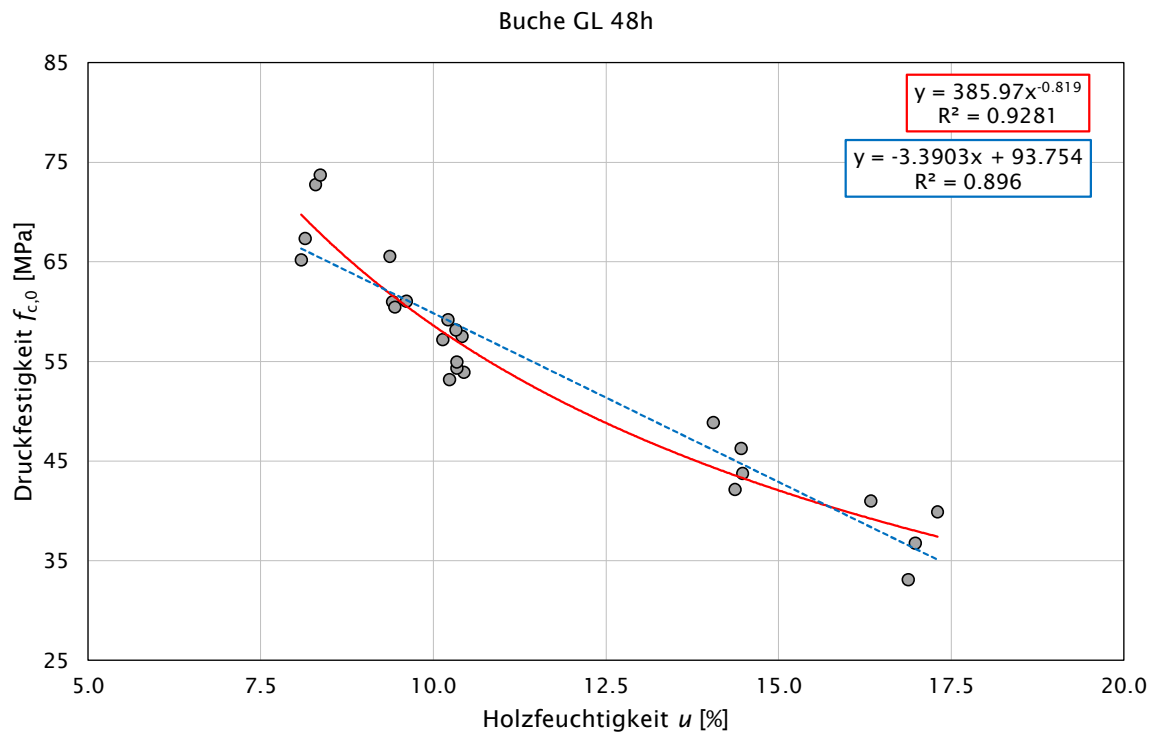


Abb. 28: Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung ($f_{c,0}$) von BSH aus Buche der Festigkeitsklasse GL 48h in Abhängigkeit der Holzfeuchte (u).

Ein sehr ähnliches Bild ergibt sich für die Festigkeitsklasse GL 40h (Abb. 29). Der festgestellte Exponent ist mit -0.818 nahezu ident mit jenem für die Festigkeitsklasse GL 48h (-0.819).

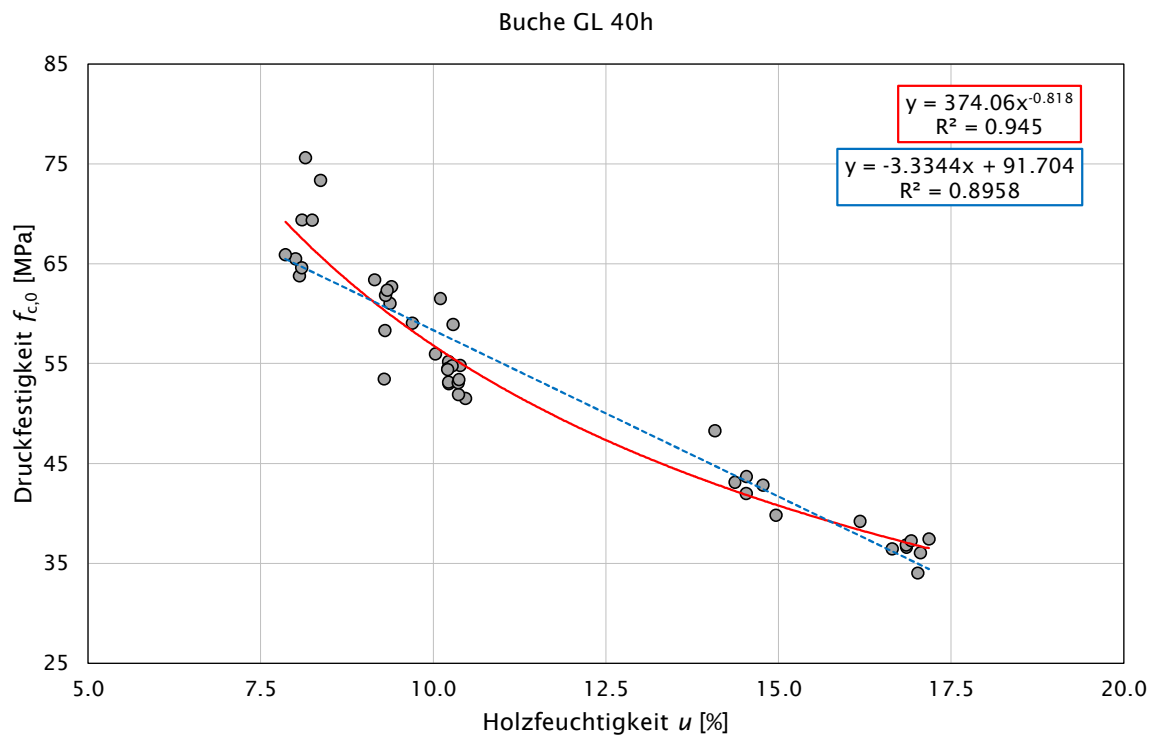


Abb. 29: Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung ($f_{c,0}$) von BSH aus Buche der Festigkeitsklasse GL 40h in Abhängigkeit der Holzfeuchte (u).

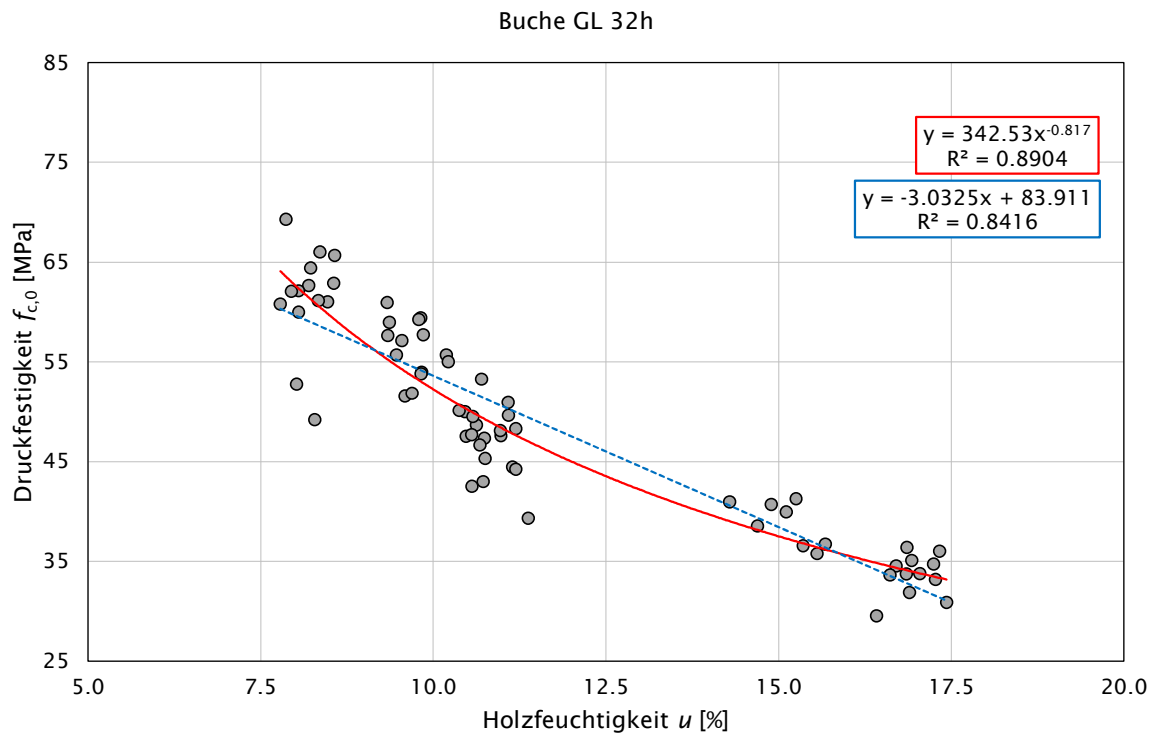


Abb. 30: Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung ($f_{c,0}$) von BSH aus Buche der Festigkeitsklasse GL 32h in Abhängigkeit der Holzfeuchte (u).

Für BSH aus Buche der Festigkeitsklasse GL 32h sind die Bestimmtheitsmasse für die lineare Regression ($R^2 = 0.842$) und die Exponentialfunktion ($R^2 = 0.890$) etwas niedriger als für die Festigkeitsklassen GL 48h und GL 40h. Dies lässt sich mit der grösseren Streuung der Druckfestigkeit, hervorgerufen durch eine grössere Anzahl an lokalen Holzcharakteristika wie grossen Ästen und Faserabweichungen, erklären. Der ermittelte Exponent von -0.817 ist wiederum nahezu identisch zu jenem für GL 48h (-0.819) und GL 40h (-0.818).

4.3.2. BSH aus Eiche

Auch für BSH aus Eiche wurde ein deutlicher Einfluss der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung festgestellt. Wie in Abb. 31 ersichtlich, sinkt diese von rund 55 MPa bei einer Holzfeuchte von rund 9% auf unter 40 MPa bei einer Holzfeuchte von etwa 16%.

Sowohl die lineare Regression ($R^2 = 0.761$) als auch die Exponentialfunktion ($R^2 = 0.771$) erlauben eine ähnliche gute Beschreibung des Einflusses der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung, wobei die Bestimmtheitsmasse im Vergleich zu BSH aus Buche wegen der stärker streuenden Druckfestigkeit geringer ausfallen.

Für BSH aus Eiche wurde ein Exponent von -0.686 in der Exponentialfunktion ermittelt. Dieser etwas niedrigere Exponent im Vergleich zu BSH aus Buche (ca. -0.82 für alle Festigkeitsklassen) bedeutet, dass der Einfluss der Holzfeuchte bei BSH aus Eiche etwas weniger stark ausgeprägt ist.

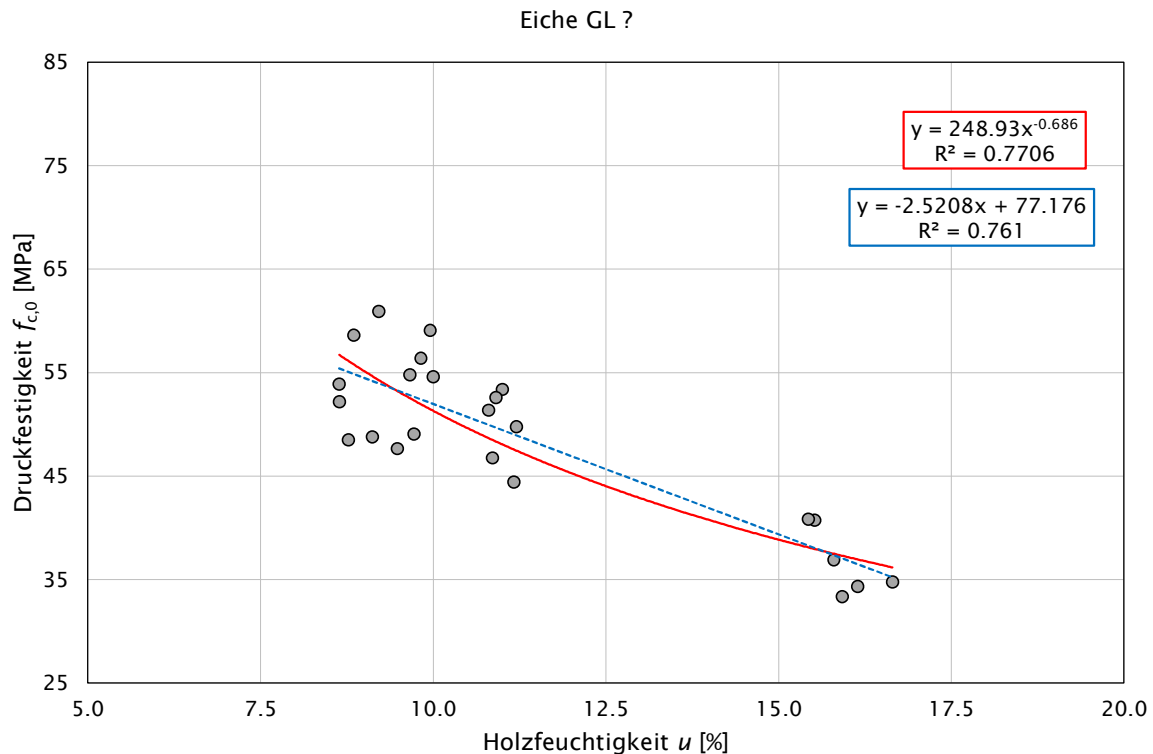


Abb. 31: Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung ($f_{c,0}$) von BSH aus Eiche in Abhängigkeit der Holzfeuchte (u).

