



Homogenes und kombiniertes Buchen-Brettschichtholz

**Technische Grundlagen zur Marktimplementierung als Bauprodukt
für Biegeträger und Stützen**

Projekt-Nr.: REF-1011-04200

Schlussbericht

Klassifizierung: Öffentlich



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Datum: 29.06.2020

Bundesamt für Umwelt BAFU

Fördergeber: Aktionsplan Holz, BAFU

Adressen der
Forschungsstellen: ¹⁾ Empa, Materials Science and Technology
Abt. Ingenieur-Strukturen
Ueberlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
www.empa.ch

³⁾ Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau
Solothurnstrasse 102
CH-2504 Biel
www.ahb.bfh.ch

²⁾ ETH Zürich
Inst. für Baustatik u. Konstruktion
Stefano-Francini-Platz 5
CH-8093 Zürich
www.ethz.ch

Verfasser: Thomas Ehrhart^{1,2)}, René Steiger¹⁾, Andrea Frangi²⁾, Gaspard Clerc³⁾, Martin Lehman³⁾ und Thomas Volkmer³⁾

Projektleiter: René Steiger¹⁾

Kurzfassung

Das Ziel des Projekts war es, durch die Angabe von Eigenschaftswerten, Bemessungsgrundlagen und von Anforderungen an die Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle für die gesamte Produktionskette die technischen Rahmenbedingungen zu schaffen, dass homogenes und kombiniertes Buchen-Brettschichtholz der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und eventuell GL55 vermehrt als qualitätsgesichertes Bauprodukt in Form von Biegeträgern und Stützen in der Feuchtekategorie 1 (bzw. Nutzungsklasse 1 gemäss EC 5) eingesetzt werden kann. Im Projekt sollten sämtliche Prozess-Schritte bei der Produktion von Buchen-Brettschichtholz untersucht werden.

Das Projektteam setzte sich zusammen aus Forschungsinstituten (Empa, Abt. Ingenieur-Strukturen; ETH Zürich, Inst. für Baustatik & Konstruktion und Berner Fachhochschule / Inst. für Werkstoffe und Holztechnologie), Sägereien (Corbat Holding SA, Vendlincourt; Richard Löttscher AG, Burgdorf; Sägerei Koller, Attelwil; Konrad Keller AG, Unterstammheim), Sortiermaschinen-Herstellern (Microtec GmbH, Bressanone/Brixen (Italien); Brookhuis Applied Technologies WOOD, Enschede (Niederlande)), der BSH-produzierenden Firma Neue Holzbau AG, Lungern, den Klebstoff-Lieferanten DeMeth GmbH, Einsiedeln und Henkel & Cie. AG, Sempach Station, sowie dem Fachverband Holzindustrie Schweiz.

Im Projekt konnten indikative Parameter identifiziert und zugehörige Grenzwerte festgelegt werden, welche die zuverlässige Festigkeitssortierung von Buchenbrettern in die Zugfestigkeitsklassen T22, T33, T42 und T50 erlauben. Es wurde eine Methode entwickelt, mit welcher es möglich ist, die von blossem Auge nur schwierig erkennbare, für die Zugfestigkeit von Buchen-Brettern jedoch äusserst wichtige Schrägfärsigkeit, apparativ zu bestimmen.

Es hat sich gezeigt, dass es möglich ist, auf einer Produktionsanlage für Brettschichtholz aus Nadelholz, Buchen-Brettschichtholz herzustellen. Die entsprechenden Keilzinkenprofile und die Ausführung der Keilzinkung mit einem 1K-PUR-Klebstoff in Zonen ohne Äste und Schrägfärsigkeit, sowie die Berücksichtigung der Schnittart der Bretter bei der Festlegung der Einstellparameter, führten zu Keilzinkenfestigkeiten, welche ausreichen, um Buchen-Brettschichtholz der Festigkeitsklassen GL40 und GL48 zu produzieren. Die Anforderungen für GL55 wurden ebenfalls erreicht. Für diese hohe Festigkeitsklasse ist allerdings Optimierungspotential bei der Keilzinkung vorhanden.

Sowohl mit einem für die Verklebung von Buche zugelassenen PRF-Klebstoffsysteem, als auch mit einem 1K-PUR-Klebstoff in Kombination mit einem Primer, ist es möglich, ausreichend schubfeste und delaminierungsbeständige Flächenverklebungen von Buchen-Brettern für die Produktion von Brettschichtholz der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55 zu realisieren.

In den Biegeversuchen an den Buchen-Brettschichtholzträgern ergaben sich charakteristische Werte der Biegefestigkeit, welche den Ziel-Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55 entsprachen bzw. diese übertrafen. Bei den Prüfkörpern der Festigkeitsklasse GL55 waren in den allermeisten Fällen Keilzinkenbrüche für das Versagen der Träger massgebend. Neben den Keilzinkungen zeigte sich die Schrägfärsigkeit auch bei den Trägern als ein die Festigkeit massgeblich beeinflussender Parameter.

Die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung wurde an gedrungenen Stützen mit verschieden grossen Querschnittsabmessungen ermittelt und liegt für die Brettschichtholz-Festigkeitsklassen GL40h, GL48h und GL55h zwischen 58.2 und 65.8 N/mm² (Mittelwert). Die Bruchwerte

streuten nur wenig und das Versagen war äusserst duktil. Knickversuche an 2.40 und 3.60 m langen, beidseitig gelenkig gelagerten Stützen mit Querschnittsabmessungen von 200 mm × 200 mm zeigten, dass die Anwendung der für Brettschichtholz aus Nadelholz gültigen Knickkurven zur Bemessung von Buchen-Brettschichtholz-Stützen zu Ergebnissen auf der unsicheren Seite führt. Eine Festlegung der Knickkurven für Nadelholz- und Buchen BSH basierend auf denselben Grundlagen (insb. betreffend der zu berücksichtigenden Imperfektionen) sollte angestrebt werden. Für Buchen-Brettschichtholz wurden im Projekt angepasste Knickkurven mit korrigierten Beiwerten β_c und $\lambda_{rel,0}$ vorgeschlagen.

Zugversuche an Bündeln, bestehend aus mindestens 3 verklebten Lamellen, können die deutlich aufwendigeren Biegeversuche ersetzen, sofern die Prüfkörper eine bezüglich Lage und Anzahl repräsentative Verteilung der Keilzinkenverbindungen in den einzelnen Lamellen aufweisen. Das Verhältnis zwischen den charakteristischen Werten der Zugfestigkeit parallel zur Faserrichtung und der Biegefestigkeit liegt zwischen 0.92 (GL40, GL48) und 0.96 (GL55) und damit höher als der in der EN 14080:2013 erwähnte Wert für Brettschichtholz aus Nadelholz.

Die Ermittlung der Schubfestigkeit der Buchen-Brettschichtholzträger bereitete Schwierigkeiten, da es zurzeit noch kein standardisiertes Verfahren gibt und weil die lokal in die Prüfkörper einzuleitenden Kräfte auf Grund der sehr hohen Schubfestigkeit sehr gross sind. Im Projekt wurden verschiedene Arten von Schubversuchen durchgeführt und verglichen und es wurde eine neue Prüfkonfiguration (asymmetrischer 4-Punkt-Biegeversuch) entwickelt. Die ermittelten Schubfestigkeiten lagen je nach Art der Prüfung zwischen 8 N/mm² (Druckscherversuch) und 17 N/mm² (3-Punkt-Biegeversuch an Trägern mit kurzer Spannweite und I-Querschnitt und von geringer Höhe ($h = 200$ mm)). Um Schubbrüche in der Praxis zu verhindern, sollten die Bemessungswerte der Schubfestigkeit entsprechend vorsichtig festgelegt werden. Sie liegen dann aber immer noch deutlich höher als bei Brettschichtholz aus Nadelholz.

Sowohl die Biegefestigkeit als auch die Schubfestigkeit von Buchen-Brettschichtholz unterliegen einem Volumeneinfluss in analoger Größenordnung zu Brettschichtholz aus Nadelholz. Aus den Versuchen konnten Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung des Einflusses der Bau teilgrösse auf die Biege- und auf die Schubfestigkeit angegeben werden.

Zusammenfassend haben die Projektergebnisse gezeigt, dass es mit entsprechenden Massnahmen in der Produktion (Trocknung und Festigkeitssortierung der Bretter; Keilzinkung (in ungestörten Zonen der Bretter) und Flächenverklebung mit geeigneten Klebstoffsystemen) möglich ist, Buchen-Brettschichtholz der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55 herzustellen.

Festzuhalten ist, dass mit den Ergebnissen des hier vorgestellten Projekts die Anwendung von Buchen-Brettschichtholz lediglich in der Feuchte- bzw. Nutzungsklasse 1 abgedeckt ist. Versuche zur Dauerhaftigkeit oder zum Einfluss der Holzfeuchte auf die Festigkeiten und Steifigkeiten waren nicht geplant und sind auch nicht durchgeführt worden.

Die Produktion von Buchen-Brettschichtholz muss analog zu derjenigen von Brettschichtholz aus Nadelholz qualitätsgesichert und -kontrolliert erfolgen. Es gibt derzeit allerdings noch keine Europäische Produktnorm für Brettschichtholz aus Laubholz. Die EN 14080, welche die Anforderungen an die Produktion von Brettschichtholz und Balkenschichtholz aus Nadelholz regelt, kann als Richtschnur dienen. Allerdings gilt es zu beachten, dass die Ansprüche an die Keilzinken-Verbindungen, die Flächenverklebung, die Holzfeuchte etc. deutlich höher sind als bei Nadelholz.

Abstract

The aim of the project was to create the technical framework conditions for the entire production chain of European beech (*Fagus sylvatica* L.) glued laminated timber (glulam). By specifying property values, design bases and requirements for quality assurance and quality control, homogeneous and combined beech glulam of the strength classes GL40, GL48 and possibly GL55 can be increasingly used as a quality-assured building product in the form of beams and columns in service class 1 (according to EC 5). In the project, all process steps in the production of beech glulam were investigated.

The project team consisted of three research institutes (Empa, Structural Engineering Research Laboratory; ETH Zürich, Inst. of Structural Engineering and Bern University of Applied Sciences, Inst. for Materials and Wood Technology), four sawmills (Corbat Holding SA, Vendlin-court; Richard Lötscher AG, Burgdorf; Koller sawmill, Attelwil; Konrad Keller AG, Unterstammheim), two strength grading machine manufacturers (Microtec GmbH, Bressanone/Brixen (Italy); Brookhuis Applied Technologies WOOD, Enschede (Netherlands)), the glulam producer Neue Holzbau AG, Lungern, the adhesives supplier DeMeth GmbH, Einsiedeln and Henkel & Cie. AG, Sempach Station, and the Swiss Wood Industry Association.

In the project, indicative parameters for the tensile strength and stiffness could be identified and corresponding limit values were defined. The defined rules allow the reliable strength grading of beech boards into the tensile strength classes T22, T33, T42 and T50. A method has been developed for the automated determination of the fibre orientation, which is difficult to detect with the naked eye but is extremely important for the tensile strength of beech boards.

It has been shown that it is possible to produce beech glulam on a production line for glulam made of softwood. The corresponding finger-joint profiles and the execution of finger-jointing with a 1-component PUR adhesive in zones without knots and obvious fibre deviations, as well as the consideration of the sawing pattern of the boards when determining the machine setting, resulted in finger-joint strengths sufficient to produce beech glulam of the strength classes GL40 and GL48. The requirements for GL55 were also achieved. However, for this high strength class, there is potential for optimization of finger-jointing.

It is possible to achieve sufficiently shear-resistant and delamination-resistant surface bonding of beech boards for the production of glulam of strength classes GL40, GL48 and GL55 with both a PRF adhesive system approved for gluing European beech, and a 1-component PUR adhesive in combination with a primer.

In the bending tests on beech glulam beams, characteristic values of bending strength were obtained corresponding to or exceeding the target values of strength classes GL40, GL48 and GL55. In most cases, finger-joint failures were decisive for the failure of the GL55 beams. In addition to the finger-joints, fibre deviations in the laminations located at the bottom edge of the beams, i.e., subjected to tensile stresses, were found to significantly influence the strength of the beam.

The compressive strength parallel to the grain was determined by means of compression tests on stocky columns with different cross-sectional dimensions. The achieved strengths were between 58.2 and 65.8 N/mm² (mean value) for the strength classes GL40h, GL48h and GL55h. The stresses at failure scattered only slightly and the failure was ductile.

Buckling tests on 2.40 and 3.60 m long slender columns with pinned connections at both ends and cross-sectional dimensions of 200 mm \times 200 mm showed that the application of the EC 5 buckling curves valid for softwood glulam leads to results on the unsafe side when applied to design beech glulam columns. A determination of the buckling curves for softwood and beech glulam based on the same principles (especially regarding the imperfections to be considered) should be aimed at. For beech glulam, the project proposed adapted buckling curves with corrected coefficients β_c and $\lambda_{rel,0}$.

Tensile tests on bundles consisting of at least three glued lamellae can replace the considerably more complex bending tests, provided that the test specimens show a distribution of finger-joints in the individual lamellae, which is representative with regard to position and number. The empirical ratio between the characteristic values of tensile strength parallel to the grain and bending strength is between 0.92 (GL40, GL48) and 0.96 (GL55) and thus higher than the value mentioned in EN 14080:2013 for softwood glulam.

The determination of the shear strength of beech glulam posed difficulties because there is currently no standardized method available and because the forces to be introduced locally into the test specimens are very large due to the high shear strength. In the project, different types of shear tests were performed and compared and a new test configuration (asymmetrical 4-point bending test) was developed. Depending on the type of test, the shear strengths determined ranged between 8 N/mm² (block shear test) and 17 N/mm² (3-point bending test on beams with a short span and I-cross section and of low height ($h = 200$ mm)). In order to prevent shear failures in practice, the design value of shear strength should be specified with appropriate care. However, it will still be significantly higher than for glulam made of softwood.

Both the bending strength and the shear strength of beech glulam are subject to a volume influence of the same order of magnitude as that of softwood glulam. From the tests, correction factors were determined that allow for taking into account the influence of the member size on the bending and shear strength.

In summary, the project results have shown that with appropriate measures in production (drying and strength grading of the boards; finger-jointing (in undisturbed zones of the boards) and surface bonding with suitable adhesive systems) it is possible to produce European beech glulam of strength classes GL40, GL48 and GL55.

It should be noted that with the results of the project presented here, the application of beech glulam is only covered in service class 1. Tests on the durability or the influence of wood moisture on the strength and stiffness were not part of the project and have not been carried out.

The production of beech glulam has to be quality-assured and -controlled analogous to the production of glulam made from softwood. However, there is currently no European product standard for glulam from hardwood. EN 14080, which regulates the requirements for the production of glulam and laminated beams made of softwood, can serve as a guideline. However, it should be noted that the requirements for finger-joints, surface bonding, wood moisture etc. are significantly higher than for softwood.

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG.....	1
EINLEITUNG.....	13
TECHNISCHER SCHLUSSBERICHT MODUL 1.....	25
Festlegung massgeblicher Projektparameter	
TECHNISCHER SCHLUSSBERICHT MODUL 2.....	39
Rohmaterialverarbeitung	
TECHNISCHER SCHLUSSBERICHT MODUL 3.....	71
Lamellenproduktion und Flächenverklebung	
TECHNISCHER SCHLUSSBERICHT MODUL 4.....	75
Experimentelle Ermittlung der mechanischen Eigenschaften des BSH	
TECHNISCHER SCHLUSSBERICHT MODULE 5 UND 6.....	129
M5: Festlegung von kennzeichnenden Eigenschaften und Bemessungswerten für Buchen-BSH der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55	
M6: Zusätzliche wesentliche Grundlagen für die Bemessung von Bauteilen	
TECHNISCHER SCHLUSSBERICHT MODUL 7.....	167
Festlegung massgeblicher Projektparameter	

Homogenes und kombiniertes Buchen-Brettschichtholz

Technische Grundlagen zur Marktimplementierung als Bauprodukt für Biegeträger und Stützen

**Bundesamt für Umwelt BAFU
Aktionsplan Holz**

Projekt REF-1011-04200

Schlussbericht

Zusammenfassung

René Steiger
Thomas Ehrhart

Empa, Abt. Ingenieur-Strukturen
ETH Zürich

Inhaltsverzeichnis

1 ZUSAMMENFASSUNG	5
1.1 PROJEKTZIEL	5
1.2 PROJEKTTIME	5
1.3 METHODE	6
1.4 ERGEBNISSE	7
1.5 PUBLIKATIONEN	11
1.6 UMSETZUNG DER PROJEKTERGEBNISSE	11

1 Zusammenfassung

1.1 Projektziel

Das Ziel des Projekts war es, durch die Angabe von Eigenschaftswerten, Bemessungsgrundlagen und von Anforderungen an die Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle für die gesamte Produktionskette die technischen Rahmenbedingungen zu schaffen, dass homogenes und kombiniertes Buchen-Brettschichtholz der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und eventuell GL55 vermehrt als qualitätsgesichertes Bauprodukt in Form von Biegeträgern und Stützen in der Feuchtekategorie 1 (bzw. Nutzungsklasse 1 gemäss EC 5) eingesetzt werden kann. Im Projekt sollten die folgenden Prozess-Schritte bei der Produktion von Buchen-Brettschichtholz untersucht werden:

- Festigkeitssortierung von Buchenbrettern in T-Klassen (Sortierung nach der Zugfestigkeit) für die Produktion von Brettschichtholz der untersuchten Festigkeitsklassen und Anforderungen an die Qualitätskontrolle des Festigkeitssortier-Prozesses in der Sägerei;
- Keilzinkung von Buchen-Brettern zu Lamellen im Brettschichtholz-produzierenden Betrieb und Flächenverklebung von Buchen-Lamellen im Rahmen der Brettschichtholz-Produktion unter industriellen Bedingungen;
- Ermittlung der mechanischen Eigenschaften (Biegefestigkeit und Schubfestigkeit, Druck- und Zugfestigkeit parallel zur Faserrichtung, sowie der zugehörigen Steifigkeiten) von Buchen-Brettschichtholz in Biege-, Druck- und Zugversuchen;
- Festlegung von kennzeichnenden Eigenschaften und Bemessungswerten für Buchen-Brettschichtholz analog zur Tabelle 7 der Norm SIA 265:2012, welche entsprechende Werte für Brettschichtholz aus Nadelholz angibt;
- Festlegung von weiteren, für die Bemessung von Biegeträgern und -stützen aus Buchen-Brettschichtholz nötigen Angaben (z. B. Knickbeiwerte, Faktoren zur Berücksichtigung des Einflusses des Bauteilvolumens auf die Biege- und die Schubfestigkeit).