4.3.3. BSH aus Esche

Für BSH aus Esche ist, wie in Abb. 32 (GL 48h) und Abb. 33 (GL 40h) ersichtlich, ebenfalls ein deutlicher Einfluss der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung feststellbar. Die Exponenten in der ermittelten Exponentialfunktion betragen -0.888 (GL 48h) bzw. -0.852 (GL 40h) und liegen damit (absolut) etwas höher im Vergleich zu BSH aus Buche (ca. -0.82 für alle Festigkeitsklassen).

Erneut liegt das Bestimmtheitsmass der linearen Regressionen und der Exponentialfunktionen für die Festigkeitsklassen GL 48h (0.864/0.884) und GL 40h (0.917/0.927) auf einem ähnlichen, sehr hohen Niveau, was auf die relativ geringe Streuung der Festigkeiten zurückzuführen ist. Da der untersuchte Bereich der Holzfeuchte mit rund $8 < u < 15\%$ relativ klein ist, kommen die Nachteile der linearen Funktion in hohen bzw. niedrigen Feuchtebereichen im Vergleich zu den Ergebnissen zu BSH aus Buche weniger stark zum Tragen.

Neben den Resultaten, die in dieser Studie ermittelt wurden, sind in Abb. 32 auch die mittleren Druckfestigkeiten und Holzfeuchten aus dem Projekt WHFF-CH 2012.10 [8] dargestellt. Auch wenn es sich dabei um fehlerfreie Kleinproben handelt, stellen sie eine wertvolle Ergänzung zu den eigenen Versuchsdaten dar. Vor allem lässt sich anhand der Ergebnisse aus dem Projekt WHFF-CH 2012.10 [8] eindrücklich zeigen, dass mit der linearen Funktion (extrapoliert) keine sinnvolle Beschreibung der Druckfestigkeit in Feuchtebereichen von 18% und mehr möglich ist. Hingegen erlaubt die Exponentialfunktion, ermittelt ausschliesslich anhand der eigenen Prüfdaten, eine sehr gute Abschätzung der Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtungen für Feuchtebereiche von 18% und mehr.

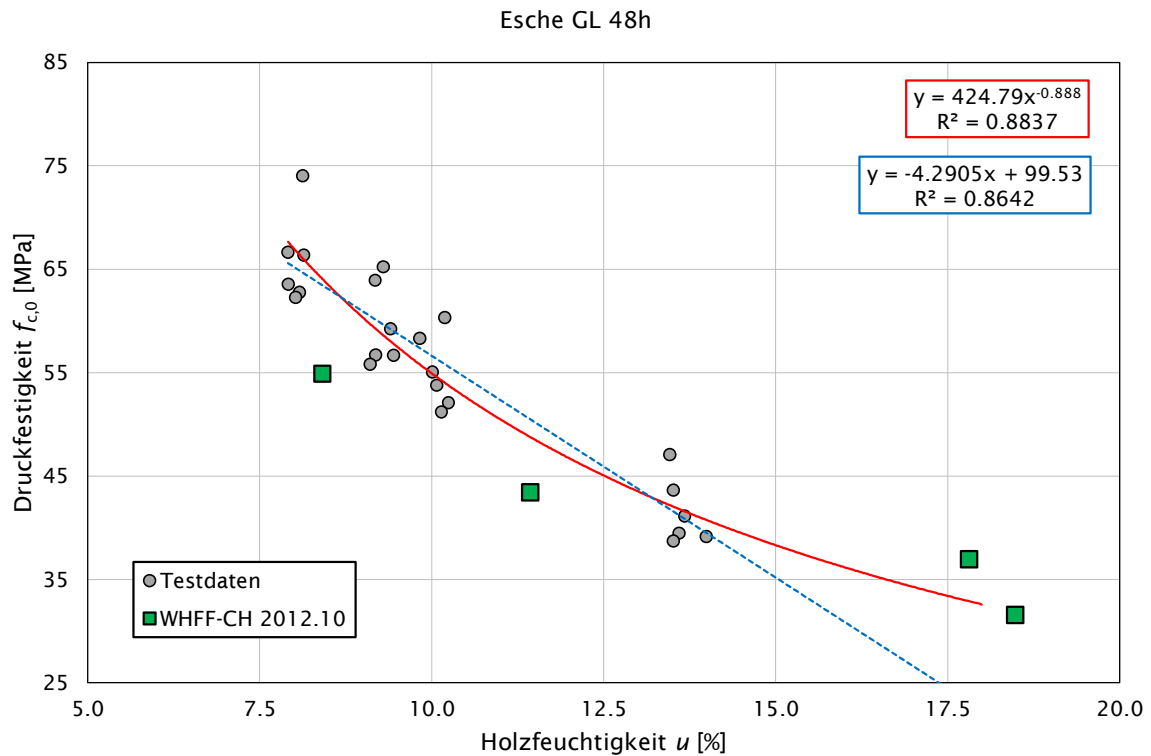


Abb. 32: Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung ($f_{c,0}$) von BSH aus Esche der Festigkeitsklasse GL 48h in Abhängigkeit der Holzfeuchte (u). Ergänzend sind Ergebnisse (Mittelwerte der Druckfestigkeit und Holzfeuchte) aus dem Projekt WHFF-CH 2012.10 [8] dargestellt.

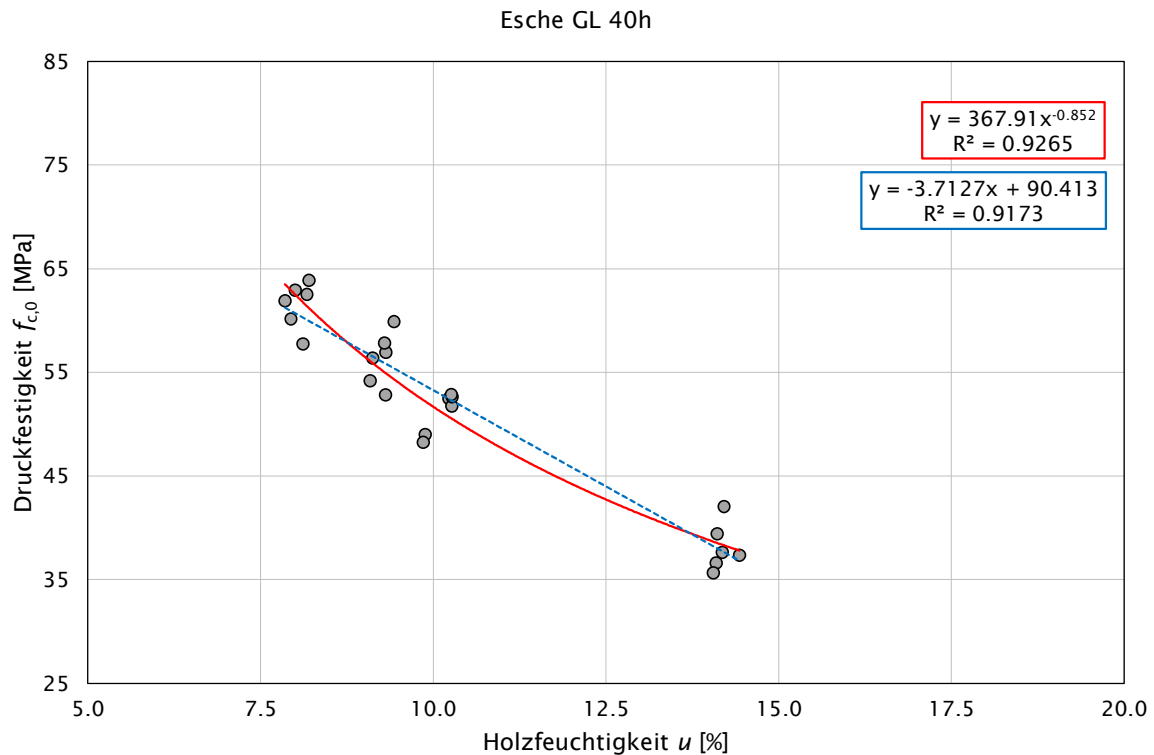


Abb. 33: Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung ($f_{c,0}$) von BSH aus Esche der Festigkeitsklasse GL 40h in Abhängigkeit der Holzfeuchte (u).

4.3.4. BSH aus Kastanie

Im Vergleich zu BSH aus Buche und Esche ist der für BSH aus Kastanie festgestellte Einfluss der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung stärker überlagert durch eine materialimmanente Streuung der Druckfestigkeit (Abb. 34).

Ungeachtet dessen ist mit zunehmender Holzfeuchte eine stark abnehmende Druckfestigkeit parallel zu Faserrichtung festzustellen. Mit der linearen Regression bzw. der Exponentialfunktion wurden Bestimmtheitsmasse von $R^2 = 0.590$ bzw. 0.615 ermittelt. Der Exponent liegt mit -0.568 etwas niedriger im Vergleich zu BSH aus Buche und Esche und ist vergleichbar mit jenem Exponenten, der für BSH aus Eiche ermittelt wurde.

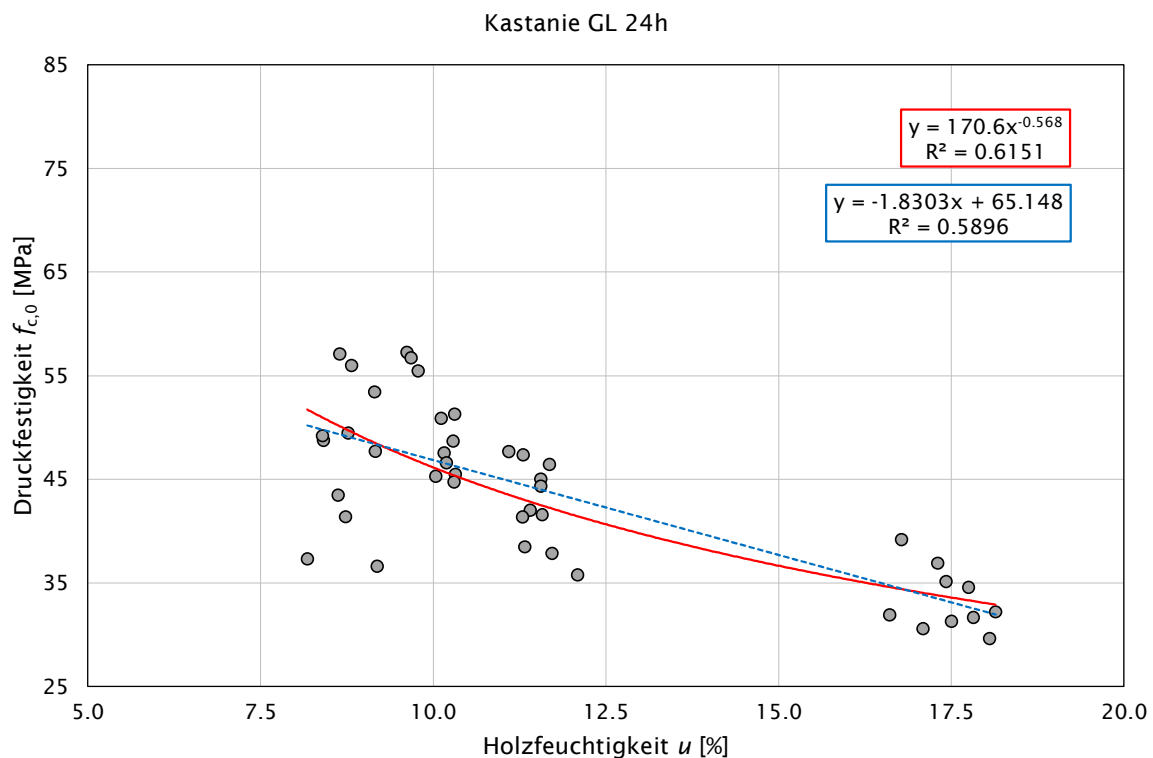


Abb. 34: Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung ($f_{c,0}$) von BSH aus Kastanie der Festigkeitsklasse GL 24h in Abhängigkeit der Holzfeuchte (u).

4.3.5. BSH aus Fichte

Für BSH aus Fichte ist, wie in Abb. 35 ersichtlich, ebenfalls ein deutlicher Einfluss der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung feststellbar. Der Exponent in der ermittelten Exponentialfunktion beträgt -0.802 und liegt damit sehr ähnlich zu BSH aus Buche (ca. -0.82 für alle Festigkeitsklassen) und etwas unter (Vergleich von Absolutwerten) jenem von BSH aus Esche (ca. -0.86).

Erneut liegt das Bestimmtheitsmass der linearen Regression bzw. der Exponentialfunktion mit $R^2 = 0.905$ bzw. 0.903 auf einem sehr ähnlichen Niveau, was auf die geringe Streuung der Druckfestigkeiten zurückzuführen ist.

Da der untersuchte Bereich der Holzfeuchte mit rund $8 < u < 15\%$ relativ gering ist, kommen die Nachteile der linearen Funktion in hohen bzw. niedrigen Feuchtebereichen im Vergleich zu den Ergebnissen zu BSH aus Buche weniger stark zum Tragen.

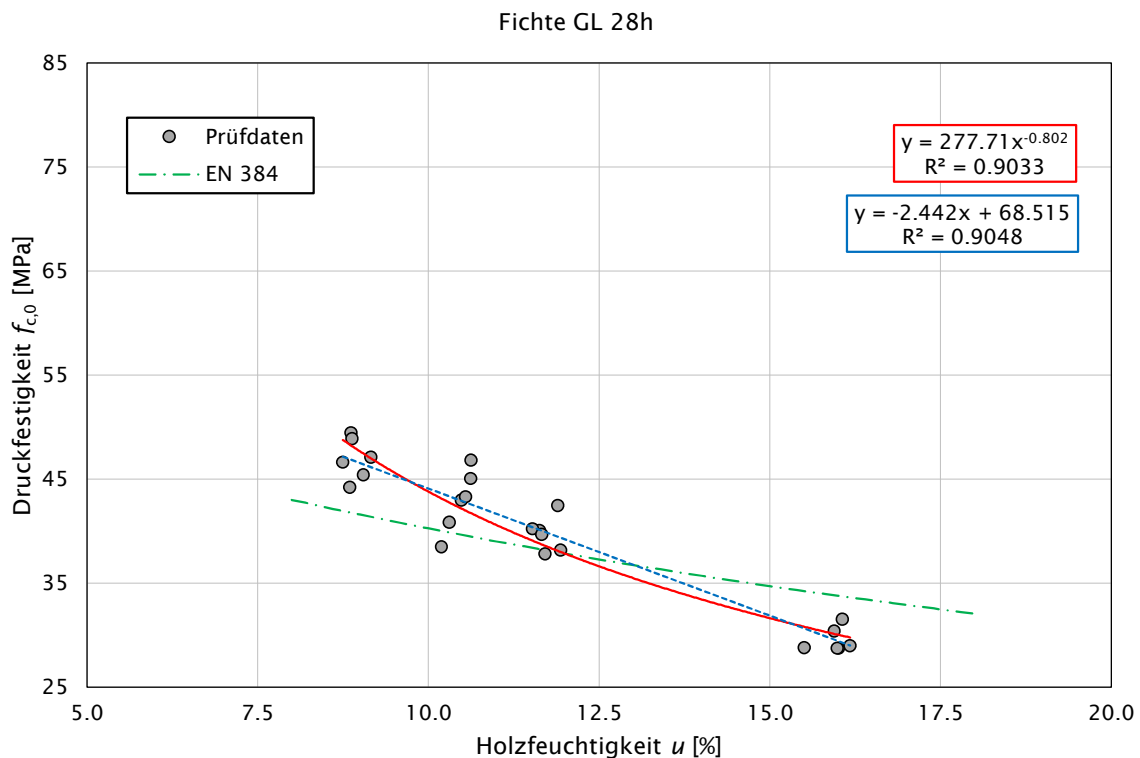


Abb. 35: Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung ($f_{c,0}$) von BSH aus Fichte der Festigkeitsklasse GL 28h in Abhängigkeit der Holzfeuchte (u). Die Funktion zur Feuchtekorrektur gemäss EN 384 [17] ist zum Vergleich dargestellt.

Interessant ist jedenfalls ein Vergleich der Prüfdaten mit jener Funktion, die in der EN 384 [17] zur Feuchtekorrektur der in experimentellen Prüfungen bestimmten Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung für einen Holzfeuchtebereich von 8 bis 18% vorgegeben wird (Gleichung 6).

$$f_{c,0} = f_{c,0,u} \cdot [1 + 0.03 \cdot (u - u_{\text{ref}})] \quad (6)$$

Wird zunächst der Mittelwert der Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung bei einer Holzfeuchte von 12% mit der Exponentialfunktion bestimmt ($f_{c,0,12} = 37.9$ MPa) und anschliessend die Funktion gemäss EN 384 [17] bzw. Gleichung 6 in Abb. 35 geplottet, so zeigt sich, dass diese Kurve deutlich zu flach ist, um die Prüfergebnisse angemessen zu beschreiben. Dadurch wird die tatsächliche Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung für niedrige Holzfeuchten deutlich unterschätzt bzw. für höhere Holzfeuchten deutlich überschätzt.

Folglich gilt: Werden in der (Prüf-) Praxis Prüfkörper mit einer Holzfeuchte von beispielsweise 8% geprüft, wird dabei ein Mittelwert der Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung von 52.4 MPa festgestellt und anschliessend eine Korrektur gemäss EN 384 [17] auf die Referenzholzfeuchte von 12% durchgeführt, so wird ein korrigierter Wert von 46.1 MPa ermittelt. Tatsächlich beträgt die Druckfestigkeit bei dieser Holzfeuchte aber 37.9 MPa, was einer Überschätzung der Druckfestigkeit von rund 20% entspricht. Umgekehrt führen «feucht» geprüfte Prüfkörper ($u_{\text{test}} > 12\%$) zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Druckfestigkeit bei der Referenzholzfeuchte von 12%.

4.3.6. FSH aus Buche

Für FSH aus Buche ist, wie in Abb. 36 ersichtlich, ebenfalls ein deutlicher Einfluss der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung feststellbar. Der Exponent in der ermittelten Exponentialfunktion beträgt -0.785 und liegt damit sehr ähnlich zu BSH aus Buche (ca. -0.82 für alle Festigkeitsklassen), Fichte (-0.802) und etwas unter (Vergleich von Absolutwerten) jenem von BSH aus Esche (ca. -0.86).

Aus der starken Homogenisierung des Werkstoffes FSH aus Buche resultiert eine sehr geringe Streuung der Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung, durch welche die sehr hohen Bestimmtheitsmasse der linearen Regression ($R^2 = 0.973$) und der Exponentialfunktion ($R^2 = 0.993$) erklärt werden können, d.h., die Änderung der Druckfestigkeit ist nahezu ausschliesslich auf die geänderte Holzfeuchte zurückzuführen. Für FSH aus Buche standen nur Feuchtebereiche von rund 6 bis 9% sowie rund 17% zur Verfügung. Damit lässt sich der Bereich zwischen 9 und 17% nicht beurteilen und der grosse «Stich» zwischen der linearen Regression und der Exponentialfunktion kann nicht experimentell abgesichert diskutieren.

Ergänzend zu den Testdaten aus dieser Studie sind in Abb. 36 Prüfergebnisse (Mittelwerte) aus früheren Studien bzw. Zulassungsversuchen dargestellt, welche freundlicherweise von der Firma Pollmeier zur Verfügung gestellt wurden. Es ist ersichtlich, dass die Prüfergebnisse dieser Studie gut mit den früheren Testergebnissen übereinstimmen. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass ein starker Fokus auf Holzfeuchtebereiche von maximal 8% gelegt wurde. Dies lässt sich mit der niedrigen Holzfeuchte von BauBuche bei der Produktion und Auslieferung begründen. Die in Zulassungen definierte Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung sollte sich aber an jener Ausgleichsfeuchte orientieren, die sich langfristig im Normklima für die Nutzungsklasse 1 (20°C/65%) bzw. Nutzungsklasse 2 (20°C/85%) einstellt.

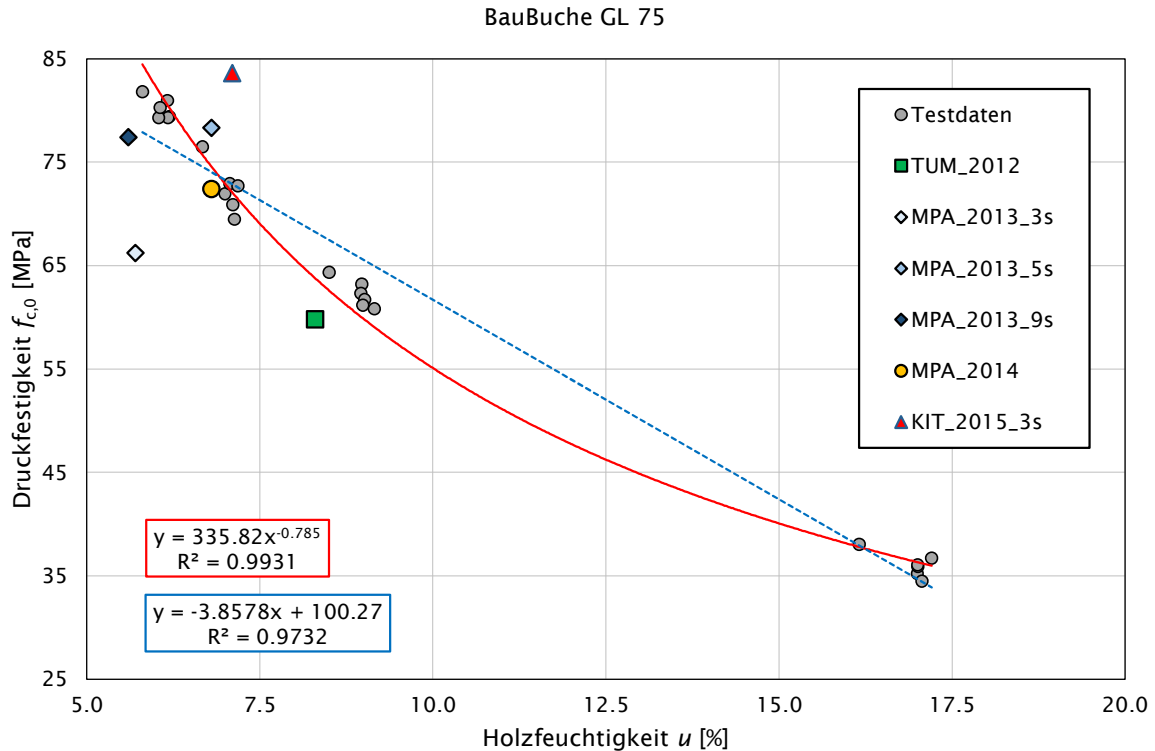


Abb. 36: Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung ($f_{c,0}$) von FSH aus Buche der Festigkeitsklasse GL 75 in Abhängigkeit der Holzfeuchte (u). Ergänzend zu den Testdaten aus der vorliegenden Studie sind die Ergebnisse (Mittelwerte) früherer Untersuchungen an der TU München («TUM»), der MPA Stuttgart («MPA») und dem Karlsruher Institut für Technologie («KIT») dargestellt.

4.3.7. Übersicht zum Einfluss der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung von Laubleimholzprodukten

Es wurde gezeigt, dass die Holzfeuchte für sämtliche untersuchte Laubleimholzprodukte einen grossen Einfluss auf die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung besitzt. Insbesondere dann, wenn Versuchsdaten aus einem grossen Holzfeuchtebereich zur Betrachtung zur Verfügung standen, zeigte sich, dass sich eine Exponentialfunktion deutlich besser zur Beschreibung dieses Einflusses eignet als eine lineare Funktion.