1.2 Projektteam

Das Projektteam setzte sich zusammen aus Forschungsinstituten (Empa, Abt. Ingenieur-Strukturen; ETH Zürich, Inst. für Baustatik & Konstruktion und Berner Fachhochschule / Inst. für Werkstoffe und Holztechnologie), Sägereien (Corbat Holding SA, Vendlincourt; Richard Löttscher AG, Burgdorf; Sägerei Koller, Attelwil; Konrad Keller AG, Unterstammheim), Sortiermaschinen-Herstellern (Microtec GmbH, Bressanone/Brixen (Italien); Brookhuis Applied Technologies WOOD, Enschede (Niederlande)), der BSH-produzierenden Firma Neue Holzbau AG, Lungern, den Klebstoff-Lieferanten DeMeth GmbH, Einsiedeln und Henkel & Cie. AG, Sempach Station, sowie dem Fachverband Holzindustrie Schweiz.

Das Projekt wurde begleitet durch:

- Frau Dr. Ulrike Krafft und Herr Werner Riegger, BAFU, Abteilung Wald;
- Prof. Emeritus Ernst Gehri, Rüschlikon;
- Herr Dipl. Holzbauing. FH/SIA Markus Zimmermann, IHT Rafz Ingenieurholzbau + Holzbautechnik GmbH;
- Herr Dipl. Ing. HTL Urs Christian Luginbühl, Holzindustrie Schweiz.

Die Projektleitung lag bei der Empa.

1.3 Methode

Die angewandte Methodik bestand aus Literaturstudium, Versuchsplanung, Experimenten, Datenauswertung mit den Methoden der beschreibenden Statistik, ergänzende Untersuchungen mit numerischen Modellen (Finite Elemente), graphische und tabellarische Darstellung der Ergebnisse und Berichterstattung.

Die Projektarbeit erfolgte gegliedert in die folgenden 8 Module:

- Modul 1: Bestätigung von Zielsetzung, Inhalt und Umsetzung des Projekts
- Modul 2: Rohmaterialverarbeitung
- Modul 3: Lamellenproduktion und Flächenverklebung
- Modul 4: Experimentelle Ermittlung der mechanischen Eigenschaften des BSH
- Modul 5: Festlegung von kennzeichnenden Eigenschaften und Bemessungswerten für Buchen-BSH der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55
- Modul 6: Zusätzliche wesentliche Grundlagen für die Bemessung von Bauteilen
- Modul 7: Umsetzung der Projektergebnisse
- Modul 8: Schlussberichte

Zur Projektkontrolle und -steuerung wurden Meilensteine wie folgt eingeführt:

- Meilenstein 1 im Modul 2: Untersuchungen zur Bereitstellung des Rohmaterials:
→ Ausreichend hohe und ausreichend wirtschaftliche Ausbeute?
- Meilenstein 2 im Modul 2: Mechanische Eigenschaften der Bretter:
→ Ausreichend hohe Zugsteifigkeiten und -festigkeiten zur Herstellung von Brettschichtholz der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55?
- Meilenstein 3 im Modul 3: Mechanische Eigenschaften der Keilzinkenverbindungen:
→ Ausreichend hohe Zugsteifigkeiten und -festigkeiten zur Herstellung von Brettschichtholz der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55?
- Meilenstein 4 im Modul 3: Untersuchungen zur Flächenverklebung:
→ Ausreichend hohe Schubfestigkeiten und Beständigkeit gegen Delaminierung zur Herstellung von Brettschichtholz der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55 in Feuchtelasse 1?
- Meilenstein 5 im Modul 4: Ermittlung der Festigkeitseigenschaften von BSH-Trägern:
→ Werden die kennzeichnenden Werte für Brettschichtholz der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55 erreicht?

Zu sämtlichen Modulen 1 – 7 wurde ein technischer Bericht (siehe die entsprechenden Kapitel des vorliegenden Schlussberichts) verfasst. Mit Ausnahme der Module 5 – 7 wurden die Module jeweils mit einer Startsitzung begonnen und mit einer Schlusssitzung beendet. An den Schlusssitzungen wurde jeweils beurteilt, ob die formulierten Meilensteine erreicht worden waren, was für sämtliche Meilensteine der Fall war.

1.4 Ergebnisse

Im Projekt wurden die folgenden Ergebnisse erzielt:

- Es konnten indikative Parameter identifiziert und zugehörige Grenzwerte festgelegt werden, welche die zuverlässige Festigkeitssortierung von Buchenbrettern in die Zugfestigkeitsklassen T22, T33, T42 und T50 erlauben. Neben den visuellen Parameter Astigkeit und Schrägfärsigkeit, ist insbesondere der dynamische Elastizitätsmodul bei der Festigkeitssortierung der Bretter zu berücksichtigen. Die Dichte als Einzelkriterium ist bezüglich Festigkeit wenig aussagekräftig, fließt jedoch in die Berechnung des dynamischen Elastizitätsmoduls ein.
- Es wurde eine Methode entwickelt, mit welcher es möglich ist, die von blossem Auge nur schwierig erkennbare, für die Zugfestigkeit von Buchen-Brettern jedoch äußerst wichtige Schrägfärsigkeit, apparativ zu bestimmen.
- Es hat sich gezeigt, dass es möglich ist, auf einer Produktionsanlage für Brettschichtholz aus Nadelholz, Buchen-Brettschichtholz herzustellen. Die entsprechenden Keilzinkenprofile und die Ausführung der Keilzinkung mit einem 1K-PUR-Klebstoff in Zonen ohne Äste und Schrägfärsigkeit, sowie die Berücksichtigung der Schnittart der Bretter bei der Festlegung der Einstellparameter, führten zu Keilzinkenfestigkeiten, welche ausreichen, um Buchen-Brettschichtholz der Festigkeitsklassen GL40 und GL48 zu produzieren. Die Anforderungen für GL55 wurden ebenfalls erreicht. Für diese hohe Festigkeitsklasse ist allerdings Optimierungspotential bei der Keilzinkung vorhanden. Im Rahmen der Qualitätskontrolle der Keilzinkenverbindungen sind Zugversuche Biegeversuchen vorzuziehen.
- Sowohl mit einem für die Verklebung von Buche zugelassenen PRF-Klebstoffsysteem, als auch mit einem 1K-PUR-Klebstoff in Kombination mit einem Primer, ist es möglich, ausreichend schubfeste und delaminierungsbeständige Flächenverklebungen von Buchen-Brettern für die Produktion von Brettschichtholz der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55 zu realisieren. Da es für die Prüfung des Widerstands gegen Delamination keine Grenzwerte für Buche gab, musste auf die Anforderungen für Nadelholz-Verklebungen zurückgegriffen werden.
- In den Biegeversuchen an den Buchen-Brettschichtholzträgern ergaben sich charakteristische Werte der Biegefestigkeit, welche den Ziel-Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55 entsprachen bzw. diese übertrafen (Tabelle 1). Bei den Prüfkörpern der Festigkeitsklasse GL55 waren in den allermeisten Fällen Keilzinkenbrüche für das Versagen der Träger massgebend. Neben den Keilzinkungen zeigte sich die Schrägfärsigkeit auch bei den Trägern als ein weiterer die Festigkeit massgeblich beeinflussender Parameter.
- Die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung wurde an gedrungenen Stützen mit verschiedenen grossen Querschnittsabmessungen ermittelt und liegt für die Brettschichtholz-Festigkeitsklassen GL40h, GL48h und GL55h zwischen 58.2 und 65.8 N/mm² (Mittelwert) (Tabelle 1). Die Bruchwerte streuen nur wenig und das Versagen war äußerst duktil.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse der im Modul 4 durchgeführten Biege-, Zug-, Druck- und Schubversuche. Die angegebenen Werte beziehen sich auf eine Holzfeuchte von $u = 8 \pm 2\%$. Detaillierte Diskussion der Ergebnisse siehe Berichtsteil zum Modul 4.

<u>Biegefestigkeit und lokaler Biege E-Modul</u>	Festigkeitsklasse	GL40c	GL48c	GL48c	GL48c	GL48c	GL55c
	Trägerhöhe [mm]	$h = 400$	$h = 200$	$h = 400$	$h = 600$	$h = 800$	$h = 400$
	Prüfkörperanzahl	$n = 7$	$n = 7$	$n = 7$	$n = 7$	$n = 4$	$n = 7$
<u>Zugfestigkeit und Zug E-Modul</u>	$f_{m,g,mean}$ MPa	63.1	78.2	63.1	59.5	58.1	66.1
	$f_{m,g,05}$ MPa	52.7	64.4	57.9	49.2	50.4	56.5
	$E_{m,g,mean}$ MPa	14'200	14'900	15'800	15'200	15'600	16'200
	$E_{m,g,05}$ MPa	13'700	14'100	15'300	14'300	15'400	15'400
	ρ_{mean} kg/m ³	679	696	689	693	706	689
	ρ_{05} kg/m ³	667	685	669	683	689	674
<u>Druckfestigkeit und Druck E-Modul</u>	Festigkeitsklasse	GL40h		GL48h			GL55h
	Anzahl an Lamellen	3 Lagen		3 Lagen			3 Lagen
	Prüfkörperanzahl	$n = 7$		$n = 7$			$n = 7$
	$f_{t,0,g,mean}$ MPa	43.7		53.3			57.7
	$f_{t,0,g,05}$ MPa	36.6		44.3			52.9
	$E_{t,0,g,mean}$ MPa	15'200		15'500			17'000
<u>Schubfestigkeit und Schubmodul</u>	$E_{c,0,g,05}$ MPa	13'900		14'700			16'300
	ρ_{mean} kg/m ³	701		697			715
	ρ_{05} kg/m ³	669		664			693
	Festigkeitsklasse	GL40h	GL48h	GL48c	GL48h		GL55h
	Stützenquerschnitt [mm]	$w = 200$	$w = 150$	$w = 200$	$w = 280$		$w = 200$
	Prüfkörperanzahl	$n = 7$	$n = 7$	$n = 7$	$n = 7$		$n = 7$
<u>Knickversuche</u>	$f_{c,0,g,mean}$ MPa	60.4	59.9	63.8	58.2		65.8
	$f_{c,0,g,05}$ MPa	59.7	56.4	62.5	55.9		63.7
	$E_{c,0,g,mean}$ MPa	15'100	15'600	16'000	15'500		17'000
	$E_{c,0,g,05}$ MPa	14'400	14'600	15'400	14'800		16'700
	ρ_{mean} kg/m ³	693	690	712	690		708
	ρ_{05} kg/m ³	682	664	706	674		697
<u>Spaltversuche</u>	Festigkeitsklasse		GL48c	GL48c	GL48c	GL48c	GL55c
	Trägerhöhe [mm]		$h = 200$	$h = 400$	$h = 600$	$h = 400$	$h = 400$
	Prüfkonfiguration		3PB	3PB	3PB	4PB	3PB
	Prüfkörperanzahl		$n = 7$	$n = 3$	$n = 7$	$n = 7$	$n = 7$
	$f_{v,mean}$ MPa		16.0	13.2	9.4	10.8	12.4
	$f_{v,05}$ MPa		14.5	-	7.7	9.0	10.2
<u>Spaltversuche</u>	G_{mean} MPa		-	1'280	1'270	1'210	1'180
	G_{05} MPa		-	1'190	1'140	1'130	1'100

- Knickversuche an 2.40 und 3.60 m langen, beidseitig gelenkig gelagerten Stützen mit Querschnittsabmessungen 200 mm × 200 mm zeigten, dass die Anwendung der für Brettschichtholz aus Nadelholz gültigen Knickkurven in der EN 1995-1-1:2004 bzw. der Norm SIA 265:2012 zur Bemessung von Buchen-Brettschichtholz-Stützen zu Ergebnissen auf der unsicheren Seite führt. Allerdings zeigten bereits frühere Untersuchungen an der ETH Zürich, dass diese Diskrepanz auch für Nadelholz-BSH besteht.

Eine Festlegung der Knickkurven für Nadelholz- und Buchen BSH basierend auf denselben Grundlagen (insb. betreffend der zu berücksichtigenden Imperfektionen) sollte angestrebt werden. Für Buchen-Brettschichtholz wurden im Projekt angepasste Knickkurven mit korrigierten Beiwerten β_c und $\lambda_{rel,0}$ vorgeschlagen.

- Zugversuche an Bündeln, bestehend aus mindestens 3 verklebten Lamellen, können die deutlich aufwendigeren Biegeversuche ersetzen, sofern die Prüfkörper eine bezüglich Lage und Anzahl repräsentative Verteilung der Keilzinkenverbindungen in den einzelnen Lamellen aufweisen. Das Verhältnis zwischen den charakteristischen Werten der Zugfestigkeit parallel zur Faserrichtung und der Biegefertigkeit liegt zwischen 0.92 (GL40, GL48) und 0.96 (GL55) und damit höher als der in der EN 14080:2013 erwähnte Wert für Brettschichtholz aus Nadelholz (Tabelle 1).
- Die Ermittlung der Schubfestigkeit der Buchen-Brettschichtholzträger bereitete Schwierigkeiten, da es zurzeit noch kein standardisiertes Verfahren gibt und weil die lokal in die Prüfkörper einzuleitenden Kräfte auf Grund der sehr hohen Schubfestigkeit sehr gross sind. Im Projekt wurden verschiedene Arten von Schubversuchen durchgeführt und verglichen und es wurde eine neue Prüfkonfiguration (asymmetrischer 4-Punkt-Biegeversuch) entwickelt. Die ermittelten Schubfestigkeiten lagen je nach Art der Prüfung zwischen 8 N/mm² (Druckscherversuch) und 17 N/mm² (3-Punkt-Biegeversuch an Trägern mit kurzer Spannweite und I-Querschnitt und von geringer Höhe ($h = 200$ mm)) (Tabelle 1). Um Schubbrüche in der Praxis zu verhindern, sollten die Bemessungswerte der Schubfestigkeit entsprechend vorsichtig festgelegt werden. Sie liegen dann aber immer noch deutlich höher als bei Brettschichtholz aus Nadelholz.
- Sowohl die Biegefertigkeit als auch die Schubfestigkeit von Buchen-Brettschichtholz unterliegen einem Volumeneinfluss in analoger Größenordnung zu Brettschichtholz aus Nadelholz. Aus den Versuchen konnten Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung des Einflusses der Bauteilgröße auf die Biege- und auf die Schubfestigkeit angegeben werden.
- Die in den Biege-, Zug- und Druckversuchen ermittelten Elastizitätsmoduln unterscheiden sich nur wenig und für die Baupraxis genügt es daher, unabhängig von der Beanspruchungsart einen Mittelwert des E-Moduls parallel zur Faserrichtung pro Festigkeitsklasse anzugeben: 14'200 N/mm² für die Klasse GL40h, 15'400 N/mm² für die Klasse GL48h und 16'600 N/mm² für die Klasse GL55h.
- Der Versuche zur Ermittlung des Schubmoduls ergaben einen Mittelwert von 1'100 N/mm², welcher gut mit anderen in der Literatur publizierten Werten übereinstimmt.
- Die Rohdichten der in den verschiedenen Versuchen geprüften Prüfkörper lagen zwischen 680 und 730 kg/m³ (Mittelwert bei einer Holzfeuchte von 8%).

Zusammenfassend haben die Projektergebnisse gezeigt, dass es mit entsprechenden Massnahmen in der Produktion (Trocknung und Festigkeitssortierung der Bretter; Keilzinkung (in ungestörten Zonen der Bretter) und Flächenverklebung mit geeigneten Klebstoffsystmen) möglich ist, Buchen-Brettschichtholz der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55 herzustellen.

In der Tabelle 2 sind die im Projekt ermittelten mechanischen Eigenschaften und Dichten von Buchen-BSH der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55 mit homogenem und kombiniertem Aufbau zusammengefasst (Werte in schwarzer Schrift). Nicht im Rahmen des Projektes untersuchte Eigenschaften, wie etwa die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften rechtwinklig zur Faserrichtung, wurden der Literatur entnommen und sind in der Tabelle in blauer Schrift geschrieben.

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften und Dichten von Buchen-BSH. Die angegebenen Werte beziehen sich auf eine Holzfeuchte von $u = 8 \pm 2\%$. (Die in blauer Schrift geschriebenen Werte wurden nicht im Projekt ermittelt, sondern der Literatur entnommen.)

Festigkeitsklassen			Buchen-BSH							
			GL40c	GL40h	GL48c	GL48c	GL55c	GL55h		
Kennzeichnende Eigenschaften										
- Biegefestigkeit	$f_{m,k}$	MPa	40.0	40.0	48.0	48.0	55.0	55.0		
- mittl. Biege-Elast.-modul	$E_{m,mean}$	MPa	14'000	14'200	15'200	15'400	16'400	16'600		
Charakteristische Werte										
Festigkeit	Biegung	$f_{m,k}$	MPa	40.0	40.0	48.0	48.0	55.0	55.0	
	Zug \parallel zur Faser	$f_{t,0,k}$	MPa	26.0	32.0	30.0	38.4	36.5	44.0	
	Druck \parallel zur Faser	$f_{c,0,k}$	MPa	40.0	45.0	45.0	50.0	50.0	55.0	
	Zug \perp zur Faser	$f_{t,90,k}$	MPa	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
	Druck \perp zur Faser	$f_{c,90,k}$	MPa							
	- generell			6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	
	- beidseitiges Vorholz			9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	
	- einseitiges Vorholz			7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	
	Schub	$f_{v,k}$	MPa	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	
Steifigkeit	Schubmodul		G_{mean}	MPa	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	
	E-Modul \parallel zur Faser		$E_{0,mean}$	MPa	14'000	14'200	15'200	15'400	16'400	16'600
			$E_{0,05}$	MPa	13'000	13'200	14'200	14'400	15'400	15'600
	E-Modul \perp zur Faser		$E_{90,mean}$	MPa	1'100	1'100	1'100	1'100	1'100	1'100
			$E_{90,05}$	MPa	650	650	650	650	650	650
	Schubmodul		G_{mean}	MPa	1'100	1'100	1'100	1'100	1'100	1'100
			G_{05}	MPa	900	900	900	900	900	900
	Rollschubmodul		$G_{r,mean}$	MPa	300	300	300	300	300	300
	Rollschubmodul		$G_{r,05}$	MPa	250	250	250	250	250	250
Rohdichte			ρ_{mean}	kg/m ³	690	690	690	690	690	690
			ρ_k	kg/m ³	660	660	660	660	660	660

Die in der Tabelle 2 zusammengestellten Werte werden im Berichtsteil zu den Modulen 5 und 6 erläutert und diskutiert, wo auch detaillierter auf die Ergänzung der Tabelle durch Literaturwerte eingegangen wird.