In Tab. 7 sind die resultierenden Exponenten und Bestimmtheitsmasse (R^2) für die Exponentialfunktion, getrennt nach Holzart, Produkt und Festigkeitsklasse, dargestellt. Ebenso ist das Bestimmtheitsmass aus der linearen Regressionsanalyse angegeben.

Für BSH aus Fichte existiert bereits ein in der EN 384 [17] normierter Ansatz zur Berücksichtigung des Einfluss der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung (Gleichung 6). Es wurde gezeigt, dass diese Funktion deutlich zu «flach» verläuft, um den tatsächlichen Einfluss der Holzfeuchte zu beschreiben. Dies kann zu Fehlern von über 20% bei der Ermittlung der auf die Referenzholzfeuchte von 12% korrigierten Druckfestigkeit führen.

Tab. 7: Übersicht zu den mittels Exponentialfunktion und Linearer Funktion ermittelten Bestimmtheitsmassen R^2 und Exponenten zur Berücksichtigung des Einflusses der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung.

Produkt	Serie	Exponentialfunktion		Lineare Regression
		Exponent	R^2	R^2
BSH aus Buche	GL 48h	-0.819	0.928	0.896
	GL 40h	-0.818	0.945	0.896
	GL 32h	-0.817	0.890	0.842
BSH aus Esche	GL 48h	-0.888	0.884	0.864
	GL 40h	-0.852	0.927	0.917
BSH aus Eiche	GL ?	-0.568	0.615	0.590
BSH aus Kastanie	GL 24h	-0.686	0.771	0.761
BSH aus Fichte	GL 28h	-0.802	0.903	0.905
FSH BauBuche	GL 75	-0.785	0.993	0.973

4.4. Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung

Für jeden der insgesamt 300 Prüfkörper wurde sowohl der Druck-Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung bei einer bestimmten Holzfeuchte ($E_{c,0,u}$) (gemäss EN 408 [24]) als auch die Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Druckprüfung (u_{test}) ermittelt (gemäss EN 13183 [25]). Auf Basis dieser Daten wird nachfolgend der Einfluss der Holzfeuchte auf den Druck-Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung für die Produkte BSH aus Buche, Eiche, Esche, Kastanie und Fichte sowie FSH aus Buche untersucht und diskutiert.

Wie bereits bei der Untersuchung des Einflusses der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung (Abschnitt 4.3), wird zur Beschreibung des Einflusses der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung sowohl ein lineares Regressionsmodell (in Abb. 37ff jeweils als strichlierte Linie in blauer Farbe dargestellt) als auch eine Exponentialfunktion (jeweils mit einer roten, kontinuierlichen Linie dargestellt) verwendet.

4.4.1. BSH aus Buche

Der Einfluss der Holzfeuchte (u) auf den Druck-Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung ($E_{c,0}$) ist für BSH aus Buche in der Abb. 37 (GL 48h), Abb. 38 (GL 40h) und Abb. 39 (GL 32h) dargestellt.

Es ist ersichtlich, dass die Streuung des Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung für sämtliche Festigkeitsklassen deutlich stärker ist im Vergleich zur Druckfestigkeit. Dadurch sind die niedrigeren Bestimmtheitsmasse für die linearen Regressionen und die Exponentialfunktionen von 0.514 bzw. 0.498 (GL 48h), 0.386 bzw. 0.388 (GL 40h) sowie 0.242 bzw. 0.246 (GL 32h) begründbar. Dies bedeutet, dass im Vergleich zur Druckfestigkeit nur ein wesentlich geringerer Teil eines geänderten Elastizitätsmoduls auf eine geänderte Holzfeuchte zurückzuführen ist. Generell ist aber ein deutlicher Trend abnehmender Elastizitätsmoduln bei zunehmender Holzfeuchte erkennbar.

Der mit den Exponentialfunktionen ermittelte Exponent liegt mit -0.232 (GL 48h), -0.177 (GL 40h) und -0.172 (GL 32h), absolut gesehen, deutlich unter den Exponenten, die für BSH aus Buche für die Druckfestigkeit ermittelt wurden (rund 0.82).

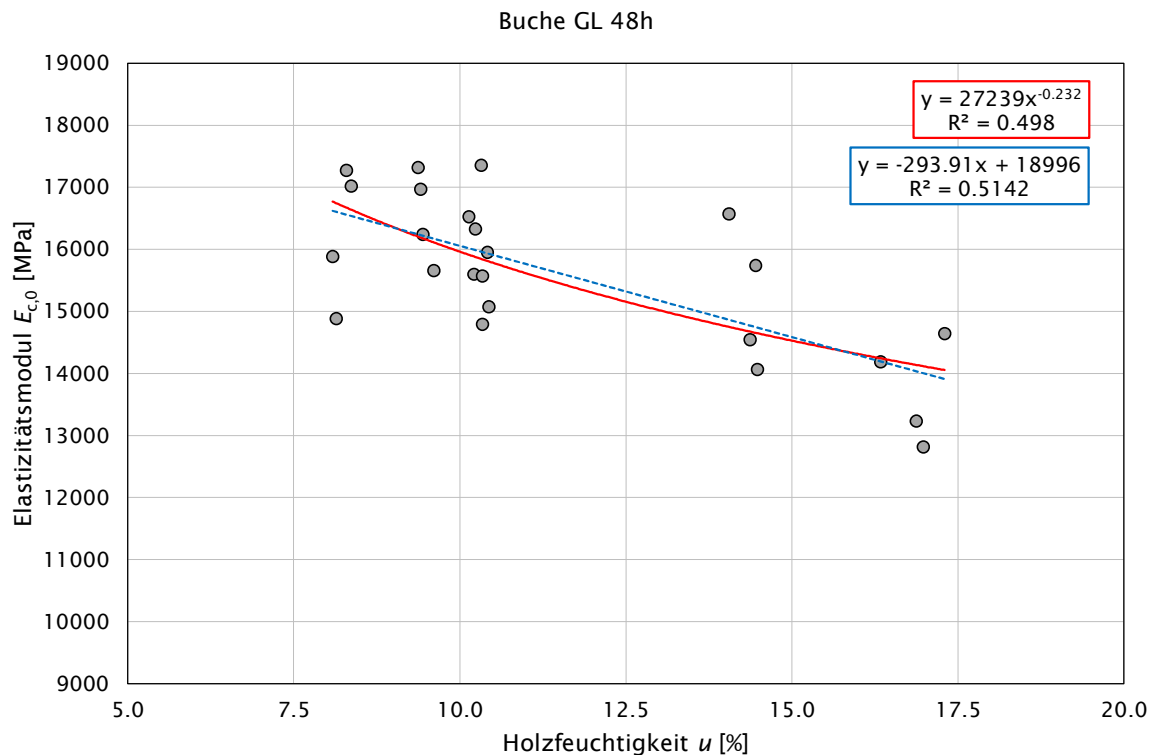


Abb. 37: Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung ($E_{c,0}$) von BSH aus Buche der Festigkeitsklasse GL 48h in Abhängigkeit der Holzfeuchte (u).

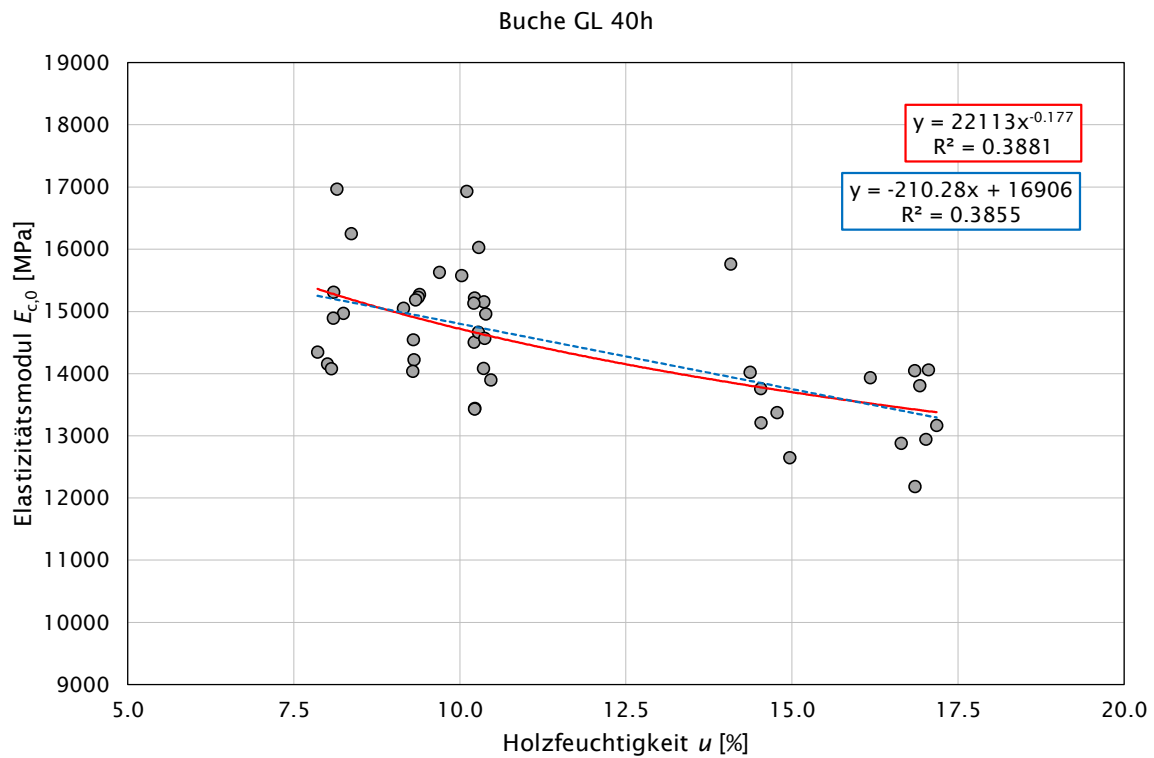


Abb. 38: Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung ($E_{c,0}$) von BSH aus Buche der Festigkeitsklasse GL 40h in Abhängigkeit der Holzfeuchte (u).

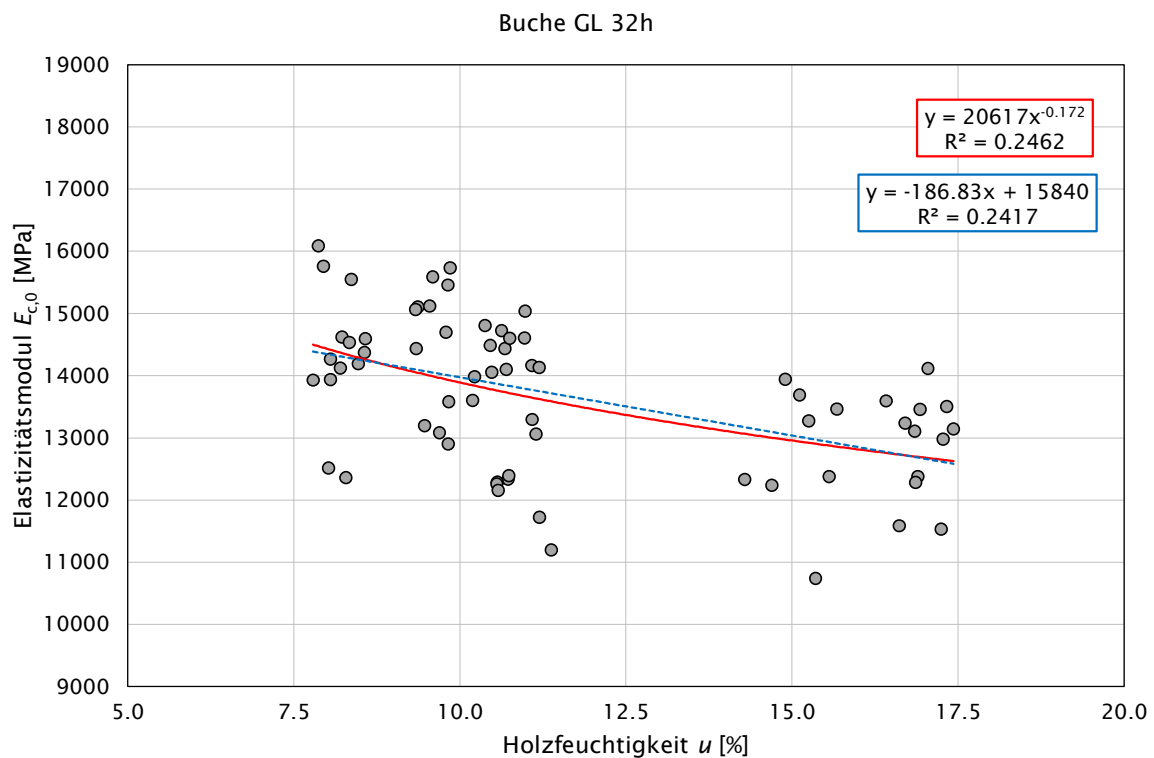


Abb. 39: Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung ($E_{c,0}$) von BSH aus Buche der Festigkeitsklasse GL 32h in Abhängigkeit der Holzfeuchte (u).