Die Anpassung einzelner in der Tabelle 2 angegebener Werte, etwa zur Vereinheitlichung von Festigkeitsklassen unterschiedlicher Holzarten, kann sinnvoll sein und sollte diskutiert werden. Ebenso sollten die Ergebnisse laufender Untersuchungen, etwa zur Schubfestigkeit und zur Druckfestigkeit von Buchen-BSH in Abhängigkeit der Holzfeuchte, bei der definitiven Festlegung der Bemessungswerte berücksichtigt werden.

Festzuhalten ist, dass mit den Ergebnissen des hier vorgestellten Projekts die Anwendung von Buchen-Brettschichtholz lediglich in der Feuchte- bzw. Nutzungsklasse 1 abgedeckt ist. Versuche zur Dauerhaftigkeit oder zum Einfluss der Holzfeuchte auf die Festigkeiten und Steifigkeiten waren nicht geplant und sind auch nicht durchgeführt worden.

Die Produktion von Buchen-Brettschichtholz muss analog zu derjenigen von Brettschichtholz aus Nadelholz qualitätsgesichert und -kontrolliert erfolgen. Es gibt derzeit allerdings noch keine

Europäische Produktnorm für Brettschichtholz aus Laubholz. Die EN 14080, welche die Anforderungen an die Produktion von Brettschichtholz und Balkenschichtholz aus Nadelholz regelt, kann als Richtschnur dienen. Allerdings gilt es zu beachten, dass die Ansprüche an die Keilzinken-Verbindungen, die Flächenverklebung, die Holzfeuchte etc. deutlich höher sind als bei Nadelholz.

1.5 Publikationen

Die Projektergebnisse wurden laufend während der Projektdauer präsentiert. Detaillierte Informationen dazu sind im Schlussbericht zum Modul 7 zu finden. Bei den Publikationen handelt es sich um:

- 8 Vorträge / Beiträge an nationalen Veranstaltungen
- 13 Vorträge / Beiträge an internationalen Konferenzen
- 4 Beiträge in internationalen Fachzeitschriften mit Peer-Review
- 2 Beiträge zu technischen Handbüchern (Umsetzung).

Zudem ist im Rahmen des Projekts die Doktorarbeit Nr. 26173 "European Beech Glued Laminated Timber" von Thomas Ehrhart entstanden.

1.6 Umsetzung der Projektergebnisse

Die Projektergebnisse sollen in die Normierung gebracht werden. Auf nationaler Ebene ist in Zusammenarbeit mit der Lignum die Herausgabe eines Lignatec "Bauen mit Laubholz" geplant, in Zusammenarbeit mit HIS die Erarbeitung von "Richtlinien für die Herstellung von Buchen-BSH". Betreffend die internationale Umsetzung der Ergebnisse steht die Mitarbeit bei der Erarbeitung einer Europäischen Produktnorm analog der EN 14080 "Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz", welche für entsprechende Produkte aus Nadelholz gilt, im Vordergrund.

Homogenes und kombiniertes Buchen-Brettschichtholz

Technische Grundlagen zur Marktimplementierung als Bauprodukt für Biegeträger und Stützen

**Bundesamt für Umwelt BAFU
Aktionsplan Holz**

Projekt REF-1011-04200

Schlussbericht

Einleitung

**Motivation zum Projekt, Projektziele,
Projektteam**

René Steiger

Empa, Abt. Ingenieur-Strukturen

Inhaltsverzeichnis

1 MOTIVATION ZUM PROJEKT	17
2 VORBEREITENDE ARBEITEN	17
3 ZIEL DES PROJEKTS	17
4 PROJEKTTEAM UND FINANZIERUNG DES PROJEKTS.....	18
4.1 PROJEKTTEAM.....	18
4.1.1 <i>Forschungsinstitute</i>	18
4.1.2 <i>Industriepartner</i>	18
4.1.3 <i>Projektbegleitung</i>	19
4.2 FINANZIERUNG.....	19
5 PROJEKTORGANISATION.....	19
5.1 AUFTEILUNG DES PROJEKTS IN MODULE.....	19
5.2 INHALTE DER MODULE.....	20
5.2.1 <i>Modul 1: Zielsetzung, Inhalt und Umsetzung des Projekts</i>	20
5.2.2 <i>Modul 2: Rohmaterialverarbeitung</i>	20
5.2.3 <i>Modul 3: Lamellenproduktion und Flächenverklebung</i>	21
5.2.4 <i>Modul 4: Experimentelle Ermittlung der mechanischen Eigenschaften des BSH</i> 21	
5.2.5 <i>Modul 5: Festlegung von kennzeichnenden Eigenschaften und Bemessungswerten für Buchen-BSH der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55</i>	22
5.2.6 <i>Modul 6: Zusätzliche wesentliche Grundlagen für die Bemessung von Bauteilen</i> 22	
5.2.7 <i>Modul 7: Umsetzung der Projektergebnisse</i>	22
5.2.8 <i>Modul 8: Schlussberichte</i>	23
5.3 PROJEKTSTEUERUNG MIT MEILENSTEINEN.....	23
6 RANDBEDINGUNGEN.....	23

1 Motivation zum Projekt

Holz der (Rot-) Buche (*Fagus sylvatica* L.) eignet sich auf Grund seiner leistungsstarken mechanischen Eigenschaften sehr gut für Bauzwecke. Brettschichtholz- (BSH-) Bauteile aus Buche stellen, neben ähnlichen Produkten wie z.B. Furnierschichtholz und Brettsperrholz, die höchstwertigste stoffliche Verwertung des Rohstoffs dar. Auf Grund der hohen Leistungsfähigkeit haben solche Bauteile das Potential, in hochbeanspruchten Tragwerken für die nachhaltige Holzbauweise Marktanteile zu gewinnen, und zwar nicht primär in Konkurrenz zu Nadelholz-Bauteilen, sondern zu Lasten von Stahl oder von Stahlbeton. Zum Beispiel können hochleistungsfähige Stützen aus Buchen-Brettschichtholz eine wirtschaftliche und technische vielversprechende Alternative zu Betonstützen sein. Zentrale Voraussetzung für die Etablierung von Buchen-Brettschichtholz als Bauprodukt am Markt sind zuverlässige und garantierte Materialeigenschaften sowie Bemessungsangaben für den Planer. Das Projekt sollte die Grundlagen für eine hochwertige stoffliche Verwertung von Buchenholz für Bauzwecke und für eine Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit von Holz in hochbeanspruchten Tragwerken und Tragwerksteilen bereitstellen.

2 Vorbereitende Arbeiten

Vor dem Start des Projekts wurden, parallel zur Erarbeitung des Projektantrags, drei Vorprojekte durchgeführt. Diese hatten zum Ziel, den aktuellen Wissensstand zur Herstellung und zum Einsatz von Laubholz-BSH im Allgemeinen und von Buchen-BSH im Besonderen zu erfassen sowie das bestehende Marktpotential zu untersuchen:

- WHFF-Projekt 2011.17 „BSH aus Laubholz – Marktimplementierung als Bauprodukt“
- AP-Holz-Projekt „Brettschichtholz aus Buche: Workshop zur Erhebung des aktuellen Wissensstandes in Deutschland, Österreich und der Schweiz“
- AP-Holz-Projekt „Grundlagen zum Marktpotential für verklebte Laubholzprodukte – Fokus Buchen-Brettschichtholz“

Auf Grundlage dieser detaillierten Voruntersuchungen wurde der ursprünglich geplante Rahmen des Projektes eingeschränkt. Der Schwerpunkt wurde auf Buchen-BSH, insbesondere für den Einsatz als hochbelastete Träger und Stützen bei mehrgeschossigen Gebäuden und mittelgrossen Hallen, gelegt. Hierfür sollten alle erforderlichen Materialeigenschaften (für Beanspruchung auf Biegung, Schub und Druck parallel zur Faser und senkrecht zur Faser) sowie verschiedene Stabilitätsrelevante Parameter untersucht werden. Anschliessend sollten diese, um eine standardmässige Verwendung von Buchen-BSH zu gewährleisten, in Bemessungstabellen festgehalten und in die Normierung getragen werden.

3 Ziel des Projekts

Das Ziel des Projekts war es, durch die Angabe von Eigenschaftswerten, Bemessungsgrundlagen und von Anforderungen an die Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle für die gesamte Produktionskette die technischen Rahmenbedingungen zu schaffen, dass homogenes und kombiniertes Buchen-Brettschichtholz der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und eventuell GL55 vermehrt als qualitätsgesichertes Bauprodukt in Form von Biegeträgern und Stützen in der Feuchtekategorie 1 (bzw. Nutzungsklasse 1 gemäss EC 5) eingesetzt werden kann. Im Projekt sollten die folgenden Prozess-Schritte bei der Produktion von Buchen-BSH untersucht werden:

- Festigkeitssortierung von Buchenbrettern in T-Klassen (Sortierung nach der Zugfestigkeit) für die Produktion von Brettschichtholz der untersuchten Festigkeitsklassen und Anforderungen an die Qualitätskontrolle des Festigkeitssortier-Prozesses in der Sägerei;
- Keilzinkung von Buchen-Brettern zu Lamellen im Brettschichtholz-produzierenden Betrieb und Flächenverklebung von Buchen-Lamellen im Rahmen der Brettschichtholz-Produktion unter industriellen Bedingungen;
- Ermittlung der mechanischen Eigenschaften (Biegefestigkeit und Schubfestigkeit, Druck- und Zugfestigkeit parallel zur Faserrichtung, sowie der zugehörigen Steifigkeiten) von Buchen-Brettschichtholz in Biege-, Druck- und Zugversuchen;
- Festlegung von kennzeichnenden Eigenschaften und Bemessungswerten für Buchen-Brettschichtholz analog zur Tabelle 7 der Norm SIA 265:2012, welche entsprechende Werte für Brettschichtholz aus Nadelholz angibt;
- Festlegung von weiteren, für die Bemessung von Biegeträgern und -stützen aus Buchen-Brettschichtholz nötigen Angaben (z. B. Knickbeiwerte, Faktoren zur Berücksichtigung des Einflusses des Bauteilvolumens auf die Biege- und die Schubfestigkeit).

4 Projektteam und Finanzierung des Projekts

4.1 Projektteam

4.1.1 Forschungsinstitute

Der Projektantrag wurde von den folgenden Forschungsinstituten gemeinsam eingereicht:

- Empa, Abteilung Ingenieur-Strukturen (Projektleitung);
- ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion;
- Berner Fachhochschule / Institut für Werkstoffe und Holztechnologie;

4.1.2 Industriepartner

Als Industriepartner wirkten im Projekt mit:

- die Sägereien:
 - Corbat Holding SA, Vendlincourt (Kanton Jura);
 - Richard Lötscher AG, Burgdorf (Kanton Bern);
 - Sägerei Koller, Attelwil (Kanton Aargau);
 - Konrad Keller AG, Unterstammheim (Kanton Zürich);
- die Sortiermaschinen-Hersteller:
 - Microtec GmbH, Bressanone/Brixen (Italien);
 - Brookhuis Applied Technologies WOOD, Enschede (Niederlande);
- die BSH-produzierende Firma Neue Holzbau AG, Lungern (Kanton Obwalden);
- die Klebstoff-Lieferanten:
 - DeMeth GmbH, Einsiedeln;
 - Henkel & Cie. AG, Sempach Station;
- der Fachverband Holzindustrie Schweiz.

4.1.3 Projektbegleitung

Das Projekt wurde begleitet durch:

- Frau Dr. Ulrike Krafft und Herr Werner Rieger, BAFU, Abteilung Wald;
- Prof. Emeritus Ernst Gehri, Rüschlikon;
- Herr Dipl. Holzbauing. FH/SIA Markus Zimmermann, IHT Rafz Ingenieurholzbau + Holzbautechnik GmbH;
- Herr Dipl. Ing. HTL Urs Christian Luginbühl, Holzindustrie Schweiz.

4.2 Finanzierung

Das Projekt wurde durch das Bundesamt für Umwelt BAFU im Rahmen des Aktionsplans Holz massgeblich finanziell unterstützt. Der Aktionsplan Holz leistet einen wesentlichen Beitrag zur Umsetzung der Ressourcenpolitik Holz des Bundes. Diese hat zum Ziel, dass Holz aus Schweizer Wäldern nachhaltig und ressourceneffizient bereitgestellt, verarbeitet und verwertet wird. Der Laubholzanteil in Schweizer Wäldern nimmt zu. Darin spiegelt sich der waldbaulich gewollte Umbau der Wälder hin zu mehr standortangepassten, strukturreichen Misch- und Laubholzbeständen wider. Um das zunehmende Laubholzpotenzial optimal zu nutzen, fehlen jedoch entsprechende Absatz- und Einsatzmöglichkeiten. Die Erschliessung neuer Märkte und die Entwicklung erfolgreicher Produkte aus heimischen Laubhölzern sind deshalb notwendig.

Die beteiligten Forschungsinstitute und Industriepartner haben mit einem grossen Mass an Eigenleistung in Form von Arbeit und Material zum Gelingen des Projekts beigetragen.

5 Projektorganisation

5.1 Aufteilung des Projekts in Module

Das Projekt wurde in 8 Modulen geplant und bearbeitet, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Module und Akteure im Projekt "Buchen-Brettschichtholz".

Projektleitung: Empa (Abt. Ingenieur-Strukturen)			
Modul	Inhalt	Akteure	Leitung
1	Festlegung der massgeblichen Randbedingungen für das Projekt	Alle	Empa
2	Bereitstellung des Rohmaterials: Einschnitt, Trocknung und Festigkeitssortierung der Buchen-Bretter	Empa, ETH Sägereien Sortiermaschinen-Hersteller	Empa
3	Lamellenproduktion (durch Keilzinkung von Brettern) und Brettschichtholz-Produktion (durch Flächenverklebung von Lamellen)	neue Holzbau AG BFH / AHB	BFH / AHB
4	Industrielle Produktion von Buchen-Brettschichtholz	neue Holzbau AG Empa, ETH	neue Holzbau AG
	Ermittlung der mechanischen Eigenschaften des Buchen-Brettschichtholzes	Empa, ETH	Empa
5	Festlegung der kennzeichnenden Eigenschaften und Bemessungswerte für Buchen-Brettschichtholz	Empa, ETH neue Holzbau AG	Empa
6	Ermittlung von zusätzlichen Bemessungsgrundlagen	ETH, Empa neue Holzbau AG	ETH
7	Umsetzung der Projektergebnisse	Alle	Empa
8	Technische und administrative Schlussberichte	Alle	Empa

Fachexperten
Vertreter der Programmleitung Aktionsplan Holz

5.2 Inhalte der Module

5.2.1 Modul 1: Zielsetzung, Inhalt und Umsetzung des Projekts

In Modul 1 wurden alle für das gesamte Projekt erforderlichen Rahmenbedingungen definiert. Dies umfasste die Festlegung bzw. Bestätigung der Projektziele (inkl. Zwischenzielen) sowie der individuellen Verantwortlichkeiten im Rahmen des Projekts. Notwendige Termine und Meetings sollten zu Beginn des Projektes festgelegt werden. Außerdem mussten, insbesondere aufgrund der starken Beteiligung von Industrieunternehmen, Regelungen für die Vermarktung und den Austausch der Versuchsergebnisse definiert werden.

Ein weiterer wichtiger Schritt lag in der Planung der experimentellen Untersuchungen. Hierbei mussten zuerst die Herkunftsgebiete, welche untersucht werden sollten, festgelegt werden. Außerdem waren das Prüfprogramm, die Stichprobengrößen sowie das daraus resultierende Rohmaterial definitiv festzulegen. Aus den Voruntersuchungen hatte sich herausgestellt, dass ein Volumeneffekt vermutet wird, allerdings noch nicht nachgewiesen worden war. Ein solcher war allerdings für die Festlegung von Referenzvolumen erforderlich und sollte somit schon vor einer grossen Versuchsreihe untersucht werden.

Die geplanten Schritte zur Qualitätssicherung des Endproduktes wurden festgelegt. Hierbei war die gesamte Prozesskette, vom Rohmaterial bis hin zum fertigen BSH-Träger, zu betrachten. Außerdem musste die Frage der Verantwortlichkeiten im Rahmen der Qualitätssicherung studiert werden.

5.2.2 Modul 2: Rohmaterialverarbeitung

Das zweite Modul umfasste die Rohmaterialverarbeitung. Auf Grund der zu erwartenden Variabilität der Materialeigenschaften, mussten die Materialherkunft, die durchgeführten Vorsortierungen, der Einschnitt und die Trocknung des Rundholzes detailliert dokumentiert werden.

Anschliessend erfolgte die Festigkeitssortierung der Bretter. Aufgrund des grossen Einflusses der Brettqualität auf die Qualität des BSH-Trägers war die Festigkeitssortierung als wesentliches Element des Forschungsprojektes zu sehen. Nach Meinung der Experten musste die Sortierung visuell und zwingend maschinell erfolgen. Die Auswahl der Sortierverfahren war in Absprache mit allen Projektbeteiligten zu treffen. Hierbei sollten die individuellen Wünsche einzelner Betriebe berücksichtigt werden. Ein wichtiger Punkt dieses Projektabschnittes war die Dokumentation der Sortierparameter. Geplant war, dass die aufgenommenen Sortierparameter jedem individuellen Brett zugeordnet werden können. Dadurch kann die Qualität der Sortiermethoden optimal beurteilt werden. Dasselbe gilt für den Einfluss der Brettqualität auf die Materialeigenschaften der BSH-Träger.

An einem Teil der sortierten Bretter (an ca. 5%) wurden Untersuchungen zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften und der Rohdichte durchgeführt. Besonderes Augenmerk war hierbei auf die Festigkeit sowie die Steifigkeit unter Zugbeanspruchung parallel zur Faser zu richten. Durch einen Vergleich der Sortierparameter mit den gemessenen Materialeigenschaften konnte die Qualität der eingesetzten Sortiermethoden beurteilt werden.

Ein weiterer Schwerpunkt dieses Moduls lag in der Deklaration der Bretteigenschaften sowie der Qualitätskontrollen in den Sägereien. Bei diesen Überlegungen sollte die erwartete, langfristige Annäherung an die Europäische Normierung berücksichtigt werden.

5.2.3 Modul 3: Lamellenproduktion und Flächenverklebung

Das dritte Modul beschäftigte sich mit der Herstellung von BSH, genauer gesagt mit der dafür erforderlichen Keilzinkenverbindung sowie Flächenverklebung der Bretter.

Eine hohe und geringen Streuungen unterworfen Keilzinkenfestigkeit ist von grosser Bedeutung für die Qualität des Endprodukts. Die Prozessparameter (Keilzinkengeometrie, Klebstoff, Verfahrenstechnik, Fugendicke, Eindringung, Klebstoffverteilung, Vorbenetzung der Klebflächen, etc.) zur industriellen Fabrikation von Längsstössen sollten zusammen mit dem Industriepartner definiert und nötigenfalls optimiert werden. Für die Optimierung sollte die praktische Erfahrung der Betriebe und von Forschungsprojekten herangezogen werden.

Die Qualität der Keilzinkenfestigkeit sollte an den Sortierklasse (T33, T42 und T50) untersucht werden. Zur Beurteilung der Verklebung waren Zugversuche geplant. Obwohl Zugversuche aussagekräftiger sind als Biegeversuche, werden letztere von den meisten Betrieben bevorzugt, da sie einen geringeren Aufwand erfordern. Um die beiden Prüfmethoden zu vergleichen, sowie um korrekte Schlussfolgerungen für eine spätere Normierung zu ziehen, sollten zusätzlich an kleineren Stichproben Flachkant-Biegeversuche durchgeführt werden, wobei wiederum die oben genannten Sortierklassen einbezogen werden sollten. Zusätzlich sollte die Feuchtebeständigkeit der Keilzinkenverbindung und der Flächenverklebung durch Delaminierungsversuche gemäss EN 14080 bewertet werden.

5.2.4 Modul 4: Experimentelle Ermittlung der mechanischen Eigenschaften des BSH

Das Modul 4 bildete das Herzstück des Projektes. Es umfasste die Versuche an den BSH-Trägern. Das Augenmerk lag auf der Bestimmung der Materialeigenschaften von Biegeträgern und Stützen. Es sollten 4-Punkt-Biegeversuche zur Bestimmung der Biegefestigkeit und -steifigkeit, 3-Punkt-Biegeversuche zur Bestimmung der Schubfestigkeit und -steifigkeit sowie Druckversuche zur Bestimmung der Druckfestigkeit und -steifigkeit parallel zur Faserrichtung durchgeführt werden. Die BSH-Träger und -Stützen wurden bei der neuen Holzbau AG hergestellt.

5.2.4.1 Ermittlung der mechanischen Eigenschaften bei Biegung

Pro Festigkeitsklasse (GL40h, GL40c, GL48h, GL48c, GL55c) wurden Biegeversuche durchgeführt. Als Referenzabmessungen wurden jene von Nadelholz-BSH gewählt, d.h. $b \times h \times l = 160 \times 600 \times 11'400 \text{ mm}^3$. Zur Untersuchung des Volumeneffekts bei Biegung wurden auch Biegeversuche an BSH-Trägern mit anderen Abmessungen durchgeführt.

Biegeversuche an BSH-Trägern sind mit einem enormen Materialaufwand verbunden und demzufolge sehr teuer. Da die Biegefestigkeit massgeblich von der Zugfestigkeit der Zuglamellen beeinflusst wird, wurden zusätzlich Versuche an „Lamellenbündeln“ (3 übereinander geklebte Lamellen) geplant. Die Lamellenbündel sollten über eine freie Prüflänge von 3600 mm geprüft werden. Dies entspricht dem hochbeanspruchten Bereich der Biegeträger mit Referenzabmessungen. Durch einen Vergleich mit den Biegeversuchen könnte eine alternative Prüfmethode von BSH-Trägern entwickelt werden.

5.2.4.2 Biegeversuche zur Bestimmung der Schubsteifigkeit und der Schubfestigkeit

An kürzeren Biegeträgern (Spannweite $2,5 \times h$) mit den planmässigen Abmessungen: $b \times h \times l = 160 \times 600 \times 1'800 \text{ mm}^3$ sollten 3-Punkt-Biegeversuche zur Ermittlung der Schubsteifigkeit und der Schubfestigkeit durchgeführt. Auch hier waren zur Ermittlung des Volumeneffekts Versuche an Prüfkörpern unterschiedlicher Querschnittsabmessungen geplant. Des Weiteren sollten nach Möglichkeit Vorschläge zur Optimierung der Prüfmethoden für die Ermittlung der Schubparameter gemacht werden.

5.2.5 Modul 5: Festlegung von kennzeichnenden Eigenschaften und Bemessungswerten für Buchen-BSH der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Versuche im Modul 4, der zusätzlich durchgeführten numerischen Untersuchungen (FE-Modelle), von Ergebnissen aus parallel laufenden, anderen Forschungsprojekten, sowie auf Basis von weiteren Überlegungen (z. B. bezüglich Robustheit) sollten im Modul 5 die kennzeichnenden Eigenschaften und Bemessungswerte für Buchen-BSH der Festigkeitsklassen GL40h, GL40c, GL48h, GL48c und GL55c festgelegt werden.

5.2.6 Modul 6: Zusätzliche wesentliche Grundlagen für die Bemessung von Bauteilen

In Modul 6 sollten weitere wesentliche Grundlagen für die Bemessung von Bauteilen erarbeitet und zusammengestellt werden, z.B. Festlegung des Verhältniswerts γ_M/η_M sowie weiterer für die Bemessung von Buchen-BSH-Bauteilen nötiger Angaben (z.B. Holzfeuchteinfluss, Einfluss der Dauer der Lasteinwirkung auf Festigkeit und Verformung, Volumeneinfluss, etc.).

Ein weiterer Schwerpunkt im Modul 6 lag in der Untersuchung von Stabilitätsproblemen. Knick- und Kippkurven, Nachweise nach Theorie 2. Ordnung und andere für Stabilitätsnachweise erforderliche Grundlagen sollten ermittelt werden.

5.2.7 Modul 7: Umsetzung der Projektergebnisse

Geplant war die direkte Umsetzung der Projektergebnisse, insbesondere im Bereich der Normierung. Die Erstellung einer Tabelle mit den physikalischen und mechanischen Eigenschaften sowie den Bemessungswerten von Buchen-BSH, analog zur Tabelle 7 der Norm SIA 265:2012, war ein grundlegendes Ziel des Forschungsprojektes. Zusätzlich war auch die Normierung der Buchenholz Sortierung und eine entsprechende Tabelle mit den physikalischen und mechanischen Eigenschaften sowie den massgeblichen Parametern zur Festigkeitssortierung von Buchenholz Brettern, analog zur Tabelle 12 der Norm SIA 265/1:2009, geplant.

Die Projektergebnisse sollten letztlich in die WG 3 des CEN/TC 124 getragen werden, wo zum Zeitpunkt des Forschungsprojekts die Schaffung einer europäischen Norm (EN) für Laubholz-BSH auf der Agenda stand. Um Doppelprüfungen weitgehend zu vermeiden, war ein laufender Wissensaustausch mit dem Europäischen WoodWisdom-Net Projekt „EU Hardwoods“ geplant. Die Projektergebnisse sollten laufend in renommierten Fachzeitschriften und in praxisnahen Organen veröffentlicht werden sowie an nationalen und internationalen Konferenzen (WCTE, COST, etc.) und Normierungsgremien (SIA, CEN, CIB-W18, INTER) vorgestellt und diskutiert werden.

5.2.8 Modul 8: Schlussberichte

Das Modul 8 umfasste die Berichterstattung in Form von technischen und administrativen Berichten. Zu jedem Modul wurde nach Abschluss der Arbeiten und erfolgter Auswertung ein eigenständiger technischer Bericht verfasst und im Projektteam diskutiert. Administrative Berichte zu Händen des BAFU wurden halbjährlich verfasst.

5.3 Projektsteuerung mit Meilensteinen

Zur Projektkontrolle und -steuerung wurden 4 Meilensteine wie folgt eingeführt:

- Meilenstein 1 im Modul 2: Untersuchungen zur Bereitstellung des Rohmaterials:
→ Ausreichend hohe und ausreichend wirtschaftliche Ausbeute?
- Meilenstein 2 im Modul 2: Mechanische Eigenschaften der Bretter:
→ Ausreichend hohe Zugsteifigkeiten und -festigkeiten zur Herstellung von Brettschichtholz der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55?
- Meilenstein 3 im Modul 3: Mechanische Eigenschaften der Keilzinkenverbindungen:
→ Ausreichend hohe Zugsteifigkeiten und -festigkeiten zur Herstellung von Brettschichtholz der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55?
- Meilenstein 4 im Modul 3: Untersuchungen zur Flächenverklebung:
→ Ausreichend hohe Schubfestigkeiten und Beständigkeit gegen Delaminierung zur Herstellung von Brettschichtholz der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55 in Feuchtekasse 1?
- Meilenstein 5 im Modul 4: Ermittlung der Festigkeitseigenschaften von BSH-Trägern:
→ Werden die kennzeichnenden Werte für Brettschichtholz der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55 erreicht?

6 Randbedingungen

In einem ersten Projektschritt wurden im Modul 1 in Absprache mit den Projektpartnern die folgenden Rahmenbedingungen festgelegt:

- Mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit, wurde als Hauptziel die Produktion und Prüfung von Buchen-Brettschichtholz der Festigkeitsklassen GL40 und GL48 festgelegt.
- Die Untersuchungen sollten sich auf die Feuchtekasse 1 beschränken. Als Zielwert für die Holzfeuchte wurde daher ein Wert von $8 \pm 2\%$ festgelegt.
- Der Einfluss des Wuchsgebietes wird durch Lieferung des Rohmaterials durch die vier im Projekt mitwirkenden Sägereien aus den Kantonen Jura, Bern, Aargau und Zürich (siehe 4.1.2) erfasst. Die zu untersuchenden Sortimente durften kein Material aus dem Ausland umfassen.
- Die an das Bauprodukt Buchen-Brettschichtholz zu stellenden Anforderungen sollten sich nach den Anforderungen an Brettschichtholz aus Nadelholz (EN 14080) richten.
- Das Brettschichtholz sollte durch die neue Holzbau AG gemäss deren Erfahrungen und Knowhow mit den bewährten Methoden hergestellt werden. Aus diesem Grund wurde die Brettstärke bei der Rohmaterialbereitstellung zu 30 mm festgelegt; die zu Lamellen

keilgezinkten Bretter wurden vor der Flächenverklebung auf eine Dicke von 25 mm gehobelt. Die für die Keilzinkung und die Flächenverklebung einzusetzenden Klebstoffsysteme sollten durch die neue Holzbau AG in Zusammenarbeit mit den Klebstoff-Herstellern gewählt werden.

- Um den Einfluss der Bauteilgrösse auf die Festigkeit zu erfassen, sollten Versuche an Prüfkörpern unterschiedlicher Grösse durchgeführt werden. Im Falle der Biegeversuche wurden die zu prüfenden Trägerabmessungen (Breite \times Höhe) letztlich zu 120 mm \times 200 mm, 160 mm \times 400 mm, 160 mm \times 600 mm und 180 mm \times 800 mm festgelegt. Die freie Prüflänge in den Zugversuchen sollte mindestens 2'000 mm betragen.
- Keilzinken sollten in Zug- wie auch in einer geringen Zahl an Biegeversuchen geprüft werden.
- Für die Kontrolle der Beständigkeit gegen Delaminierung sollten mangels normativen Angaben für die Prüfung von Buchen-Brettschichtholz, die Verfahren und Anforderungen für Brettschichtholz aus Nadelholz verwendet werden.
- Detailinformationen zu Prozessparametern (bei der Holztrocknung sowie bei der Keilzinkung und Flächenverklebung) müssen durch die im Projekt mitwirkenden Industriepartner nicht offengelegt werden.
- Das Studieren von Varianten zur Optimierung von Prozessen (z. B. Trocknung der Bretter, Keilzinkung und Flächenverklebung) stand nicht im Vordergrund des Projekts. Es ging vielmehr darum, zu zeigen, dass mit den von der neuen Holzbau AG bisher angewandten Methoden Buchen-Brettschichtholz in den zuvor erwähnten Ziel-Festigkeitsklassen produziert werden kann und dass dieses Material die Ziel-Festigkeiten auch tatsächlich aufweist.

Homogenes und kombiniertes Buchen-Brettschichtholz

**Technische Grundlagen zur
Marktimplementation als Bauprodukt
für Biegeträger und Stützen**

**Bundesamt für Umwelt BAFU
Aktionsplan Holz**

Projekt REF-1011-04200

Technischer Schlussbericht

Modul 1

**Festlegung massgeblicher
Projektparameter**

Steiger René

Empa, Abt. Ingenieur-Strukturen

Inhaltsverzeichnis

1 RAHMEN UND ZIELE DES PROJEKTS	29
2 INHALTE UND ZIELE VON MODUL 1	29
3 VORGEHENSWEISE / METHODE.....	29
4 RESULTATE PER 30.09.2015	29
4.1 BESTÄTIGUNG PROJEKTINHALT UND -ZIELE	29
4.2 EINFLUSS DER MATERIALHERKUNFT (WUCHSGEBIET).....	30
4.3 ANFORDERUNGEN AN DAS BAUPRODUKT BUCHEN-BSH	30
4.4 DEFINITION VON VERANTWORTLICHKEITEN IM RAHMEN DES PROJEKTS UND IM RAHMEN DER QUALITÄTSSICHERUNG DES PRODUKTS	30
4.4.1 <i>Verantwortlichkeiten im Rahmen des Projekts</i>	30
4.5 SCHRITTE DER QUALITÄTSSICHERUNG IN DER GESAMTEN PROZESSKETTE.....	31
4.6 ABMESSUNGEN DER ZU PRÜFENDEN BSH-BAUTEILE	31
4.6.1 <i>Abmessungen in der Baupraxis</i>	31
4.6.2 <i>Referenzgrösse bei Biegung</i>	32
4.6.3 <i>Freie Prüflänge in den Zugversuchen</i>	32
4.7 PRÜFPROGRAMM UND STICHPROBENGRÖSSEN	32
4.8 BEDARF AN ROHMATERIAL	32
4.9 ZWISCHENZIELE, TERMINE, MEETINGS	32
4.10 REGELUNG DER VERMARKTUNG UND DES AUSTAUSCHES DER VERSUCHSERGEBNISSE 32	
4.11 WEITERE THEMEN	33
4.11.1 <i>Ausbeute</i>	33
4.11.2 <i>Trocknungsprozess</i>	33
4.11.3 <i>Qualitätskontrolle der Flächenverklebung</i>	33
4.11.4 <i>Informationsfluss zur Europäischen Normierung (CEN/TC 124)</i>	34
4.11.5 <i>Informationsaustausch mit dem Europäischen Projekt „EU Hardwoods“</i>	34
5 DELIVERABLES PER 30.09.2015	37
6 LITERATUR.....	38

1 Rahmen und Ziele des Projekts

Durch die Angabe von Eigenschaftswerten, Bemessungsgrundlagen und von Anforderungen an die Qualitätssicherung und -kontrolle für die gesamte Produktionskette sollen die technischen Rahmenbedingungen geschaffen werden, dass homogenes und kombiniertes Buchen-BSH der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und wenn möglich GL55 vermehrt als qualitätsgesichertes Bauprodukt in Form von Biegeträgern und Stützen in der Feuchtekasse 1 eingesetzt wird. Ausgehend von der Rohmaterialbereitstellung (Auswahl, Trocknung, Festigkeitssortierung) werden sämtliche Prozessschritte (Keilzinkung, Flächenverklebung) bis zur mechanischen Prüfung und Bemessung des fertigen Produkts in die Untersuchung einbezogen.

2 Inhalte und Ziele von Modul 1

In Modul 1 sollen alle für das gesamte Projekt erforderlichen Rahmenbedingungen definiert. Im Detail sind dies:

- Bestätigung der Projektziele
- Herkunftsgebiete des Rohmaterials
- Anforderungen an das Bauprodukt Buchen-BSH
- Definition von Verantwortlichkeiten im Rahmen des Projekts und im Rahmen der Qualitätssicherung des Produkts
- Schritte der Qualitätssicherung in der gesamten Prozesskette
- Abmessungen der zu prüfenden BSH-Bauteile
- Prüfprogramm und Stichprobengrößen
- Bedarf an Rohmaterial
- Zwischenziele, Termine, Meetings
- Regelung der Vermarktung und des Austausches der Versuchsergebnisse

3 Vorgehensweise / Methode

Das Modul 1 wurde anlässlich der Projekt-Kick off-Sitzung vom 30.09.2015 besprochen. Einige Punkte wurden zusätzlich an der Kick off-Sitzung des Moduls 2 (Rohmaterialbereitstellung und -verarbeitung) am 16.09.2015 (erneut) thematisiert. Input kam auch vorab von Prof. Gehri per Emailkonsultation (13.07.2015).

4 Resultate per 30.09.2015

4.1 Bestätigung Projektinhalt und -ziele

Die Projektziele und -inhalte wurden im Grundsatz bestätigt [1]. Die Wirtschaftlichkeit einer Festigkeitsklasse GL55 wurde wegen des wahrscheinlich nur in geringen Mengen zur Verfügung stehenden Rohmaterials entsprechender Qualität in Frage gestellt. Realistischer erscheint der Vorschlag von Prof. Gehri [2], die Festigkeitsklasse GL 32 oder GL36 hinzuzunehmen, um auch das Rohmaterial mit schlechteren Eigenschaften nutzen zu können. Letztlich wurden die Klassen GL40 und GL48 als Hauptziel des Projekts festgelegt.