4.4.2. BSH aus Eiche

Für BSH aus Eiche konnte anhand der durchgeführten Druckprüfungen kein Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung festgestellt werden (Abb. 40). Die grosse materialimmanente Streuung des Elastizitätsmoduls, für eine Holzfeuchte von rund 9% wurden Werte zwischen 9000 und 13000 MPa ermittelt, überwiegt den Einfluss der Holzfeuchte deutlich.

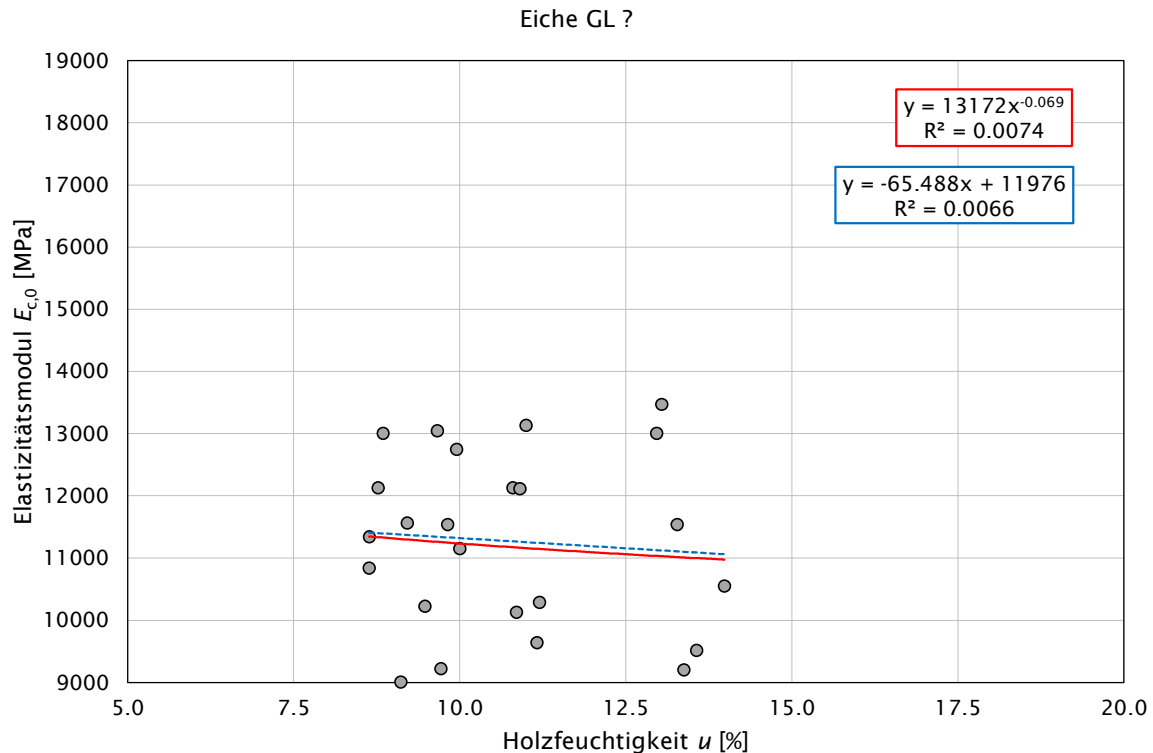


Abb. 40: Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung ($E_{c,0}$) von BSH aus Eiche in Abhängigkeit der Holzfeuchte (u).

4.4.3. BSH aus Esche

Der Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung von BSH aus Esche der Festigkeitsklassen GL 48h (Abb. 41) und GL 40h (Abb. 42) ist sehr ähnlich zu jenem von BSH aus Buche. Es wurden Bestimmtheitsmasse für die linearen Regressionen und die Exponentialfunktionen von 0.262 bzw. 0.268 (GL 48h) sowie 0.131 bzw. 0.127 (GL 40h) festgestellt, was auf einen dominierenden Einfluss der materialimmanenten Streuung des Elastizitätsmoduls hinweist. Die für die Exponentialfunktionen ermittelten Exponenten sind mit -0.206 (GL 48h) und -0.126 (GL 40h) vergleichbar zu jenen, die für BSH aus Buche festgestellt wurden (-0.172 bis -0.232).

Neben den Resultaten, die in dieser Studie ermittelt wurden, sind in Abb. 41 auch die mittleren Elastizitätsmoduln parallel zur Faserrichtung und die Holzfeuchten aus dem Projekt WHFF-CH 2012.10 [8] dargestellt. Dabei handelte es sich um fehlerfreie Kleinproben. Die Ergebnisse aus dem Projekt WHFF-CH 2012.10 [8] liegen deutlich unter den in dieser Studie festgestellten Werten. Dies lässt sich durch die Sortierung des Ausgangsmaterials für das BSH aus Esche erklären, bei welcher der dynamische Elastizitätsmodul als Klassierungsparameter berücksichtigt wurde. Im Projekt WHFF-CH 2012.10 [8] konnte kein Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung festgestellt werden. So liegen die Werte bei einer Holzfeuchte von 17.8% sogar über jenen bei einer Holzfeuchte von 11.4% (Abb. 41).

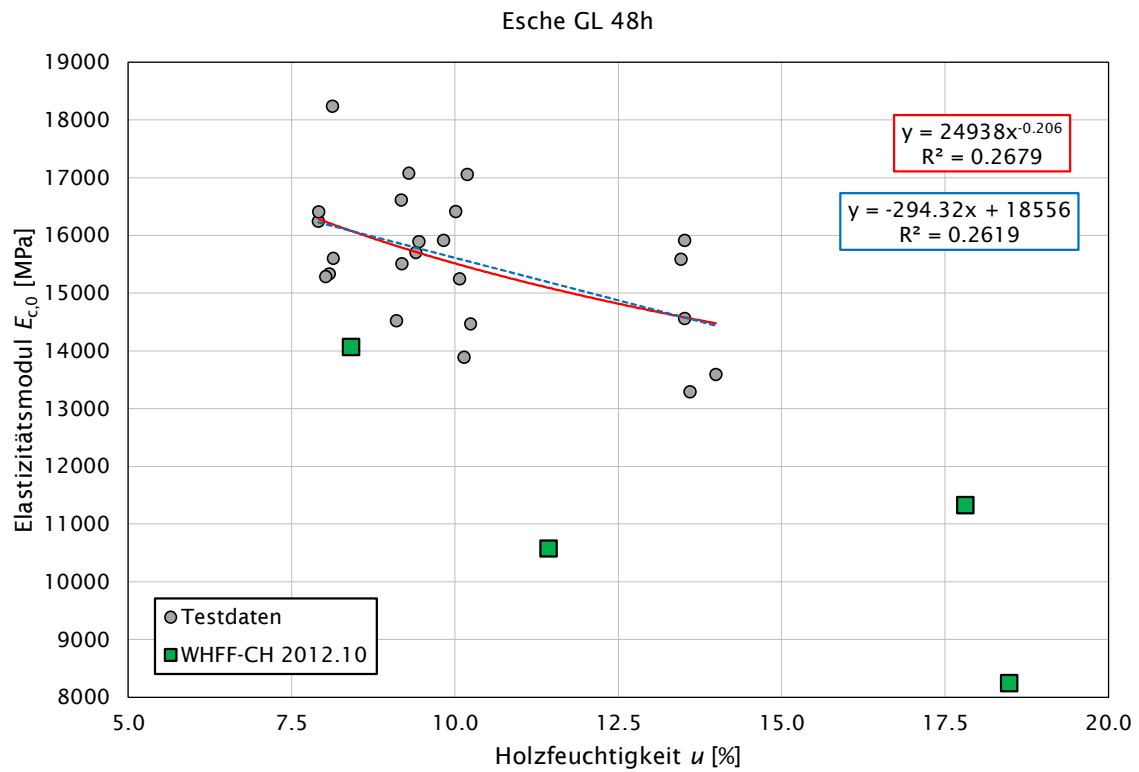


Abb. 41: Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung ($E_{c,0}$) von BSH aus Esche der Festigkeitsklasse GL 48h in Abhängigkeit der Holzfeuchte (u).

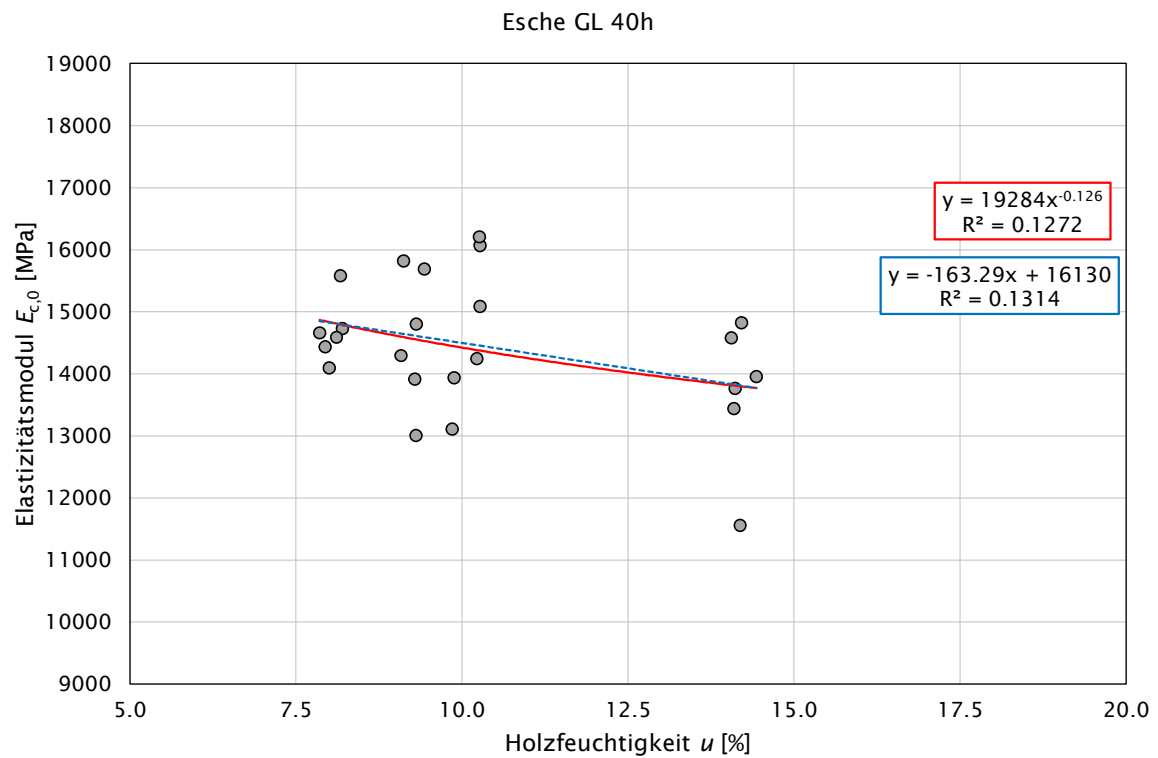


Abb. 42: Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung ($E_{c,0}$) von BSH aus Esche der Festigkeitsklasse GL 40h in Abhängigkeit der Holzfeuchte (u).

4.4.4. BSH aus Kastanie

Für BSH aus Kastanie konnte anhand der durchgeführten Druckprüfungen kein Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung festgestellt werden (Abb. 43). Die grosse materialimmanente Streuung des Elastizitätsmoduls, für eine Holzfeuchte von rund 9% wurden Werte zwischen 9500 und 14000 MPa ermittelt, überwiegt den Einfluss der Holzfeuchte deutlich.