Aus Sicht der n'h sollte die Nutzung von Buchen-BSH auch in der Feuchtekasse 2 möglich sein und das Projekt daher um diese Fragestellung erweitert werden. Die bei höherer Holz-

feuchte in der Feuchteklaasse 2 zu erwartenden Reduktionen der Steifigkeit und Festigkeit, sowie die anzusetzende Kriechfaktoren können sicherlich bestimmt werden (Thema das Moduls 6), die Frage der ausreichenden Dauerhaftigkeit ist allerdings nicht so einfach zu beantworten, da dazu Langzeituntersuchungen nötig wären. Die Diskussion an der Projekt-Kick off-Sitzung und an derjenigen des Moduls 2 ergab, dass das Projekt auf Feuchteklaasse 1 beschränkt bleibt, dass aber der Einsatz von Buchen-BSH vor der Witterung geschützt (z. B. im Freien unter Dach) oder in ungeheizten Hallen geprüft werden sollte. Dies entspricht jedoch nicht der Nutzungsklaasse 2 bzw. Feuchteklaasse 2 wie sie in [3] bzw. [4] definiert ist, sondern liegt im Zwischenbereich zwischen den Feuchteklaasse 1 und 2. Es ist daher nötig, den Einsatz von Buchen-BSH nicht über die Feuchteklaasse zu definieren, sondern die Einsatzbereiche klarer zu spezifizieren.

4.2 Einfluss der Materialherkunft (Wuchsgebiet)

Nach Erfahrungen der n'h haben Einschnitt und Trocknung weit grösseren Einfluss auf die Materialeigenschaften als das Herkunftsgebiet des Rohmaterials. Bisher sind durch die n'h keine detaillierten Untersuchungen zum Einfluss des Wuchsgebietes gemacht worden. Bacher (microtec) empfiehlt, schweizweit Lieferanten zu wählen, um repräsentative Ergebnisse zu erhalten und später nicht gewisse Regionen ausschliessen zu müssen. Wichtig ist, dass die untersuchten Sortimente kein ausländisches Material beinhalten!

Die Frage der Herkunftsgebiete wurde auch im Kickoff-Meeting des Moduls 2 diskutiert. Vögthi (Fagus Jura) gab zu bedenken, dass Hanglage und -orientierung wahrscheinlich grösseren Einfluss auf das Holz haben als das Herkunftsgebiet. Es wurde letztlich beschlossen, Holz aus der Schweiz mit möglichst viel Herkunftsinformation (von den Sägern bereitgestellt, bei vertretbarem Aufwand) zu verwenden, um allenfalls zu einem späteren Zeitpunkt noch Aussagen zum Einfluss des Herkunftsgebietes treffen zu können. Die folgenden Sägereien haben angeboten, Holz für das Projekt zu liefern:

- Corbat Holding SA: Jura (Vendlincourt JU)
- Richard Lötscher AG: Mitteland (Burgdorf, BE)
- Sägerei Koller: Mitteland (Attelwil AG)
- Konrad Keller AG: Ostschweiz (Unterstammheim ZH)

4.3 Anforderungen an das Bauprodukt Buchen-BSH

Dieser Punkt wurde nicht diskutiert, denn es ist klar, dass Buchen-BSH als Bauprodukt dieselben Anforderungen erfüllen muss, wie BSH aus Nadelholz. Ausführlich wurde dieser Sachverhalt in [5] untersucht und erklärt.

4.4 Definition von Verantwortlichkeiten im Rahmen des Projekts und im Rahmen der Qualitätssicherung des Produkts

4.4.1 Verantwortlichkeiten im Rahmen des Projekts

Die Projektleitung liegt bei der Empa (PL: R. Steiger und G. Fink). Die Funktion des stellvertretenden PL nimmt A. Frangi war. Das Modul wird über die Modulleiter geführt. In jedem Modul wird zumindest eine Kick off-Sitzung und eine Abschlussitzung durchgeführt. Die Verantwortlichkeit für die Module liegt bei folgenden Instituten und Personen:

- Modul 1 (Festlegung massgeblicher Projektparameter): Empa, R. Steiger
 - Modul 2 (Rohmaterialbereitstellung): Empa, G. Fink
 - Modul 3 (Lamellenproduktion und Flächenverklebung): bfh/ahb, T. Volkmer
 - Modul 4 (Mechanische Eigenschaften des produzierten BSH): Empa, R. Steiger
 - Modul 5 (Eigenschafts- und Bemessungswerten): Empa, R. Steiger ¹⁾
 - Modul 6 (Zusätzliche Bemessungsgrundlagen): ETH, A. Frangi
 - Modul 7 (Umsetzung der Projektergebnisse): Empa, R. Steiger
 - Modul 8 (Schlussberichte): Empa, R. Steiger ¹⁾
- ¹⁾ Änderung gegenüber dem Projektantrag

Hauptindustriepartner ist die n'h. Sie gibt die Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften der Bretter, der Keilzinkenstöße und der Flächenverklebung basierend auf dem in der Firma vorhandenen Knowhow vor.

Seitens BAFU / Aktionsplan Holz wird das Projekt von Frau Dr. U. Krafft betreut (Stellvertreter: Herr Werner Riegger), unterstützt durch die beiden Experten:

- Prof. em. Ernst Gehri (Rüschlikon)
- Dipl. Holzbauingenieur FH/SIA Markus Zimmermann (IHT, Rafz)
- Ing. HTL Urs Christian Luginbühl (Holzindustrie Schweiz).

4.5 Schritte der Qualitätssicherung in der gesamten Prozesskette

Die Qualitätssicherung bei der Herstellung von Buchen-BSH wird sich nach den Europäischen Normen (z.B. [6]) richten müssen, damit das Ziel erreicht werden kann, die Schaffung einer Europäischen Produktenorm für Buchen-BSH zu beeinflussen. Grundsätzlich werden sich daher die folgenden Verantwortlichkeiten für die Qualität ergeben:

- Die Sägereien müssen belegen können, dass die verkauften Buchenlamellen, die Eigenschaften aufweisen, welche (zusammen mit dem Preis) deklariert wurden.
- Die BSH-Produzenten müssen:
 - vor der BSH-Produktion eine stichprobenweise Eingangskontrolle der Bretter vornehmen.
 - die ausreichende Festigkeit der Keilzinkenverbindungen der Bretter kontrollieren.
 - die Güte der Flächenverklebung mittels geeigneter Methoden (Scherprüfung und/oder Delaminierungsprüfung) überprüfen.

4.6 Abmessungen der zu prüfenden BSH-Bauteile

4.6.1 Abmessungen in der Baupraxis

Die Marktpotentialanalyse [7] macht keine Aussagen über die von der Praxis gewünschten Trägerhöhen und Stützenquerschnitte. Laut Gehri und bisherigen Erfahrungen der n'h liegen die in der Praxis eingesetzten Abmessungen für Bauteile aus Buchen-BSH in den folgenden Bereichen:

- Stützen: maximaler Querschnitt 320/320 mm, häufiger 240/240 mm
- Biegeträger: 120/480 mm bis 160/1000 mm (Brückenquerträger)

4.6.2 Referenzgrösse bei Biegung

Derzeit basieren sämtliche Normen und Zulassungen auf einer Referenzhöhe (bei Biegung) von 600 mm. Um die Ergebnisse mit Werten der deutschen Zulassung vergleichen zu können, müssen zumindest auch einige Biegeversuche mit 600 mm Höhe gemacht werden. Gehri empfiehlt, die meisten Biegeversuche an Trägern mit den Abmessungen 120 bis 160/480 mm zu machen und bei der Auswertung der Versuchsdaten den Volumeneinfluss zu berücksichtigen. Daher sind auch einige Versuche an 600 mm hohen Trägern durchzuführen. Schubversuche sollen an Trägern mit den Höhen 480 mm und 600 mm gemacht werden.

4.6.3 Freie Prüflänge in den Zugversuchen

Da die Biege-Eigenschaften des BSH aus den Zug-Eigenschaften der Bretter und Lamellen abgeleitet werden, ist es wichtig, die Zug-Eigenschaften der Bretter und Lamellen mit derjenigen freien Prüflänge zu bestimmen, welche Basis der BSH-Modelle ist. Bisher war dies laut den europäischen Normen und auch laut der SIA-Norm 265/1 [7] eine freie Prüflänge von $\ell = 2$ m. Der kürzlich vollzogene Wechsel in den EN zu einer minimalen freien Prüflänge von $\ell = 9 \times$ Brettbreite soll daher kritisch hinterfragt werden. Es wird beschlossen die Referenzlänge (freie Prüflänge) in den Zugversuchen in Modul 2 von 1440 auf 2000 mm zu ändern.

4.7 Prüfprogramm und Stichprobengrößen

Das Prüfprogramm gemäss Forschungsantrag wird im Grundsatz bestätigt. Allenfalls sind noch einige Anpassungen bei den Prüfkörperabmessungen und Stichprobenumfängen nötig. Dies soll jeweils in den einzelnen Modulen diskutiert und entschieden werden.

4.8 Bedarf an Rohmaterial

Das für die Versuche in den Modulen 2 und 3 nötige Rohmaterial ist bei den im Projekt mitwirkenden Sägereien vorhanden. Für das Modul 4 wird mehr Material benötigt. Dieses soll rechtzeitig bestellt werden.

4.9 Zwischenziele, Termine, Meetings

Es gelten der Zeitplan und die Zwischenziele (Milestones) gemäss Projektantrag. Die Modulleiter entscheiden selbstständig, ob in den einzelnen Modulen zusätzliche Meetings nötig sind.

4.10 Regelung der Vermarktung und des Austausches der Versuchsergebnisse

Die Industriepartner wurden dazu auf, intern Diskussionen zu führen und zu entscheiden, welche Ergebnisse (nicht) zur Veröffentlichung bestimmt sind (Sortierkriterien, Verarbeitungsprozesse, Sortiermaschinen, etc.). Die Veröffentlichung eines Gros der Ergebnisse ist allerdings Grundbedingung für eine Finanzierung des Projekts durch das BAFU. Es können daher nur Detailaspekte unveröffentlicht bleiben. Der Einsatz von Buchenholz für Bauzwecke kann nur gefördert werden, wenn die wichtigsten Ergebnisse (z.B. Kriterien zur Festigkeitssortierung, Regeln und Prozesse der Qualitätskontrolle) öffentlich sind.

Die PL hat eine Word-Vorlage erarbeitet, in welcher die beteiligten Firmen ihre Angaben betreffend Einbringen von Firmenwissen und Nutzung der Projektergebnisse machen können. Zur Zeit liegt ein entsprechendes Dokument der n'h bereits vor (siehe Abschnitt 5).

4.11 Weitere Themen

4.11.1 Ausbeute

Aus dem bisherigen Verlauf der Diskussion wurde klar, dass nicht alle Projektpartner unter dem Begriff „Ausbeute“ das Gleiche verstehen, bzw. die Ausbeute nach denselben Verfahren bezeichnen. Die PL hat daher entschieden, U.C. Luginbühl zu beauftragen, Ordnung in diese Diskussion zu bringen und die Ergebnisse eigener Untersuchungen in das Projekt einfließen zu lassen.

Im Zusammenhang der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit des entstehenden Produkts und sämtlicher Produktionsschritte ist die Ausbeute ein zentraler Parameter. So sind z.B. die Holzverluste und die Querschnittseinbussen bei der Trocknung wesentliche Faktoren. Wichtig ist für die Säger, dass auch Bretter kürzerer Länge (1.5 bis 2.0 m) für die BSH-Produktion verwendet werden können.

Einige wenige Angaben zur Thematik sind auch in [8] zu finden.

Informationen zur Ausbeute in Prozessschritten vor der Brettsortierung (Einschnitt, Besäumung, etc.) sollen von den Sägern gesammelt und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt werden. Auch Angaben hinsichtlich der Resteverwertung sowie Optimierungspotential sollen gemacht werden.

4.11.2 Trocknungsprozess

Der Trocknungsprozess (TP) beeinflusst die Qualität der Bretter in wesentlichem Mass. In der Regel wird die Frischluft-/Abluft-Trocknung eingesetzt. Da der TP Sägerei-spezifisch ist, ist es unmöglich, mit den zur Verfügung stehenden Mitteln dieses Themas im Rahmen des Projektes vertieft zu untersuchen. Gemäss Experte Gehri müsste die Weiterentwicklung des TP im Interesse jeder einzelnen Sägerei und daher deren Aufgabe sein. Letztlich herrschte weitestgehend Konsens darüber, dass für dieses Projekt die Angabe des gewählten Trocknungsverfahrens ausreichend ist.

In klimatisierten Gebäuden sind Holzfeuchten (HF) von ca. 8% üblich. Leichtes Quellen des BSH ist betreffend Rissbildung günstiger als Schwinden. Deshalb sollte trockenes (HF = $8 \pm 2\%$) Rohmaterial für die BSH-Produktion verwendet werden. Die Holzfeuchte bei der Sortierung muss also $8 \pm 2\%$ betragen. Weitere Verfahrensschritte (z.B. Dämpfung, Behandlung etc.) müssen durch die Sägereien dokumentiert und kommuniziert werden.

Es wurde diskutiert, ob mittels einer Festigkeitssortierung nass und trocken ungeeignetes Material vor dem TP identifiziert werden könnte. Die Fragestellung „Sortierung nass / trocken“ könnte an einer kleinen Stichprobe im Modul 2 untersucht werden.

Betreffend mechanische Eigenschaften des BSH ist die HF v.a. für Druckbeanspruchungen als Einflussparameter wesentlich. Bei Biegung und Zug ist der HF-Einfluss weniger relevant.

4.11.3 Qualitätskontrolle der Flächenverklebung

Die derzeitigen Prüfverfahren und Normenforderungen wurden für Nadelholz entwickelt und sind nur beschränkt auf Buche anwendbar. Zudem sollten die Prüfverfahren und Anforderungswerte auf den Einsatzbereich (Feuchtekategorie 1, Feuchtekategorie 2) abgestimmt sein. Die

Untersuchung der Qualität der Flächenverklebung ist Thema des Moduls 3. Allerdings sprengt die Entwicklung neuer Prüfverfahren bzw. die Erarbeitung entsprechender Normen das Projekt. Zur vertieften Untersuchung dieser Problematik müsste ein weiteres Projekt beantragt werden.

4.11.4 Informationsfluss zur Europäischen Normierung (CEN/TC 124)

Die Information der CEN-Normungsgremien kann erst erfolgen, wenn gesicherte Projektergebnisse vorliegen. Diese Aktivität ist daher erst im Modul 7 geplant. Die Europäische Norm für Laubholz-BSH ist derzeit auf Eis gelegt, bis Ergebnisse aus dem EU Hardwoods-Projekt vorliegen.

4.11.5 Informationsaustausch mit dem Europäischen Projekt „EU Hardwoods“

Ansprechpartner betreffend das EU Hardwood-Projekt (Projektinhalt, Ziele und beteiligte Institute, Verbände und Firmen siehe: <http://km.fgg.uni-lj.si/hardwood>) sind die Projektkoordinatoren Dr. Peter Lisenmann (p.lisenmann@holzforschung.at) und Dr. Andreas Neumüller (a.neumueller@holzforschung.at) von der Holzforschung Austria.

P. Lisenmann hat den Status des Projekts am 7th WoodWisdom-Net Research Programme Seminar, welches am 14./15.09.2015 an der Empa Dübendorf stattfand, an Hand der in Ab-

 WoodWisdom-Net Seminar – Dübendorf-Zürich 14-15 September 2015

Lessons learnt and open questions

- listen to your partners
→ new ideas for a successful project emerge regularly
- project observers
→ at least within EU Hardwoods the role is not absolutely clear



bildung 1 -

Abbildung 4 gezeigten Slides kurz vorgestellt. Das Projekt hat in der Zwischenzeit Halbzeit erreicht. Erste Ergebnisse zu den Themen „Festigkeitssortierung von Kastanienholz“ und „Numerische Untersuchungen zum Einfluss von durch HF-Wechsel induzierten Spannungen in Brettsperrholz aus Buche“ liegen vor. Die Resultate sind allerdings weder publiziert noch anderweitig öffentlich zugänglich. Die bisher von der EU Hardwoods-Gruppe zur Verfügung gestellten Informationen sind leider nur sehr rudimentär. Dies trifft auch für die Präsentation des Projekts durch A. Neumüller anlässlich des Workshops zur Erhebung des internationalen

Wissensstandes [9] zu und deckt sich mit Erfahrungen von Bacher (microtec), der feststellte, dass wenig Auskunftsreise besteht. Bacher nennt Didier Reuling als Kontakt zu französischen Forschungstätigkeiten betreffend Buche und Kastanie.

Steiger machte Lisenmann auf das von der bfh/ahb (Bettina und Steffen Franke, Andreas Müller) gemeinsam mit der Empa (Gerhard Fink und René Steiger) organisierte Mini-Symposium „MS1-07: Hardwood in structural engineering“ an der 13th World Conference on Timber Engineering WCTE 2016 (wcte2016.conf.tuwien.ac.at) und auf die entsprechende Deadline für die Einreichung von Abstracts aufmerksam. Lisenmann versprach, seine Projektpartner auf diese Möglichkeit zur Publikation und Diskussion der Projektergebnisse aus dem EU Hardwoods-Projekt aufmerksam zu machen. Im Sinne eines Informationsaustausches stellte Steiger im Nachgang zum WoodWisdom-Net Seminar Lisenmann eine Kurzbeschreibung inkl. Zielsetzung und Organisation des AP Holz-Projektes zu. In der Folge stellte auch Lisenmann ein Organigramm des EU Hardwood-Projekts zur Verfügung (Abbildung 5).