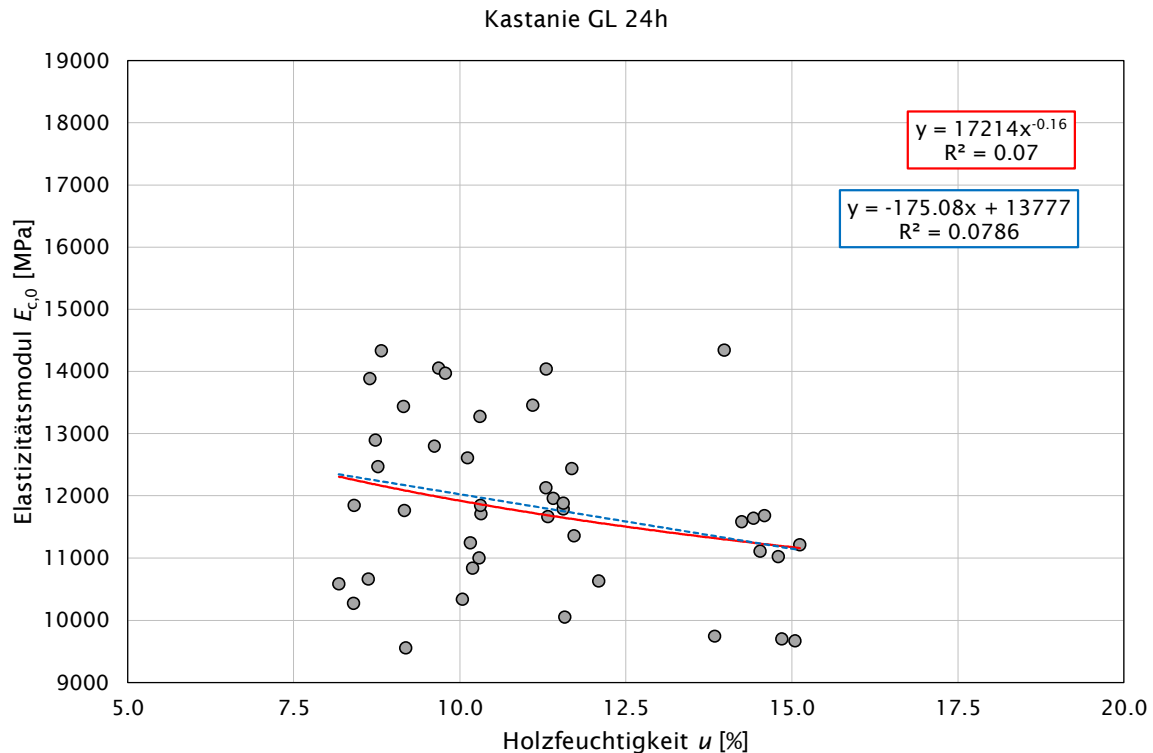


Abb. 43: Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung ($E_{c,0}$) von BSH aus Kastanie der Festigkeitsklasse GL 24h in Abhängigkeit der Holzfeuchte (u).

4.4.5. BSH aus Fichte

Der Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung von BSH aus Fichte (Abb. 44) ist sehr ähnlich zu jenem von BSH aus Buche und Esche. Es wurden Bestimmtheitsmasse für die lineare Regression und die Exponentialfunktion von 0.294 bzw. 0.295 festgestellt, was auf einen dominierenden Einfluss der materialimmanenten Streuung des Elastizitätsmoduls hinweist. Der für die Exponentialfunktion ermittelte Exponent ist mit -0.205 vergleichbar zu jenen, die für BSH aus Buche (-0.172 bis -0.232) und BSH aus Esche (-0.126 bis -0.206) festgestellt wurden.

Interessant ist jedenfalls wieder ein Vergleich der Prüfdaten mit jener Funktion, die in der EN 384 [17] zur Feuchtekorrektur des in experimentellen Prüfungen bestimmten Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung für einen Holzfeuchtebereich von 8 bis 18% vorgegeben wird (Gleichung 7). Wie in Abb. 44 ersichtlich, erlaubt die Funktion gemäss EN 384 [17] bzw. Gleichung 7 eine zutreffende Beschreibung des (geringen) Einflusses der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung von BSH aus Fichte.

$$E_{0,\text{ref}} = E_0 \cdot [1 + 0.01 \cdot (u - u_{\text{ref}})] \quad (7)$$

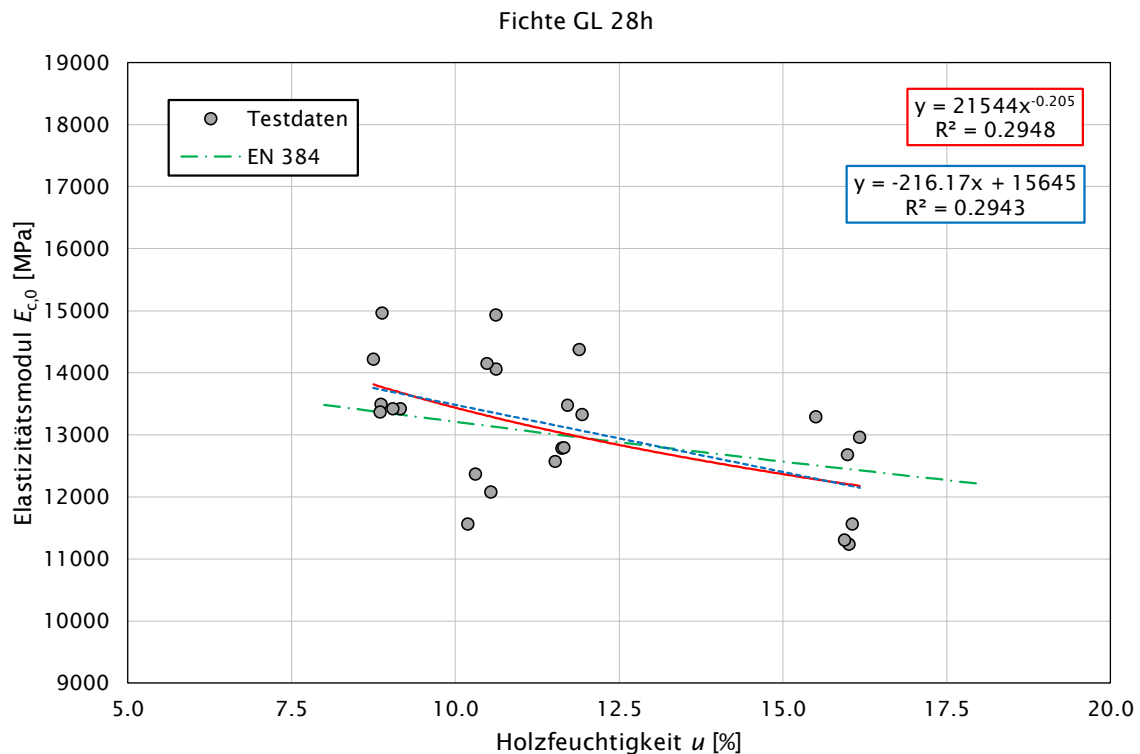


Abb. 44: Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung ($E_{c,0}$) von BSH aus Fichte der Festigkeitsklasse GL 28h in Abhängigkeit der Holzfeuchte (u). Die Funktion zur Feuchtekorrektur gemäss EN 384 [17] ist zum Vergleich dargestellt.

4.4.6. FSH aus Buche

Der Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung von FSH aus Buche (Abb. 45) ist im Vergleich zu BSH aus Buche und Esche deutlicher erkennbar. Es wurden Bestimmtheitsmasse für die lineare Regression und die Exponentialfunktion von 0.873 bzw. 0.847 festgestellt, was auf die geringen materialimmanenten Streuungen des stark homogenisierten Materials zurückzuführen ist.

Der für die Exponentialfunktion ermittelte Exponent ist mit -0.199 vergleichbar zu jenen, die für BSH aus Buche (-0.172 bis -0.232), BSH aus Esche (-0.126 bis -0.206) und BSH aus Fichte (-0.205) festgestellt wurden.

Ergänzend zu den Testdaten aus dieser Studie ist in Abb. 45 das Prüfergebnis (Mittelwert) einer früheren Studie dargestellt, welches freundlicherweise von der Firma Pollmeier zur Verfügung gestellt wurde. Es ist ersichtlich, dass die Prüfergebnisse dieser Studie leicht unter dem früheren Testergebnis liegen.

Es sei allerdings erneut darauf hingewiesen, dass ein starker Fokus auf Holzfeuchtebereiche von maximal 8% gelegt wurde. Dies lässt sich mit der niedrigen Holzfeuchte von BauBuche bei der Produktion und Auslieferung begründen. Der in Zulassungen definierte Mittelwert des Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung sollte sich aber, wie auch andere mechanische Eigenschaften, an jener Ausgleichsfeuchte orientieren, die sich langfristig im Normklima für die Nutzungsklasse 1 (20°C/65%) bzw. Nutzungsklasse 2 (20°C/85%) einstellt.

BauBuche GL 75

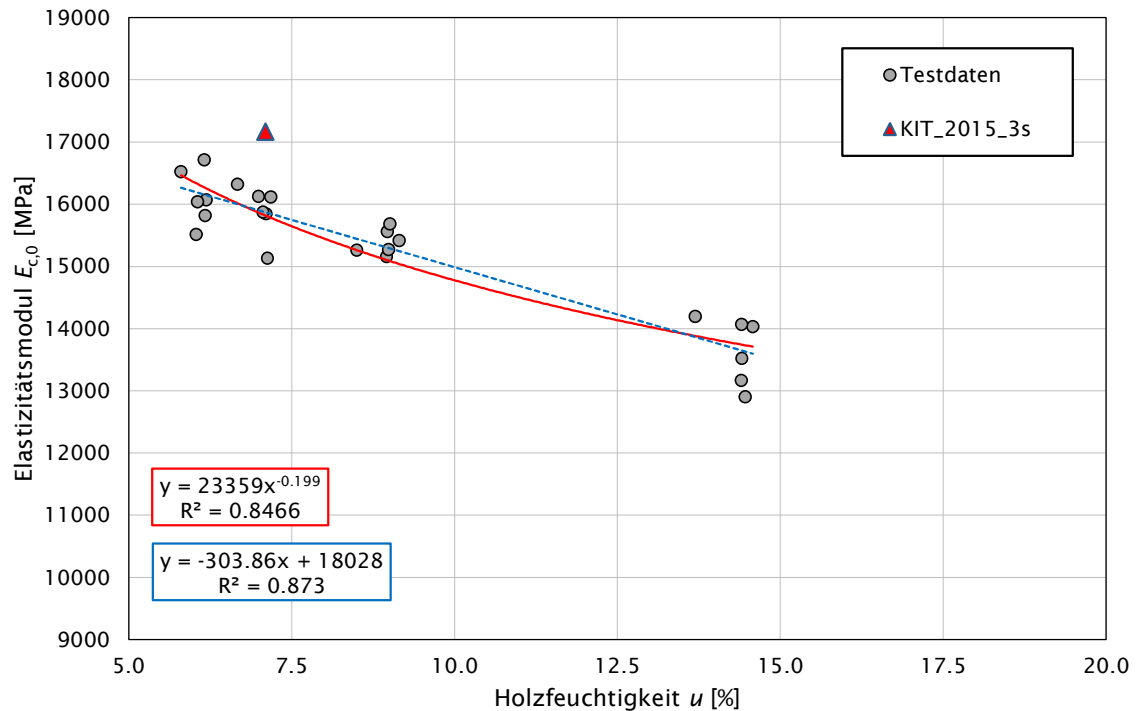


Abb. 45: Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung ($E_{c,0}$) von Buchen FSH der Festigkeitsklasse GL 75 in Abhängigkeit der Holzfeuchte (u). Ergänzend zu den Testdaten aus der vorliegenden Studie sind die Ergebnisse (Mittelwert) früherer Untersuchungen am Karlsruher Institut für Technologie («KIT») dargestellt.

4.4.7. Übersicht zum Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung von Laubleimholzprodukten

Es wurde gezeigt, dass die Holzfeuchte für sämtliche untersuchten Laubleimholzprodukte einen relativ geringen bzw. keinen Einfluss auf den Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung besitzt. Sowohl eine lineare Funktion als auch eine Exponentialfunktion eignen sich zur Beschreibung des Einflusses. In Tab. 8 sind die resultierenden Exponenten und Bestimmtheitsmasse (R^2) für die Exponentialfunktion, getrennt nach Holzart, Produkt und Festigkeitsklasse und das Bestimmtheitsmass aus der linearen Regressionsanalyse angeführt.

Tab. 8: Übersicht zu den festgestellten Bestimmtheitsmassen R^2 und Exponenten zur Berücksichtigung des Einflusses der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung.

Produkt	Serie	Exponentialfunktion		Lineare Regression
		Exponent	R^2	R^2
BSH aus Buche	GL 48h	-0.232	0.498	0.514
	GL 40h	-0.177	0.388	0.386
	GL 32h	-0.172	0.246	0.242
BSH aus Esche	GL 48h	-0.206	0.268	0.262
	GL 40h	-0.126	0.127	0.131
BSH aus Eiche	GL ?	-0.069	0.007	0.007
BSH aus Kastanie	GL 24h	-0.160	0.070	0.079
BSH aus Fichte	GL 28h	-0.205	0.295	0.294
FSH BauBuche	GL 75	-0.199	0.847	0.873

5. Diskussion

5.1. Charakteristische Werte der Druckfestigkeiten und Mittelwerte des Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung für die Feuchteklassen 1 und 2

Zur Ermittlung der charakteristischen Werte der Druckfestigkeit und der Mittelwerte des Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung für die Feuchteklassen 1 und 2 sollten sämtliche zur Verfügung stehenden Testergebnisse herangezogen werden. Da diese Werte aber bei verschiedenen Holzfeuchte ermittelt wurden – sogar innerhalb eines Klimabereiches «1F - 5F» wurden unterschiedliche Werte für die Holzfeuchte festgestellt – müssen die Ergebnisse zunächst auf geeignete Holzfeuchten umgerechnet werden.

Während die Norm SIA 265 [15] für die Feuchtekategorie 1 eine Holzfeuchte von $u \leq 12\%$ und für die Feuchtekategorie 2 eine Holzfeuchte von $u \leq 20\%$ vorgibt, werden in der EN 1995-1-1 [16] die Umgebungsbedingungen für die Nutzungskategorie 1 ($20^\circ\text{C}/65\%$ LF) und die Nutzungskategorie 2 ($20^\circ\text{C}/85\%$ LF) definiert und lediglich darauf hingewiesen, dass die mittlere Holzfeuchte der meisten Nadelhölzer dabei einen Wert von 12 bzw. 20% nicht übersteigt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Norm SIA 265 in erster Linie für die bis anhin in der überwiegenden Mehrzahl eingesetzten Produkte aus Nadelholz geschrieben wurde.

Da die Ausgleichsfeuchte vom Holzwerkstoff abhängt, wird an dieser Stelle das Vorgehen gemäss EN 1995-1-1 [16] gewählt. Aus Sicht der Autoren ist es nicht sinnvoll, etwa für das Produkt FSH aus Buche für Feuchtekategorie 1 eine Holzfeuchte von 12% anzunehmen, da sich diese in einem Klima von etwa $20^\circ\text{C}/75\%$ LF einstellen würde – damit liesse sich keine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Holzwerkstoffe bei identen Umgebungsbedingungen sicherstellen.

Um die Ausgleichsfeuchten für das Klima $20^\circ\text{C}/65\%$ LF (Nutzungskategorie 1) und $20^\circ\text{C}/85\%$ LF (Nutzungskategorie 2) für die verschiedenen Holzwerkstoffe zu definieren, werden die Daten aus dieser Studie und die Daten aus der Dissertation von Schaffrath [26] herangezogen. Einen Überblick der Ausgleichsfeuchten bietet Tab. 9.

Die gewählten Referenzholzfeuchten für die Nutzungskategorie 1 ($u_{\text{ref-NK1}}$) und die Nutzungskategorie 2 ($u_{\text{ref-NK2}}$) für die verschiedenen Holzwerkstoffe sind in den beiden untersten Zeilen der Tab. 9 ersichtlich. Bei deren Festlegung wurde darauf geachtet, dass diese Werte tendenziell aufgerundet werden (konservative Festlegung) und gleichzeitig nicht allzu viele verschiedene Referenzholzfeuchten definiert werden (im Sinne einer einfachen Anwendung).

Tab. 9: Gemäss diesen Untersuchungen bzw. gemäss Schaffrath [26] für die Nutzungskategorie 1 [16] ($20^\circ\text{C} / 65\%$ relative Luftfeuchte) und Nutzungskategorie 2 ($20^\circ\text{C} / 85\%$) ermittelte Ausgleichsfeuchten von verschiedenen Holzwerkstoffen.

Ausgleichsfeuchte u [%]		Buche BSH	Eiche BSH	Esche BSH	Kastanie BSH	Fichte BSH	Buche FSH
Nutzungs- klasse 1	Diese Studie	10.5%	11.0%	10.1%	11.5%	11.7%	8.9%
	[26] bzw. [27]	11.2%	11.2%	11.4%	-	12.5%	10.6%
Nutzungs- klasse 2	Diese Studie	-	-	13.9%	-	15.9%	-
	[26] bzw. [27]	13.8%	13.1%	14.5%	-	16.5%	17.3%
Ausgleichsfeuchte NK 1		11%	11%	11%	12%	12%	11%
Ausgleichsfeuchte NK 2		15%	15%	15%	17%	17%	15%

Nachdem die Referenzholzfeuchten für die Nutzungsklassen 1 und 2 definiert worden sind, können die Prüfergebnisse auf diese Holzfeuchten umgerechnet werden. Das Vorgehen dabei wird anhand der Druckfestigkeit von BSH aus Buche (GL 48h) erläutert und ist wie folgt:

- Die Exponentialfunktion zur Beschreibung des Einflusses der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit (Gleichung 8; siehe Abb. 28) wird parametrisiert mit dem Basiswert A und dem Exponenten ϑ (Gleichung 9).
- Gleichung 9 wird umgeformt, damit sich die tatsächlich ermittelte Druckfestigkeit $f_{c,0,u}$ bei der bei der Prüfung gemessenen Holzfeuchte u_{test} in die Druckfestigkeit $f_{c,0,u-\text{ref}}$ bei der Referenzholzfeuchte u_{ref} umrechnen lässt (Gleichung 10).
- Da die Exponenten für die verschiedenen Festigkeitsklassen einzelner Holzarten bzw. auch für verschiedene Holzarten sehr ähnlich sind, wird folgende Vereinfachung getroffen (mit Einfluss < 2% auf die Resultate):
 - BSH aus Buche, Esche und Fichte sowie FSH aus Buche: $\vartheta = 0.80$;
 - BSH aus Eiche und Kastanie: $\vartheta = 0.60$.
- Damit lässt sich exemplarisch mit Gleichung 11 eine bei einer Holzfeuchte von 8.1% ermittelte Druckfestigkeit von $f_{c,0,u} = 65.2$ MPa auf die Referenzholzfeuchte in Nutzungsklasse 1 umrechnen, wobei eine Referenzdruckfestigkeit von $f_{c,0,u-\text{ref}} = 51.0$ MPa resultiert.
- Dieses Verfahren wird nun für sämtliche Laubleimholzprodukte sowohl für die Druckfestigkeit als auch für den Druckelastizitätsmodul parallel zur Faser angewendet und die Eigenschaften für die Nutzungsklasse 1 und 2 ($u_{\text{ref-NK}}$ jeweils gemäss Tab. 9) gemäss EN 14358 [28] berechnet.

$$f_{c,0,u,\text{Bu-GL48h}} = 385.97 \cdot u^{-0.819} \quad (8)$$

$$f_{c,0,u} = A \cdot u^{\vartheta} \quad (9)$$

$$A = \frac{f_{c,0,\text{ref}}}{u_{\text{ref}}^{\vartheta}} = \frac{f_{c,0,u}}{u_{\text{test}}^{\vartheta}} \rightarrow f_{c,0,\text{ref}} = f_{c,0,u} \cdot \left(\frac{u_{\text{test}}}{u_{\text{ref}}}\right)^{-\vartheta} \quad (10)$$

$$f_{c,0,\text{ref}} = 65.2 \cdot \left(\frac{8.1}{11}\right)^{0.8} = 51.0 \text{ MPa} \quad (11)$$

Tab. 10: Mittelwerte und 5%-Fraktilwerte der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung für die untersuchten Laubleimholzprodukte in den Nutzungsklassen 1 und 2. Die Berechnung erfolgte gemäss EN 14358 [28].

		Nutzungsklasse 1 (20°C/65%)				Nutzungsklasse 2 (20°C/85%)			
Eigenschaft		$f_{c,0,\text{mean}}$	$f_{c,0,05}$	$E_{c,0,\text{mean}}$	$E_{c,0,05}$	$f_{c,0,\text{mean}}$	$f_{c,0,05}$	$E_{c,0,\text{mean}}$	$E_{c,0,05}$
Festigkeitsklasse		[MPa]	[MPa]	[GPa]	[GPa]	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[GPa]
BSH aus Buche	GL 48h	54.3	48.6	15.6	13.9	42.4	37.9	14.7	13.1
	GL 40h	52.6	48.0	14.5	13.2	41.1	37.5	13.6	12.4
	GL 32h	48.4	44.1	13.7	12.5	37.8	34.4	12.9	11.7
BSH aus Esche	GL 48h	51.1	46.4	15.2	13.8	39.8	36.2	14.3	13.0
	GL 40h	47.9	43.5	14.2	12.9	37.4	33.9	13.4	12.1
BSH aus Eiche	GL 48h	48.2	43.7	11.3	10.2	40.0	36.3	10.9	9.9
BSH aus Kastanie	GL 24h	41.8	37.9	11.8	10.7	33.9	30.8	11.4	10.3
BSH aus Fichte	GL 28h	37.9	34.4	13.0	11.8	28.7	26.0	12.1	11.0
FSH aus Buche	GL 75	51.0	46.6	14.6	13.2	39.8	36.2	13.7	12.4

5.2. Vorschlag von normativen Anpassungen

5.2.1. Definition von Nutzungsklassen bzw. Feuchteklassen – Anpassungen in den Normen EN 1995-1-1 und SIA 265

Die derzeitige Definition der Feuchteklassen in der SIA 265 [15] erfolgt über eine Vorgabe der Holzfeuchte. Dabei wird für die Feuchtekategorie 1 « $u \leq 12\%$ », für die Feuchtekategorie 2 « $u \leq 20\%$ » und für die Feuchtekategorie 3 « $u > 20\%$ » definiert. Dieses Vorgehen war bisher zweckmässig, da in der Baupraxis nahezu ausschliesslich Nadelholzprodukte relevant waren. Für diese Produkte stellen sich die genannten Holzfeuchten in Umgebungsklimas von 20°C/65% LF (Nutzungskategorie 1 gemäss EN 1995-1-1 [16]) bzw. 20°C/85% LF (Nutzungskategorie 2 gemäss EN 1995-1-1 [16]) ein.

In Zukunft werden aller Voraussicht nach allerdings auch zunehmend Laubleimholzprodukte in der Baupraxis Anwendung finden. Wie bereits frühere Studien gezeigt haben [26], wurde auch in dieser Studie bestätigt, dass die Ausgleichsfeuchte von Laubholzprodukten regelmässig unter jener liegt, die im gleichen Umgebungsklima für Nadelholzprodukte zu erwarten sind. Da für unterschiedliche Produkte in ein und derselben Umgebung, etwa im gleichen Raum, dieselben Randbedingungen gelten sollten, ist aus Sicht der Autoren eine Anpassung der Formulierungen in der Norm SIA 265 [15] an diejenigen in der EN 1995-1-1 [16] erforderlich. Neben der Vorgabe des Umgebungsklimas für die verschiedenen Feuchte- bzw. Nutzungsklassen sollten Angaben hinsichtlich der sich dabei einstellenden Holzfeuchten für verschiedene Holzwerkstoffe bzw. Produkte aus Nadelholz und aus Laubholz gemacht werden. Die vorgeschlagenen Referenzholzfeuchten für die untersuchten Laubleimholzprodukte und die Nutzungsklassen 1 und 2 sind in Tab. 11 zusammengefasst.

Tab. 11: Exponenten ϑ_i zur Ermittlung der Druckfestigkeit $f_{c,0}$ bzw. des Elastizitätsmoduls $E_{c,0}$ parallel zur Faserrichtung und Referenzholzfeuchten $u_{ref,NK}$ für die Nutzungsklassen (NK) 1 und 2.

Produkt	Exponent ϑ_i [-]		Referenzholzfeuchte $u_{ref,NK}$ [%]	
	ϑ_1 (für $f_{c,0}$)	ϑ_2 (für $E_{c,0}$)	NK 1	NK 2
BSH aus Buche	0.8	0.2	11	15
BSH aus Esche	0.8	0.2	11	15
BSH aus Eiche	0.6	0.1	11	15
BSH aus Kastanie	0.6	0.1	12	17
BSH aus Fichte	0.8	0.2	12	17
FSH aus Buche	0.8	0.2	11	15

5.2.2. Überprüfung der in der Norm SIA 265 definierten Faktoren η_w zur Berücksichtigung des Holzfeuchteinfluss auf den Tragwiderstand und die Steifigkeit

Die Erfassung des Einflusses der Holzfeuchte auf den Tragwiderstand und die Steifigkeit erfolgt anhand der in der Norm SIA 265 [15] definierten Beiwerte η_w . Wie in Tab. 12 ersichtlich, liegt dieser Beiwert für Vollholz und BSH für den Tragwiderstand bei 0.80 (Feuchtekategorie 2) bzw. 0.60 (Feuchtekategorie 3). Bei der Steifigkeit liegen die Beiwerte bei 0.90 bzw. 0.75.