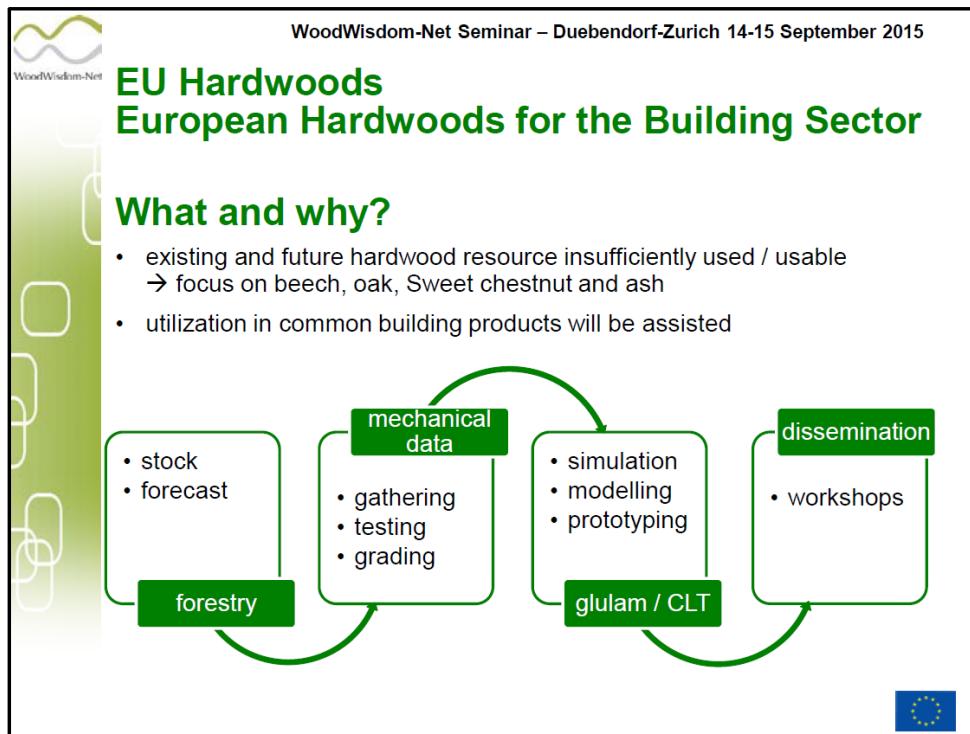


Abbildung 1: Präsentationsfolie 1 zum EU Hardwoods-Projekt (P. Lisenmann, Holzforschung Austria)

 WoodWisdom-Net Seminar – Duebendorf-Zurich 14-15 September 2015

Who?

	Holzforschung Austria Bundesforschungszentrum für Wald Fachverband der Holzindustrie Österreichs
	University of Ljubljana CBD – Contemporary Building Design
	MPA Stuttgart Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Studiengemeinschaft Holzleimbau)
	FCBA SIMONIN SAS



Abbildung 2: Präsentationsfolie 2 zum EU Hardwoods-Projekt (P. Lisenmann, Holzforschung Austria)

 WoodWisdom-Net Seminar – Duebendorf-Zurich 14-15 September 2015

Progress towards project objectives

finished	started	planned
<input checked="" type="checkbox"/> analysis of standing stock <input checked="" type="checkbox"/> data gathering	<input checked="" type="checkbox"/> forecast of future stock <input checked="" type="checkbox"/> data analysis <input checked="" type="checkbox"/> CT scanning of hardwood logs <input checked="" type="checkbox"/> simulation of glulam build-ups <input checked="" type="checkbox"/> rolling shear test for CLT	<input checked="" type="checkbox"/> test plan → beech in tension <input checked="" type="checkbox"/> production of first glulam batch



Abbildung 3: Präsentationsfolie 3 zum EU Hardwoods-Projekt (P. Lisenmann, Holzforschung Austria)

WoodWisdom-Net Seminar – Duebendorf-Zurich 14-15 September 2015

Lessons learnt and open questions

- listen to your partners
→ new ideas for a successful project emerge regularly
- project observers
→ at least within EU Hardwoods the role is not absolutely clear



Abbildung 4: Präsentationsfolie 4 zum EU Hardwoods-Projekt (P. Linsenmann, Holzforschung Austria)

work package	lead institute	contact person	e-mail
WP1 Hardwood supply chain	FVA	Lorenz Breinig	lorenz.breinig@forst.bwl.de
WP2 Basic hardwood strength data and grading tools	HFA	Peter Linsenmann	p.linsenmann@holzforschung.at
WP3 Adhesives for structural hardwood bonding	MPA	Maren Hirsch	maren.hirsch@mpa.uni-stuttgart.de
WP4 Glulam made of hard-woods and / or softwoods	FCBA	Guillaume Legrand	guillaume.legrand@fcba.fr
WP5 Cross-laminated hybrid timber	MPA	Maren Hirsch	maren.hirsch@mpa.uni-stuttgart.de
WP6 Dissemination	Uni Ljubljana	Goran Turk	goran.turk@fgg.uni-lj.si

Abbildung 5: Arbeitspakete inkl. verantwortliche Institute und Personen im EU Hardwoods-Projekt

5 Deliverables per 30.09.2015

Folgende Dokumente wurden innerhalb des Moduls 1 erarbeitet:

- Template „Vereinbarung betreffend von Industriepartnern in das Projekt eingebrachtes Wissen und Nutzung der Projektergebnisse“
- Unterzeichnete Vereinbarung der n'h betreffend in das Projekt eingebrachtes Wissen und Nutzung der Projektergebnisse

6 Literatur

- [1] Protokoll der Projekt-Kick off-Sitzung vom 30.06.2015 inkl. Anhänge.
- [2] Protokoll der Kick off-Sitzung des Moduls 2 vom 15.09.2015 inkl. Anhänge.
- [3] CEN 2004: EN 1995-1-1: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.
- [4] SIA 2012: Norm SIA 265: Holzbau.
- [5] Steiger R., Frangi A., Kobel P. 2013: Schlussbericht WHFF-Projekt 2011.17: Brettschichtholz aus Laubholz - Marktimplmentierung als Bauprodukt. www.bafu.admin.ch/whff.
- [6] CEN 2013: EN 14080: Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen.
- [7] SIA 2009: Norm SIA 265/1: Holzbau – Ergänzende Festlegungen.
- [8] Berner Fachhochschule 2015: Grundlagen zum Marktpotential für verklebte Laubholzprodukte mit Fokus Buchen-Brettschichtholz. Forschungsbericht zum BAFU-Forschungsmandat R.006445-10-76FE-01 im Rahmen des Aktionsplans Holz. www.bafu.admin.ch/aktionsplan-holz.
- [9] Steiger R., Franke S., Frangi A. 2014: Brettschichtholz aus Buche und Verbindungen in Buchen-Brettschichtholz – Workshops zur Erhebung des aktuellen Wissensstands in Deutschland, Österreich und der Schweiz. Forschungsbericht zum BAFU-Forschungsmandat 110002635 / 8V80/09.0063.PJ/0195 im Rahmen des Aktionsplans Holz. www.bafu.admin.ch/aktionsplan-holz.

Homogenes und kombiniertes Buchen-Brettschichtholz

**Technische Grundlagen zur
Marktimplementation als Bauprodukt
für Biegeträger und Stützen**

**Bundesamt für Umwelt BAFU
Aktionsplan Holz**

Projekt REF-1011-04200

Technischer Schlussbericht

Modul 2

Rohmaterialverarbeitung

René Steiger
Thomas Ehrhart

Empa, Abt. Ingenieur-Strukturen
ETH Zürich

Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit:
Urs Christian Luginbühl

Holzindustrie Schweiz

Inhaltsverzeichnis

1 RAHMEN UND ZIELE DES PROJEKTS	43
2 INHALTE UND ZIELE VON MODUL 2	43
3 MEILENSTEINE.....	43
4 VORGEHENSWEISE / METHODE.....	43
4.1 HERKUNFTSGEBIETE	44
4.2 VERWENDETE RUNDHOLZ-QUALITÄTEN UND ANGEWENDETE TROCKNUNGSPROZESSE	
45	
4.3 VORSORTIERUNG	46
4.4 ZUGVERSUCHE	48
5 ERGEBNISSE.....	49
5.1 FORSCHUNGSRSLTATE	49
5.1.1 <i>Kriterien zur Festigkeitssortierung in die Klassen T33, T42 und T50</i>	49
5.1.2 <i>Aus der Festigkeitssortierung resultierende mechanische Eigenschaften</i>	51
5.1.3 <i>Überprüfung der Eigenschaften getrennt nach Sägerei.....</i>	53
5.1.4 <i>Einfluss der akzeptierten Mindestlänge auf die Materialausbeute</i>	54
5.1.5 <i>Anmerkungen zu kombinierter visueller und mechanischer Sortierung:</i>	56
5.1.6 <i>Optimierungspotential in der Prozesskette.....</i>	56
5.2 MEILENSTEINE	58
5.3 BETRACHTUNGEN ZUR WIRTSCHAFTLICHKEIT	58
6 DELIVERABLES IN MODUL 2	58
7 LITERATUR.....	59
ANHANG: BETRACHTUNGEN ZUR WIRTSCHAFTLICHKEIT VON URS	
CHRISTIAN LUGINBÜHL, HOLZINDUSTRIE SCHWEIZ	60

1 Rahmen und Ziele des Projekts

Durch die Angabe von Eigenschaftswerten, Bemessungsgrundlagen und von Anforderungen an die Qualitätssicherung und -kontrolle für die gesamte Produktionskette sollen die technischen Rahmenbedingungen geschaffen werden, dass homogenes und kombiniertes Buchen-BSH der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und, wenn möglich, GL55 vermehrt als qualitätsge- sichertes Bauprodukt in Form von Biegeträgern und Stützen in der Feuchtekategorie 1 eingesetzt wird. Ausgehend von der Rohmaterialbereitstellung (Auswahl, Trocknung, Festigkeitssortierung) werden sämtliche Prozessschritte (Keilzinkung, Flächenverklebung) bis zur mechanischen Prüfung und Bemessung des fertigen Produkts in die Untersuchung einbezogen.

2 Inhalte und Ziele von Modul 2

Das Projekt-Modul 2 umfasst die Rohmaterialverarbeitung und die Festigkeitssortierung der Bretter. Aufgrund des grossen Einflusses der Brettqualität auf die Qualität des BSH-Trägers ist die Festigkeitssortierung als wesentliches Element des Forschungsprojektes zu sehen. Die Projektetappen in Modul 2 sind die folgenden:

- Dokumentation der Rohmaterialherkunft.
- Vorsortierung, Einschnitt und Trocknung des Rundholzes.
- Festigkeitssortierung der Bretter.
- Bestimmung der mechanischen Eigenschaften (Festigkeit und Steifigkeit) und Rohdichte der Bretter.
- Deklaration der Bretteigenschaften.
- Qualitätskontrollen in der Sägerei.

3 Meilensteine

In das Modul 2 fallen die folgenden Projekt-Meilensteine:

- Meilenstein 1: Untersuchungen zur Bereitstellung des Rohmaterials
→ Ausreichend hohe und ausreichend wirtschaftliche Ausbeute?
- Meilenstein 2: Mechanische Eigenschaften der Bretter
→ Ausreichend hohe Zugsteifigkeiten und Zugfestigkeiten zur Herstellung von BSH der FK GL40, 48 und 55?

4 Vorgehensweise / Methode

Basierend auf den Ergebnissen früherer Arbeiten (u.a. Frühwald & Schickhofer, 2004; Blass et al., 2005; Frese & Blass, 2006) sowie den Erfahrungen der am Projekt beteiligten Firma *neue Holzbau AG* wurde eine kombinierte Festigkeitssortierung bestehend aus visueller und maschineller Sortierung (dynamischer E-Modul ermittelt aus der Rohdichte und der Eigenfrequenz der Bretter) angewandt. Die massgeblichen Sortierparameter wurden dokumentiert. So können die aufgenommenen Sortierparameter jedem individuellen Brett zugeordnet werden. Dadurch kann die Qualität der Sortiermethoden optimal beurteilt werden. Dasselbe gilt für den Einfluss der Brettqualität auf die mechanischen Eigenschaften der aus den Brettern pro-

duzierten BSH-Träger. An den sortierten Brettern wurden Untersuchungen zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften und der Rohdichte durchgeführt. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Festigkeit sowie die Steifigkeit unter Zugbeanspruchung parallel zur Faser gerichtet. Die Versuche wurden auf der Zugprüfmaschine der ETH Zürich nach den Regeln der EN 408 (CEN, 2012) durchgeführt.

In einem ersten Schritt wurde untersucht, welche visuellen und mit einfachen Methoden apprätiv messbaren Indikatoren geeignet sind, das Rohmaterial verschiedenen Festigkeitsklassen zuzuordnen. Durch einen Vergleich der Sortierparameter mit den gemessenen Materialeigenschaften kann die Eignung und Trennschärfe der eingesetzten Sortiermethoden beurteilt werden. Im zweiten Schritt wurde das generelle Potential des Rohmaterials zur Herstellung von Bu-BSH der im Projekt anvisierten Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55 untersucht und die Klassengrenzen auch unter Beachtung der Ausbeuten in den einzelnen Klassen optimiert.

4.1 Herkunftsgebiete

Das untersuchte Rohmaterial wurde von folgenden Sägereien geliefert (Abbildung 1):

- I: *Corbat Holding SA*: Jura (Vendlincourt, JU)
- II: *Richard Lötscher AG*: Mitteland (Burgdorf, BE)
- III: *Sägerei Koller*: Mittelland (Attelwil, AG)
- IV: *Konrad Keller AG*: Ostschweiz (Unterstammheim, ZH)

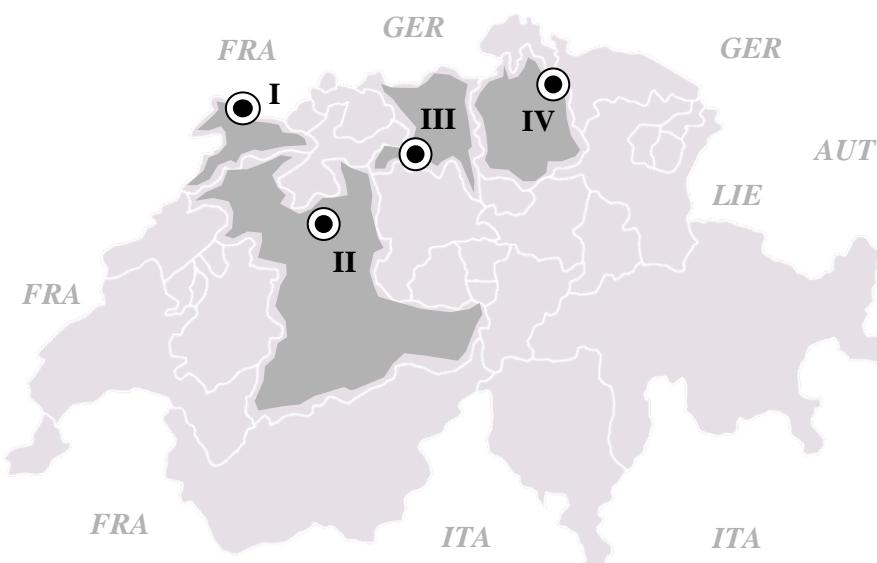


Abbildung 1: Standorte der vier liefernden Sägereien.

Die Auswahl der Sägereien erfolgte unter verschiedenen Gesichtspunkten. Die Sägerei *Corbat Holding SA* (Vendlincourt / JU) ist die grösste Schweizerische Laubholzsägerei und befindet sich im Kanton Jura, der mit 48% Waldflächenanteil am Gesamtareal und einem Laubholzanteil von fast 50% in beiden Kategorien über dem Schweizerischen Durchschnitt liegt (Jahrbuch Wald und Holz, 2015). Als regelmässiger Lieferant der *neue Holzbau AG*, dem am Projekt beteiligten BSH-Produzenten, wurde zudem die Sägerei *Richard Lötscher AG* (Burgdorf / BE) als Lieferant gewählt. Weitere, von Seiten der *Holzindustrie Schweiz (HIS)* genannte,

potentiell interessierte Sägereien wurden kontaktiert, worauf sich die *Sägerei Koller* (Attelwil / AG) sowie die *Konrad Keller AG* (Unterstammheim / ZH) für eine Mitwirkung am Projekt entschieden. Die Untersuchung des Einflusses lokaler Wuchsbedingungen, wie beispielsweise der Bodenart, Geländeneigung, Walddichte, etc., war im Rahmen dieses Projektes nicht vorgesehen und hätte einen deutlich erhöhten Versuchsumfang bedungen. Die Lieferung von Material von vier unterschiedlichen Sägereien sollte aber zumindest sicherstellen, dass nicht nur eine, von den genannten Wuchsbedingungen möglicherweise besonders begünstigte oder benachteiligte Stichprobe, untersucht wird.

4.2 Verwendete Rundholz-Qualitäten und angewendete Trocknungsprozesse

Im Rahmen des Projektes wird der Einsatz von Buchenbrettschichtholz in der Feuchtigkeitsklasse 1 angestrebt. Aufgrund des ausgeprägten Quell- und Schwindverhaltens der Holzart Buche wurde mit $u = 8 \pm 2\%$ eine Ausgleichsfeuchtigkeit bei der Lieferung und Materialprüfung definiert, welche unter der normativen Referenzfeuchte liegt (gem. EN 408: „Alle Prüfungen sind an Prüfkörpern durchzuführen, die im Normalklima bei $20 \pm 2^\circ\text{C}$ und $65 \pm 5\%$ relativer Luftfeuchte klimatisiert wurden.“ → entspricht ca. $u = 12\%$). Hintergrund der gewählten Vorgabe ist, dass das Holz bei der Verklebung jene Feuchtigkeit besitzen soll, die auf Höhe der Ausgleichsfeuchte unter später vorherrschenden Klimabedingungen, bzw. leicht darunter, liegt. So entspricht $u = 8\%$ etwa einem in Büro- und Wohngebäuden realistischen eher trockenen, Raumklima mit einer Lufttemperatur von 24°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 35% (Drewes, 1985). Damit soll das Schwinden und die damit verbundene Rissbildung des BSH stark reduziert bzw. vermieden werden. Die von den Sägereien verwendeten Rundholz-Qualitäten (Tabelle 1), angewendeten Trocknungsmethoden (Tabelle 2) sowie gegebenenfalls weitere Prozessschritte (Tabelle 3) sind nachfolgend aufgelistet.

Tabelle 1: Verwendete Rundholz-Qualitäten je Sägerei

Sägerei	Verwendete Rundholz-Qualitäten
<i>Corbat</i>	C (80%) und B (20%)
<i>Keller</i>	n.V.
<i>Koller</i>	A/B bis C
<i>Lötscher</i>	B/C; Rundholz mit wenigen Ästen aber mit Braunkern. Durchmesser 40 cm+

Tabelle 2: Trocknungsmethode je Sägerei

Sägerei	Trocknungsmethode
<i>Corbat</i>	Zunächst Lufttrocknung im Freien (3 gestapelte Pakete à 1 m Höhe + 1.7 to Beschwerung), anschliessend künstliche Trocknung im Frischluft/Abluft-System (Bollmann-Ligonomat) ohne Gewicht.
<i>Keller</i>	Trocknung im Frisch/Ablufttrockner (maximal 4 gestapelte Pakete, ohne zusätzliche Beschwerung).
<i>Koller</i>	Trocknung im Frisch/Ablufttrockner (in 13 Tagen auf 10% Holzfeuchte, Stapelhöhe 4.5 m + Beschwerung mit einem Paket geringer wertiger Ware).
<i>Lötscher</i>	Zunächst Lufttrocknung im Freien, anschliessend Trocknung in der Vakuumkammer auf die gewünschte Holzfeuchte.

Tabelle 3: Weitere Prozessschritte je Sägerei

Sägerei	Weitere Prozessschritte

<i>Corbat</i>	Trocknung vor Zuschnitt, Gesamtausbeute 27%, keine Dämpfung.
<i>Keller</i>	Keine Dämpfung.
<i>Koller</i>	Keine Dämpfung.
<i>Lötscher</i>	Keine Dämpfung.

4.3 Vorsortierung

Bei den vier Sägereien wurden gehobelte Buchenholzbretter mit den Abmessungen $b \times t \times l = 160 \times 25 \times 3000$ mm und mit einer Holzfeuchte von $8 \pm 2\%$ bestellt. Die Dicke der bestellten bzw. geprüften Bretter entspricht dabei dem geplanten Endmass im fertigen BSH. Die Dicke von 25 mm ist im Vergleich zu BSH aus Nadelholz, wo i.d.R. Brettstärken von bis etwa 40 mm verwendet werden, als vergleichsweise gering anzusehen. Dies ist einerseits dem in der Literatur beschriebenen positiven Verhalten dünnerer Bretter hinsichtlich der Delaminierung der Klebfugen bei der Flächenverklebung, andererseits den (bei der Verwendung von Buche) auf diese Stärke beschränkten Erfahrungswerten des BSH produzierenden Projektpartners *neue Holzbau AG* geschuldet.

Hinsichtlich visueller Kriterien wurden bei der Bestellung bereits Vorgaben gemacht, die in Tabelle 4 ersichtlich sind. Das Material der Sägereien A und B wurde seitens der ETH, jenes der Sägereien C und D durch die Sägereien vorsortiert. Dieser Umstand ist insbesondere für die Betrachtungen in 5.1.2 und 5.1.3 relevant.

Nach Lieferung der Buchenbretter wurden an der ETH Zürich folgende (visuellen) Parameter erfasst:

- Lage und Durchmesser von Ästen und Rindeneinwüchsen (allseitig).
- Markröhre, Insektenfrass, Baumkante und wellenförmige Fladern (nicht vorhanden / vorhanden).
- Rotkern (nicht vorhanden / < 10% der Brettoberfläche / > 10% der Brettoberfläche).
- Verfärbung (nicht vorhanden / nagelfest auf < 10% der Brettoberfläche / nagelfest auf > 10% der Brettoberfläche / nicht nagelfeste Verfärbung).
- Krümmung in Längs- und Querrichtung.
- Sichtbare Faserablenkungen (nicht vorhanden / vorhanden + Lage).

Die Ergebnisse dieser Aufnahme wurden zur visuellen Sortierung der Bretter in die vorläufigen visuellen Klassen 1*, 2* und 3* gemäss Tabelle 4 herangezogen. Die Subjektivität bei der visuellen Sortierung, die bei der Bewertung durch die verschiedenen Sägereien gegebenenfalls Einfluss auf die Klassierung der Lamellen hat, kann dadurch zumindest innerhalb dieser Untersuchungen eliminiert werden.

Tabelle 4: Kriterien für die Bestellung und visuelle Vorsortierung von Buchenbrettern.

APHolz_REF-1011-04200_BuBSH			
Sortiermerkmale	Sortierklassen		
	3*	2*	1*
1. Äste - Einzelast - Astansammlung - Schmalseitenast	≤ 50 mm ≤ 60 mm zulässig	≤ 30 mm nicht zulässig zulässig	≤ 15 mm nicht zulässig nicht zulässig
2. Rindeneinwuchs	≤ 50 mm	≤ 30 mm	≤ 10 mm
3. Markröhre	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
4. Risse - Schwindrisse - Blitz- und Frostrisse - Ringschäle	zulässig nicht zulässig nicht zulässig	zulässig nicht zulässig nicht zulässig	nicht zulässig ^a nicht zulässig nicht zulässig
5. Baumkante	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
6. Krümmung - Längskrümmung - Verdrehung - Querkrümmung	≤ 18 mm ≤ 20 mm ≤ 8 mm	≤ 12 mm ≤ 10 mm ≤ 5 mm	≤ 12 mm ≤ 10 mm ≤ 3 mm
7. Rotkern, Verfärbung, Fäule - Rotkern - nagelfeste Verfärbungen - Fäule	zulässig ≤ 90 mm nicht zulässig	zulässig ≤ 60 mm nicht zulässig	zulässig nicht zulässig nicht zulässig
8. Insektenfrass	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
9. Wellenförmige Fladern	zulässig	zulässig	nicht zulässig
10. Sonstige Merkmale - sichtbare Faserablenkung in Schmal- oder Breitseite	zulässig	zulässig	nicht zulässig
Gültig für Brettänge 3000 mm und Brettbreite von b = 160 mm			
^a Endrisse bis 50 mm sind zulässig			

Neben den visuellen Sortiermerkmalen wurden apparativ mit zwei verschiedenen Geräten (MTG Timber Grader des Herstellers brookhuis <http://www.brookhuis.com/> und ViScan des Herstellers Microtec <http://microtec.eu/de/> ein physikalischer und ein mechanischer Indikator ermittelt:

- Rohdichte
- Dynamischer Elastizitätsmodul (auf Basis der Eigenfrequenz und der Rohdichte)

Mithilfe einer Kombination von visueller und maschineller Festigkeitssortierung wurde eine vorläufige Klassierung der Lamellen in die Sortierklassen T33*, T42* und T50* vorgenommen.

men (Tabelle 5). Diese Vorgehensweise basiert auf den Erfahrungen der *neue Holzbau AG*, den Erkenntnissen aus dem Vorprojekt sowie den Festlegungen in der DIN 4074-5.

Tabelle 5: Grenzen des dynamischen Elastizitätsmoduls für die vorläufige Festigkeitsklassierung in den jeweiligen visuellen Sortierklassen 1 – 3.

Visuelle Sortierklasse	Sortierklassen		
	T33*	T42*	T50*
1*	> 10900	> 13100	> 14200
2*	> 12000	> 14200	> 16900
3*	> 13100	> 16900	nicht zulässig

4.4 Zugversuche

Zur Überprüfung der Effektivität der Festigkeitssortierung wurden je Sortierklasse (T33*, T42* und T50*) 50 Zugversuche durchgeführt. Die Zugprüfung erfolgte auf einer speziell für diesen Zweck entwickelten Zugprüfmaschine an der ETH Zürich. Die Versuche wurden mit einer freien Prüflänge von $l_p = 2060$ mm durchgeführt, wobei lokale Schwachstellen (z.B. Äste und Rindeneinschlüsse) – sofern möglich – stets innerhalb des geprüften Bereiches positioniert wurden. Schwachstellen, die wegen ihrer Lage nahe der Bretttenden nicht geprüft werden konnten (erforderlicher Einspannbereich von beidseitig 330 mm), wurden in Betrachtungen der Festigkeitssortierung nicht berücksichtigt.

Da die optimale bzw. sich aus dem BSH-Rechenmodell ergebende Prüflänge bei Zugversuchen umstritten ist, wurden zusätzlich je 50 Zugversuche an Brettern der Sortierklasse T42* mit zwei kürzeren Brettlängen durchgeführt. Wegen der Lochabstände in den Stahlprofilen der Zugprüfmaschine von 160 mm waren nur diskrete Änderungen der Prüflänge möglich.

- Freie Prüflänge $l_{p,1} = 2060$ mm $\approx 13 \times b$ (gemäß EN 1194 [CEN, 1999], in der Vorgängernorm der aktuellen BSH-Norm EN 14080 [CEN, 2013], war die Prüflänge mit $l_p = 2000$ mm vorgegeben).
- Freie Prüflänge $l_{p,2} = 1580$ mm $\approx 10 \times b$ (in Anlehnung an die Prüfnorm EN 408).
- Freie Prüflänge $l_{p,3} = 1100$ mm $\approx 7 \times b$.

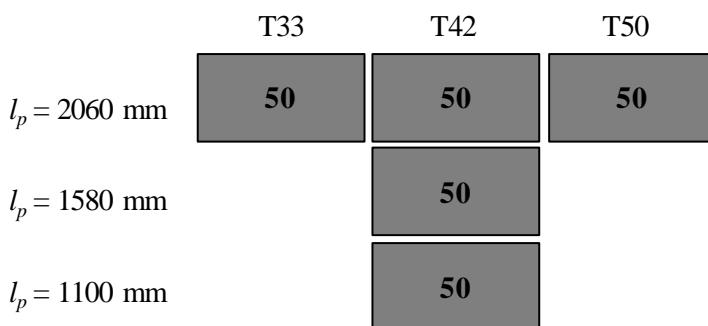


Abbildung 2: Durchgeführte Zugversuche: Stichprobengrößen und geprüfte Längen in den provisorischen Festigkeitsklassen T33, T42* und T50*.*

Entsprechend der bei der Meilenstein-Sitzung vom 22.03.2016 im allgemeinen Konsens getroffenen Entscheidung wurden darüber hinaus Zugversuche an der im Rahmen der visuellen Festigkeitssortierung aussortierten Ausschussware (betrifft 44 Bretter) durchgeführt. Diese sind erforderlich, um zu überprüfen, ob die unteren Grenzwerte der Sortierkriterien aus technischer Sicht zuverlässig und aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll sind, d.h. keine Bretter mit hoher Festigkeit aussortiert wurden. Die die Festigkeit und Steifigkeit verifizierenden Zugversuche wurden mit einer freien Prüflänge von 2060 mm durchgeführt.

5 Ergebnisse

5.1 Forschungsresultate

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse aus Modul 2 erläutert. Vertiefende Betrachtungen und Erläuterungen sind in den Dokumenten im Anhang zu diesem Bericht enthalten.

5.1.1 Kriterien zur Festigkeitssortierung in die Klassen T33, T42 und T50

Die Kriterien zur visuellen (Tabelle 6) und apparativen (Tabelle 7) Festigkeitssortierung wurden unter der Annahme optimiert, dass alle drei T-Klassen (T33, T42 und T50) angestrebt werden. Sollte im Rahmen einer angepassten Sortierkampagne auf die höchste T-Klasse verzichtet werden, stellen die angegebenen Sortiergrenzen konservative Vorgaben dar.

Für die visuelle Klassierung der Bretter wurde jeweils die gesamte Brettlänge von 3000 mm betrachtet, d.h. einzelne Äste, die die maximal zulässige Grösse überschreiten, führen unabhängig von ihrer Lage im Brett zunächst dazu, dass das gesamte Brett als Ausschuss klassiert wird. Da einzelne Schwachstellen bei der Produktion von BSH herausgekappt und die verbleibenden Brettabschnitte anschliessend keilgezinkt werden können, wurde zusätzlich der Einfluss der akzeptierten Mindestlänge auf die Materialausnutzung untersucht (siehe 5.1.4).

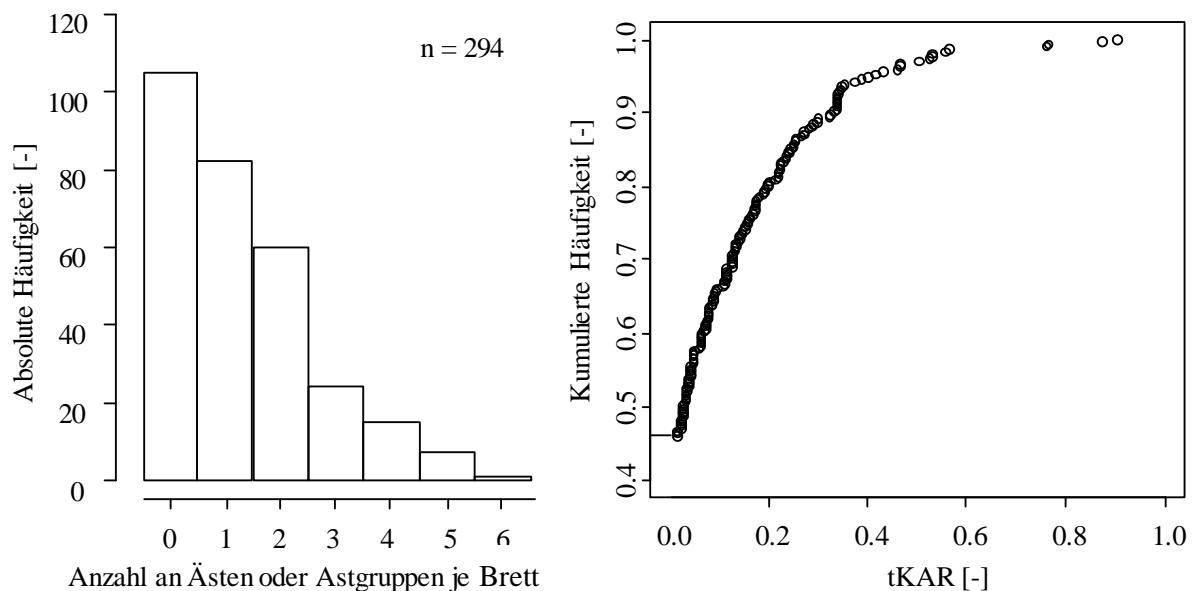


Abbildung 3: Anzahl an Ästen je Brett (links) sowie grösster Astparameter tKAR je Brett (rechts).

Aufgrund der im Vergleich zu Nadelholz deutlich geringen Anzahl an Ästen (Abbildung 3) ist die Vermeidung offensichtlicher Bruchstellen – wie sie Äste mit tKAR-Werten > 0.20 darstellen – durch Heraustrennen und anschliessender Keilzinkung von grosser Bedeutung für eine zuverlässige Festigkeitssortierung und für eine ausreichende Wirtschaftlichkeit des Produkts „Buchenbrett für Bu-BSH“. Des Weiteren sind Astansammlungen sehr selten. Die untersuchten Bretter legen deshalb keine Unterscheidung der Grenzwerte für Einzeläste und Astansammlungen nahe.

Tabelle 6: Grenzwerte für die visuelle Festigkeitssortierung von Buchenbrettern (Vorsortierung von Buchenbrettern zur Produktion von Bu-BSH der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55).

APHolz_REF-1011-04200_BuBSH			
Sortiermerkmale	Sortierklassen		
	3	2	1
1. Äste			
- Einzelast (KAR)	≤ 0.20	≤ 0.10	≤ 0.05
- Astansammlung (tKAR)	≤ 0.20	≤ 0.10	≤ 0.05
2. Rindeneinwuchs (KAR)	≤ 0.20	≤ 0.10	≤ 0.05
3. Markröhre	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
4. Risse			
- Schwindrisse	zulässig	zulässig	nicht zulässig ^a
- Blitz- und Frostrisse	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
- Ringschäle	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
5. Baumkante	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
6. Krümmung			
- Längskrümmung	≤ 18 mm	≤ 12 mm	≤ 12 mm
- Verdrehung	≤ 20 mm	≤ 10 mm	≤ 10 mm
- Querkrümmung	≤ 8 mm	≤ 5 mm	≤ 3 mm
7. Rotkern, Verfärbung, Fäule			
- Rotkern	zulässig	zulässig	zulässig
- nagelfeste Verfärbungen	≤ 90 mm	≤ 60 mm	nicht zulässig
- Fäule	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
8. Insektenfrass	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
9. Wellenförmige Fladern	zulässig	zulässig	nicht zulässig
10. Sichtbare Faserablenkung	zulässig	zulässig	nicht zulässig
Gültig für Brettlänge 3000 mm und Brettbreite von $b = 160$ mm			
^a Endrisse bis 50 mm sind zulässig			

Tabelle 7: Grenzwerte des dynamischen Elastizitätsmoduls zur definitiven Festigkeitsklassierung von gemäss Tabelle 6 vorgängig visuell in die Sortierklassen 1, 2 und 3 eingeteilten Buchenbrettern bei einer Holzfeuchte von $u = 8 \pm 2\%$.

Visuelle Sortierklasse	Sortierklassen		
	T33	T42	T50
1	≥ 12000	≥ 14000	≥ 16500
2	≥ 14000	≥ 16500	nicht zulässig
3	≥ 16500	≥ 18000	nicht zulässig

5.1.2 Aus der Festigkeitssortierung resultierende mechanische Eigenschaften

Werden die in 5.1.1 beschriebenen Sortierregeln auf die untersuchten Bretter angewendet, so ergibt sich ein klare Auf trennung des Grundmaterials, sowohl hinsichtlich der Zugfestigkeit (Abbildung 4, links) als auch des Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung (Abbildung 4, rechts). Darüber hinaus erlauben die Sortierregeln eine zuverlässige Identifizierung von Brettern mit sehr niedriger Festigkeit (Rejects).

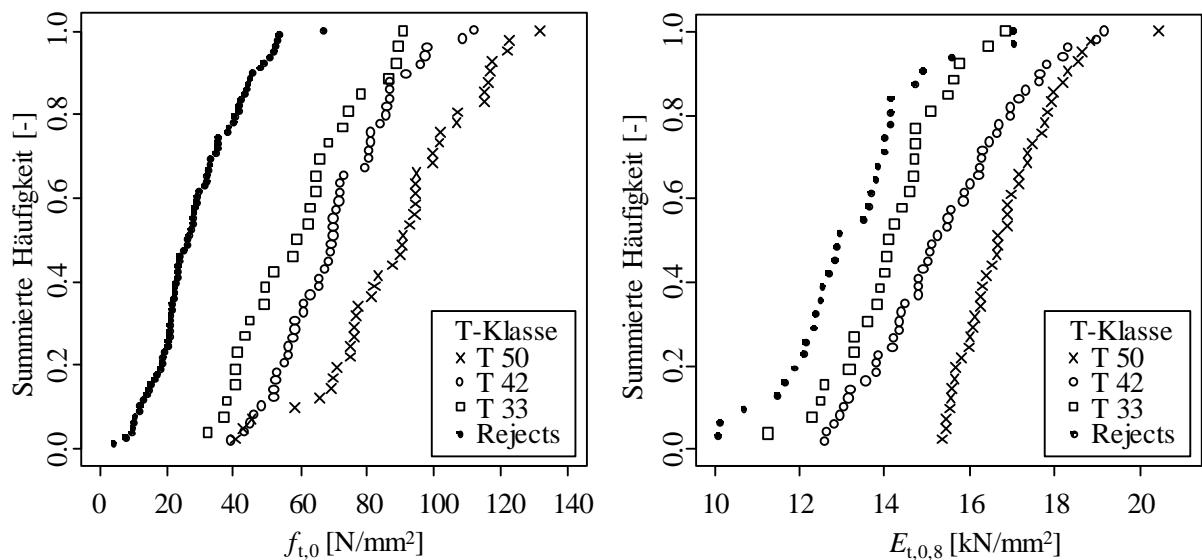


Abbildung 4: Verteilung der Zugfestigkeit (links) und des Elastizitätsmodul getrennt nach den T-Klassen sowie Ausschuss (Rejects).