Für die untersuchten Laubleimholzprodukte wurden sehr ähnliche und tendenziell etwas höhere Beiwerte festgestellt. Für die Feuchtekategorie 2 liegen sie für den Tragwiderstand (im Vergleich zu 0.80) zwischen 0.77 (FSH aus Buche) und 0.83 (BSH aus Eiche) und für die Steifigkeit (im Vergleich zu 0.90) zwischen 0.93 (FSH aus Buche) und 0.97 (BSH aus Kastanie) (Tab. 12). Der Beiwert für BSH aus Fichte wurde zu 0.75 (Tragwiderstand) bzw. 0.93 (Steifigkeit) ermittelt.

Tab. 12: Beiwerte η_w zur Erfassung des Einflusses der Holzfeuchte auf den Tragwiderstand und die Steifigkeit gemäss Norm SIA 265 [15] sowie aus den Versuchen abgeleitete Reduktionsfaktoren.

Produkt	Tragwiderstand		Steifigkeit	
	Feuchtekategorie 2	Feuchtekategorie 3	Feuchtekategorie 2	Feuchtekategorie 3
SIA 265 [15] Vollholz, BSH	0.80	0.60	0.90	0.75
BSH aus Buche	0.78	-	0.94	-
BSH aus Esche	0.78	-	0.94	-
BSH aus Eiche	0.83	-	0.96	-
BSH aus Kastanie	0.81	-	0.97	-
BSH aus Fichte	0.75	-	0.93	-
FSH aus Buche	0.78	-	0.94	-

Es kann daraus gefolgert werden, dass die Verwendung der derzeit in der Norm SIA 265 [15] definierten Beiwerte η_w zu einer angemessenen und tendenziell konservativen Berücksichtigung des Einflusses der Holzfeuchte auf den Tragwiderstand und die Steifigkeit der untersuchten Laubleimholzprodukte bei einer Druckbeanspruchung parallel zur Faserrichtung führt. Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass eine Bestätigung dieser Beiwerte für andere Beanspruchungsarten (z.B. Biege- und Zugbeanspruchung sowie Beanspruchungen quer zur Faserrichtung) im Rahmen dieses Projektes nicht erfolgen kann.

5.2.3. Umrechnung von Prüfergebnissen auf die Referenzholzfeuchten – Anpassungen in der Norm EN 384

Es wurde gezeigt, dass die Feuchtekorrektur von Prüfergebnissen gemäss EN 384 [17] für die Druckfestigkeit (insbesondere über grössere Holzfeuchtebereiche) keine zutreffenden Ergebnisse liefert. Auf Grund der Ergebnisse dieser Studie wird eine Anpassung der Formeln für die Korrektur von Prüfergebnissen hinsichtlich der Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung mit Gleichung 9 und hinsichtlich des Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung mit Gleichung 10 vorgeschlagen.

$$f_{c,0,ref} = f_{c,0,u} \cdot \left(\frac{u}{u_{ref,NK}} \right)^{\vartheta_1} \quad (9)$$

$$E_{c,0,ref} = E_{c,0,u} \cdot \left(\frac{u}{u_{ref,NK}} \right)^{\vartheta_2} \quad (10)$$

Die vorgeschlagenen Referenzholzfeuchten für die Nutzungsklassen 1 und 2 sowie die Exponenten ϑ_i sind in der Tab. 11 angegeben.

5.2.4. Ermittlung der Holzfeuchte – Anpassungen in der Norm EN 13183

Gemäss EN 13183 [25] soll der Prüfkörper zur Bestimmung der Holzfeuchte mit dem Darrverfahren wie folgt gewonnen werden.

[...] Der Prüfkörper muss ein Mass ≥ 20 mm in Faserlängsrichtung haben und den gesamten Querschnitt des Schnittholzes umfassen. Der Prüfkörper wird entnommen als Querriegel von der innen liegenden frischen Schnittfläche eines mindestens 300 mm langen Abschnittes, der von einem der beiden Enden des Schnittholzes abgeschnitten oder aus der Mitte entnommen wurde falls das Schnittholz kürzer als 600 mm ist. [...]

Wie sich in dieser Studie gezeigt hat, liegt in Laubleimholzprüfkörpern auch dann noch keine konstante Holzfeuchte im ganzen Prüfkörper vor, wenn die Massenkonzanz gemäss EN 408 [24] bereits erreicht wurde. Aufgrund des starken Einflusses der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit führen höhere Holzfeuchten nahe des Stirnholzes (bei feuchter Lagerung der Prüfkörper) i.d.R. dazu, dass das Versagen mit hoher Wahrscheinlichkeit in diesen Bereichen auftritt. Wird nun, den Vorgaben der EN 13183 [25] folgend, die Darrprobe aus der Prüfkörpermitte gewonnen, so wird die resultierende niedrige Druckfestigkeit im Randbereich mit einer niedrigeren Holzfeuchte in Prüfkörpermitte verbunden.

Um die Parameter «Holzfeuchte» und «Druckfestigkeit» möglichst realitätsnah miteinander zu verknüpfen, wird folgende Änderung der Beschreibung zur Gewinnung der Darrproben vorgeschlagen:

Der Prüfkörper muss ein Mass ≥ 20 mm in Faserlängsrichtung haben und den gesamten Querschnitt des Schnittholzes umfassen. Der Prüfkörper wird an jener Stelle entnommen, an der das Versagen aufgetreten ist. Ist dies aufgrund der Beschaffenheit der Bruchzone nicht möglich (zum Beispiel Splitterbruch), ist der Prüfkörper an der nächstmöglichen, in Richtung Prüfkörpermitte gelegenen, Stelle zu gewinnen.

5.2.5. Klimatisierung und Prüfung – Anpassungen in der Norm EN 408

Gemäss EN 408 gilt folgendes hinsichtlich der Klimatisierung von Prüfkörpern:

Ein Prüfkörper ist klimatisiert, wenn er Massenkonzanz erreicht hat. Massenkonzanz gilt als erreicht, wenn die Ergebnisse zweier Wägungen innerhalb von 6 h um nicht mehr als 0.1% der Masse des Prüfkörpers voneinander abweichen.

Wie sich in dieser Studie gezeigt hat, lässt sich mit zwei Wägungen mit einem Abstand von 6 h für Laubleimholzprodukte die Massenkonzanz nicht gewährleisten. Auch wenn die Masse der beiden Wägungen um weniger als 0.1% voneinander abwichen, wurden einige Wochen später bei neuerlichen Wägungen Änderungen von mehr 0.5% beobachtet. Ebenfalls wurden – in gemäss EN 408 [24] massenkonstanten Prüfkörpern – später Unterschiede von bis zu 2% bei der Holzfeuchte im Stirnholzbereich im Vergleich zur Holzfeuchte in der Prüfkörpermitte festgestellt. Eine Verlängerung jener Periode, in der das Ergebnis zwischen zwei Wägungen um nicht mehr als 0.1% der Masse voneinander abweichen darf, wird angeregt. Anstelle von 6 h sollten etwa 48 h vorgesehen werden.

6. Danksagung

Dieses Projekt erfuhr eine massgebliche finanzielle Unterstützung vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) und den Kantonen im Rahmen der Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz (WHFF-CH). Diese Unterstützung sei im Namen sämtlicher Projektbeteiligter verdankt.

7. Literatur

- [1] BAFU (2019) Jahrbuch Wald und Holz 2019. Bern, Schweiz.
- [2] Lignum, Holzwirtschaft Schweiz (2019) Argumente für Holz. Zürich, Schweiz.
- [3] Allgaier-Leuch, B; Streit, K; Brang, P (2017) Der Schweizer Wald im Klimawandel - Welche Entwicklungen kommen auf uns zu?
- [4] Egner, K; Kolb, H (1966) Geleimte Träger und Binder aus Buchenholz. Bauen mit Holz, vol. 68, pp. 147-154.
- [5] Gehri, E (1980) Möglichkeiten des Einsatzes von Buchenholz für Tragkonstruktionen. Schweizer Bauwirtschaft, vol. November.

- [6] Wehrmann, W; Torno, S (2015) Laubholz für tragende Konstruktionen - Zusammenstellung zum Stand von Forschung und Entwicklung. München, Deutschland.
- [7] Steiger, R; Frangi, A; Kobel, P (2013) WHFF-Projekt 2011.17 - Brettschichtholz Aus Laubholz: Marktimplementierung als Bauprodukt – Schlussbericht, Zürich, Schweiz.
- [8] Clauss, S; Hänsch, D; Michel, F; Niemz, P (2013) Ermittlung elastomechanischer Kennwerte von Eschenholz - Forschungsbericht für das Kuratorium des Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung Nr. 2012.10, Zürich, Schweiz.
- [9] Ozyhar, T (2013) Moisture and time-dependent orthotropic mechanical characterization of beech wood. Dissertation, ETH Zürich.
- [10] Steiger, R; Ehrhart, T; Frangi, A; Clerc, G; Lehmann, M; Volkmer, T (2020) Abschlussbericht: Homogenes und kombiniertes Buchen-Brettschichtholz - Technische Grundlagen zur Marktimplementierung als Bauprodukt für Biegeträger und Stützen; Projekt-Nr.: REF-1011-04200; AP-Holz Projekt - BAFU, Dübendorf, Schweiz.
- [11] Westermayr, W; Stapel, P; Van de Kuilen, JWG (2018) Tensile and compression strength of small cross section beech glulam members. Paper 51-12-2, International Network on Timber Engineering Research - Meeting Fifty-One, pp. 307–322, Tallinn, Estland.
- [12] Österreichisches Institut für Bautechnik (2013) ETA-13/0642 - Leistungserklärung VI-GAM Brettschichtholz aus Eiche ohne Schutzmittelbehandlung.
- [13] Neue Holzbau AG (2015) Leistungs- (M-HB-4.H12.05) und Herstellererklärung (M-HB-4.H12.06) für Brettschichtholz aus Nadel- und Laubholz (Esche und Buche). Lungern, Schweiz.
- [14] Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. (2009) Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für BS-Holz aus Buche und BS-Holz Buche-Hybridträger.
- [15] SIA 265 / SN505 265 (2012) Timber Structures.
- [16] EN 1995-1-1 (2010) Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brüssel, Belgien.
- [17] EN 384 (2019) Structural Timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density. European Committee for Standardization, Brüssel, Belgien.
- [18] prEN 14080-2 (n.d.) Timber structures - Part 2: Glued laminated timber and glued laminated solid timber made of hardwood - Requirements. European Committee for Standardization, Brüssel, Belgien.
- [19] Österreichisches Institut für Bautechnik (2018) Europäische Technische Bewertung ETA-14 / 035.
- [20] Wagenführ, R (2006) Holzatlas, 6. Edition. Carl Hanser Verlag, Dresden, Deutschland.
- [21] Ehrhart, T; Fink, G; Steiger, R; Frangi, A (2016) Strength grading of European beech lamellas for the production of GLT and CLT. Paper 49-5-1, International Network on Timber Engineering Research - Meeting Forty-Nine, pp. 29–43, Graz, Österreich.
- [22] Bedelek, E (2019) Caractérisation mécanique du bois de châtaigner. Masterarbeit, HEIG-VD, Yverdon-les Bains, Schweiz.
- [23] EN 14080 (2013) Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements. European Committee for Standardization, Brüssel, Belgien.
- [24] EN 408 (2012) Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. European Committee for Standardization, Brüssel, Belgien.
- [25] EN 13183-1 (2002) Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren. European Committee for Standardization, Brüssel, Belgien.

- [26] Schaffrath, J (2015) Untersuchungen zu Feuchtetransportvorgängen und feuchteinduzierten Verformungen sowie Spannungen bei Betrachtung verschiedener Holzarten und unterschiedlicher klimatischer Randbedingungen. Dissertation, TU München, Deutschland.
- [27] Benthien, JT; Riegler, M; Engehausen, N; Nopens, M (2020) Specific Dimensional Change Behavior of Laminated Beech Veneer Lumber (BauBuche) in Terms of Moisture Absorption and Desorption. Fibers, vol. 8, no. 7.
- [28] EN 14358 (2016) Timber structures - Calculation and verification of characteristic values. European Committee for Standardization, Brüssel, Belgien.