In der Tabelle 8 sind die mechanischen Eigenschaften und die Dichte getrennt nach T-Klasse und Ausschuss sowie gesamthaft für eine Holzfeuchte von $u = 8\%$ aufgelistet. Die angestrebten charakteristischen Werte der Zugfestigkeit werden in allen T-Klassen erreicht. Der Elastizitätsmodul nimmt von einer T-Klasse zur nächsthöheren um ca. 10% zu. Für die Dichte wird aufgrund der nur geringen Unterschiede zwischen den drei Festigkeitsklassen ein einheitlicher Mittelwert von 720 kg/m^3 (für $u = 8 \pm 2\%$) vorgeschlagen.

Tabelle 8: Zusammenfassung der mechanischen Eigenschaften und der Dichte nach T-Klassen.

		T33	T42	T50	Ausschuss	Gesamt
$E_{t,0,8,mean}$ * $E_{t,0,8,05}$	N/mm ² N/mm ²	14200 12300	15400 12900	16900 15500	13200 10400	15200 12100
COV	-	0.09	0.11	0.07	0.13	0.13
n	-	26	49	41	31	147
$f_{t,0,mean}$	N/mm ²	59.7	70.6	89.3	28.7	56.2
$f_{t,0,05}^{**}$	N/mm ²	34.7	45.9	54.8	11.0	16.3
COV	-	0.30	0.24	0.25	0.44	0.53
n	-	26	49	41	78	194
$\rho_{8,mean}$ * $\rho_{8,05}$	kg/m ³ kg/m ³	714 651	722 683	739 673	720 668	724 668
COV	-	0.06	0.04	0.05	0.05	0.05
n	-	26	49	41	78	194

* Normalverteilung, ** Lognormalverteilung

Die Abbildung 5 ermöglicht einen Überblick zur anteiligen Zuordnung des Materials in die Festigkeitsklassen T33, T42 und T50 sowie Ausschuss getrennt nach Sägerei und gesamthaft. Wie bereits in 4.3 erwähnt, wurde die Vorsortierung der Bretter nach Tabelle 4 für die Sägereien A und B durch die ETH, für jene der Sägereien C und D jeweils durch die Sägereien selbst durchgeführt. Die Lieferung zahlreicher Bretter, die die definierten Grenzwerte, insbesondere hinsichtlich der maximal zulässigen Astgrösse (siehe auch Abbildung 10 und Abbildung 11), überschritten, führten zu einem deutlich erhöhten Anteil an Ausschuss für die beiden letztgenannten Sägereien. Ebenfalls sei erneut betont, dass zur Klassierung der Bretter deren gesamte Länge von 3000 mm betrachtet wurde. Einzelne lokale Schwachstellen führen deshalb, unabhängig von ihrer Lage, zur Zuteilung des gesamten Brettes zum Ausschuss. Eine vertiefte Betrachtung des Einflusses der akzeptierten Mindestlänge (beim Prozess der Keilzinkung) auf die Materialausnutzung findet sich in 5.1.4.

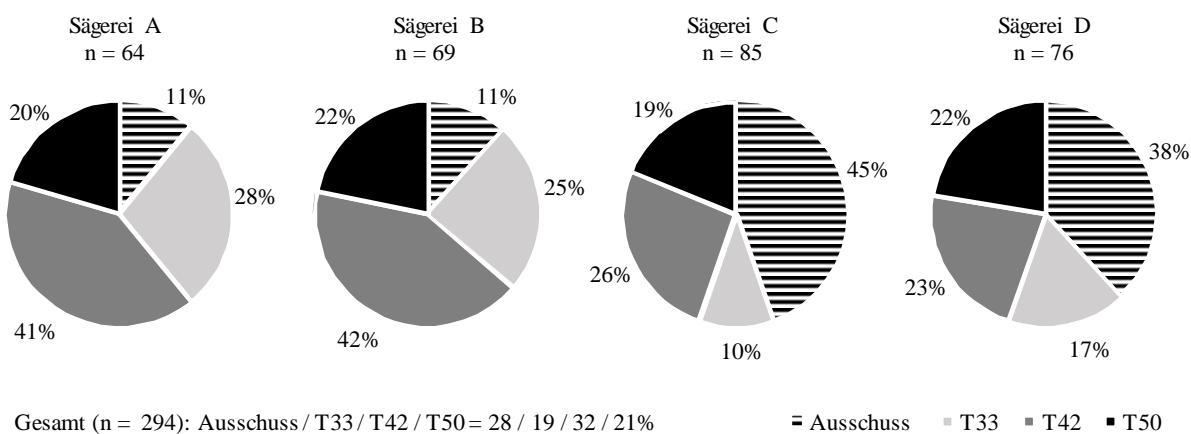


Abbildung 5: Zuordnung des Materials in die Festigkeitsklassen T33, T42 und T50 sowie Ausschuss je Sägerei.

5.1.3 Überprüfung der Eigenschaften getrennt nach Sägerei

Die bisher dargestellten Ergebnisse basieren auf dem gesamten untersuchten Material, d.h. es wurde keine Unterscheidung hinsichtlich der Sägereien getroffen. Nachfolgend werden die wesentlichen Parameter getrennt nach Sägerei dargestellt, um zu überprüfen, ob markante Unterschiede bestehen.

In Abbildung 6 ist die Festigkeit des Bretter getrennt nach den vier untersuchten Sägereien in Boxplots dargestellt. Die Box (schraffiert) umfasst dabei 50% der Werte und wird durch das erste und vierte Quartil begrenzt. Die horizontale Linie innerhalb der Box stellt den Median dar. Die ausserhalb der Box liegenden horizontalen Linien definieren die Minima bzw. Maxima, wobei Werte die mehr als das 1.5-fache des Interquartil-Abstandes über oder unter der Box liegen hierbei nicht berücksichtigt werden und als Punkt dargestellt sind („Ausreisser“).

Wird das unsortierte Material betrachtet (Abbildung 6, Kasten ganz links), so wird einerseits die grosse Streuung der Festigkeit aller Sägereien offensichtlich. Minima und Maxima aller Sägereien befinden sich auf ähnlichem Niveau, wobei der Median der Sägereien C und D unter jenem der Sägereien A und B liegt. Dies lässt sich durch die unterschiedliche Vorgehensweise bei der Wahl des gelieferten Materials erklären: Das zur Lieferung bestimmte Material der Sägereien A und B wurde durch die ETH gemäss Tabelle 4 vorsortiert. Bei den Sägereien C und D erfolgte die Vorsortierung zwar ebenfalls gemäss Tabelle 4, allerdings wurde die Auswahl durch die Sägerei selbst durchgeführt und einige der gelieferten Bretter erfüllten die Anforderungen nicht (z.B. einzelne sehr grosse und stark festigkeitsreduzierende Äste vorhanden). Deshalb ist ein direkter Vergleich der Festigkeiten der Sägereien an „unsortiertem“ Material nur sehr eingeschränkt zulässig.

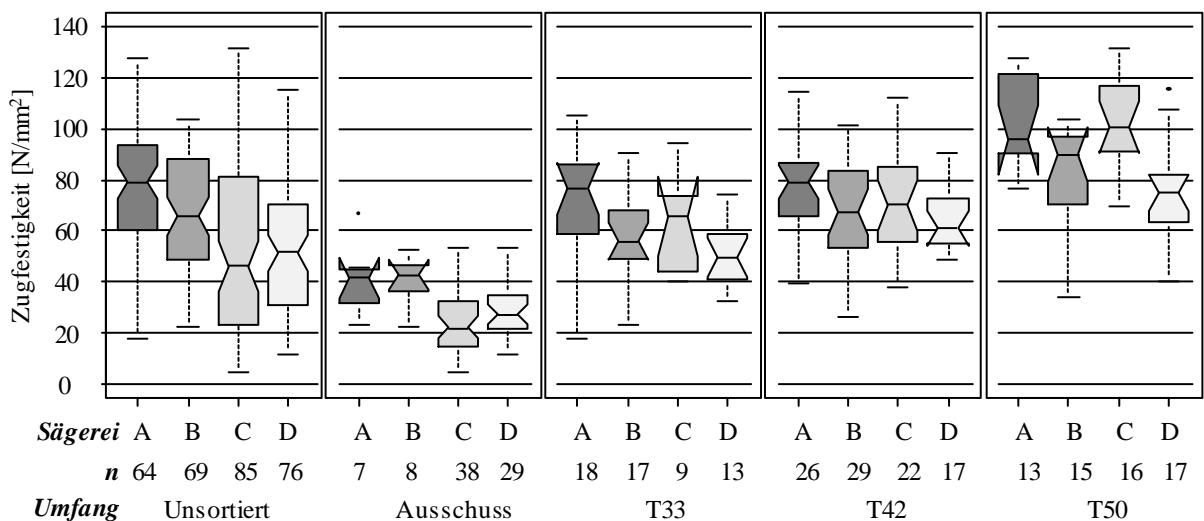


Abbildung 6: Festigkeiten getrennt nach Sägerei (A-D) sowie Anzahl der Prüfkörper (n), v.l.n.r.: Unsortiert, Ausschuss, T33, T42 und T50.

Der als Ausschuss deklassierte Anteil je Sägerei ist in der Abbildung 6 (2. Kasten v.l.) dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die schwächsten Bretter aller Sägereien durch die in 5.1.1 beschriebenen Sortierkriterien zuverlässig identifiziert werden können. Ausserdem werden nur sehr wenige Bretter mit höheren Festigkeiten (≥ 40 MPa) aussortiert.

Die Ergebnisse für die Festigkeitsklassen T33, T42 und T50 sind in der Abbildung 6 (3.-5. Kasten v.l.) je Sägerei dargestellt. Für alle Sägereien steigt der Median sowie der Festigkeitsbereich mit zunehmender Klasse an. Während in der Festigkeitsklasse T42 alle vier Sägereien sehr ähnliche Festigkeiten zeigen, liegen die Werte der Sägereien B und D in den Klassen T33 und T50 unter jenen der Sägereien A und C, wobei die geforderten Festigkeiten durchwegs erreicht bzw. deutlich überschritten werden.

Hinsichtlich der Rohdichte (korrigiert auf eine Holzfeuchtigkeit von $u = 8\%$) liegt das Material aller Sägereien mit Mittelwerten von 725, 741, 729 und 710 kg/m³ auf einem sehr ähnlichen Niveau (Abbildung 7, links). Der Mittelwert des E-Moduls (ebenfalls korrigiert auf eine Holzfeuchtigkeit von $u = 8\%$) der Sägereien A und B liegt mit 15010 bzw. 14630 N/mm² etwas unterhalb von jenem der Sägereien C und D mit 15220 bzw. 15740 N/mm² (Abbildung 7, rechts).

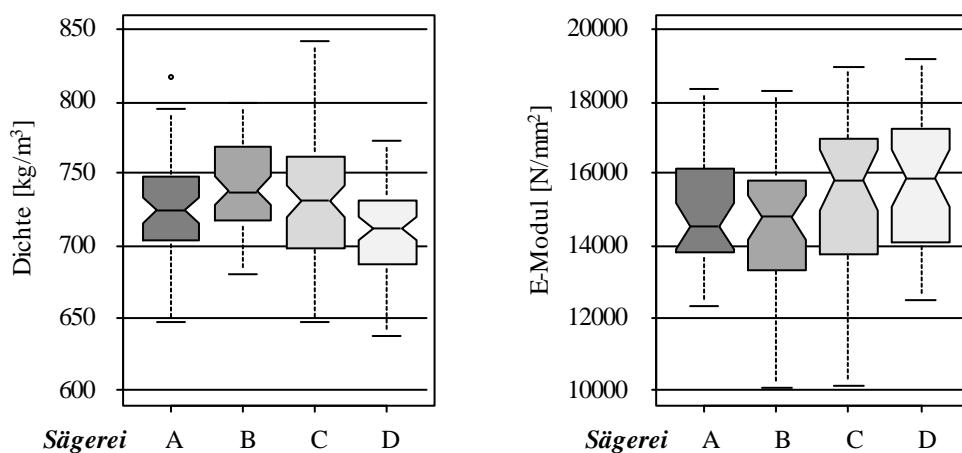


Abbildung 7: Dichte (links) und Elastizitätsmodul (rechts) getrennt nach Sägerei (ohne Berücksichtigung der Sortierklassen).

5.1.4 Einfluss der akzeptierten Mindestlänge auf die Materialausbeute

In sämtlichen bisherigen Betrachtungen wurde für die Zuordnung bzw. Klassierung eines Brettes stets dessen gesamte Länge von 3000 mm betrachtet. Einzelne Äste, deren Grösse die in Tabelle 6 definierten Grenzwerte überschreiten, führen demnach dazu, dass das gesamte Brett als Ausschuss deklassiert wird.

Wie in Abbildung 3 ersichtlich, ist die Anzahl der vorhandenen Äste in den betrachteten Buchenbrettern im Vergleich zu Nadelholz äusserst gering. In weniger als 40% der Bretter sind zwei oder mehr Äste vorhanden. Ob dieser Tatsache kommt der Möglichkeit, einzelne Schwachstellen aus dem Brett zu kappen und durch anschliessend erfolgende Keilzinkung das hochwertige, verbleibende „fehlerlose“ Brettmaterial zu verbinden, besondere Bedeutung zu. Liegt beispielsweise ein grosser Ast etwa 0.5 m von einem Brettende entfernt, und weisst das 3 m lange Brett ansonsten keine offensichtlichen lokale Schwachstellen auf, so liegt im tatsächlichen Produktionsprozess von BSH ein hochwertiger, zur Verwendung geeigneter Brettabschnitt mit einer Länge von 2.5 m sowie 0.5 m Ausschuss vor.

In der Abbildung 8 wird der Einfluss der akzeptierten Mindestlänge auf die Materialausnutzung dargestellt. Diese Länge ergibt sich einerseits aus den technischen Vorgaben der Keilzinkungsanlage, andererseits aus wirtschaftlichen Überlegungen und kann deshalb nicht generell definiert werden. Bei einer akzeptierten Mindestlänge von 3 m (d.h., wie bisher werden sämtliche Schwachstellen des gesamten Brettes, unabhängig von deren Lage betrachtet) werden 87 von insgesamt 294 Bretter dem Ausschuss zugeteilt. Davon sind 19 Bretter, z.B. aufgrund zu grosser Krümmung oder starker Rissbildung, als definitiver Ausschuss, und 68 Bretter als sonstiger Ausschuss, d.h. Teile dieses Brettes können bei reduzierter akzeptierter Mindestlänge nach Kappung lokaler Schwachstellen noch verwendet werden, zu bezeichnen. Wird nun die akzeptierte Mindestlänge von 3 m reduziert, so können Anteile vom ursprünglichen Ausschuss in die visuellen Klassen 1-3 sortiert, und in weiterer Folge den Festigkeitsklassen T33, T42 und T50 zugeordnet werden. Für eine akzeptierte Mindestlänge von 1.5 m halbiert sich beispielsweise der Ausschuss, d.h. rund die Hälfte des ursprünglichen Ausschussvolumens kann den visuellen Klassen zugeordnet werden.

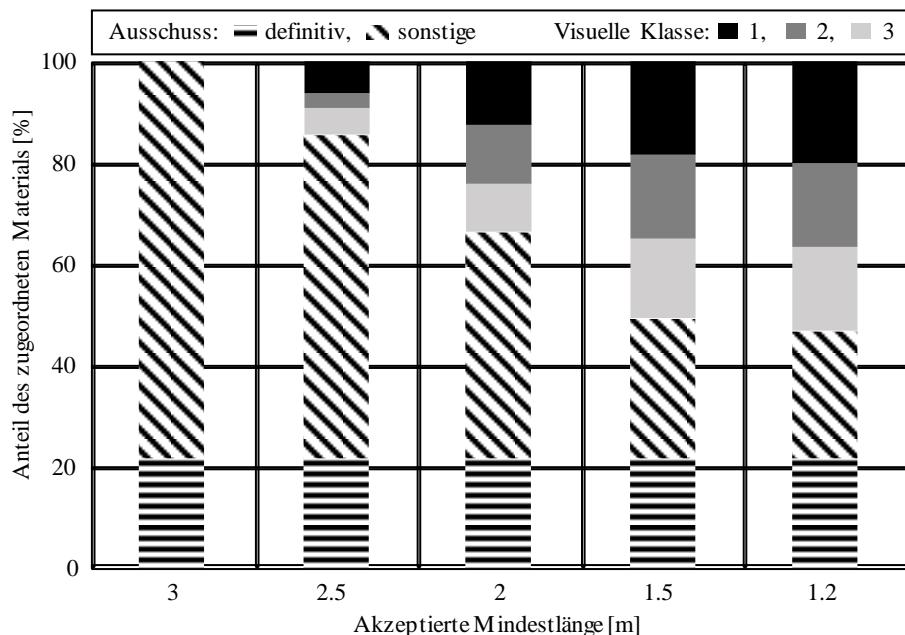


Abbildung 8: Zuordnung des ursprünglichen Ausschusses bei Verkürzung der akzeptierten Mindestlänge.

Alle drei visuellen Klassen profitieren etwa gleich stark von verkürzten Mindestlängen. Unabhängig von der akzeptierten Mindestlänge, sollten dem „definitiven Ausschuss“ zugeordnete Bretter so früh wie möglich aus dem Produktionsprozess ausgeschieden werden, um die Beanspruchung unnötiger Kapazitäten zu vermeiden. Daher sollte die Festigkeitssortierung mit Vorteil bereits in der Sägerei stattfinden, was auch der Verantwortung eines Produzenten betreffend Qualität des hergestellten Produkts gerecht wird.

5.1.5 Anmerkungen zu kombinierter visueller und mechanischer Sortierung:

Die Untersuchungen zeigen, dass für die angestrebten Festigkeitsklassen eine kombinierte visuelle und mechanische Festigkeitssortierung unumgänglich ist (weitere Ausführungen dazu sind Anhang 3 zu entnehmen).

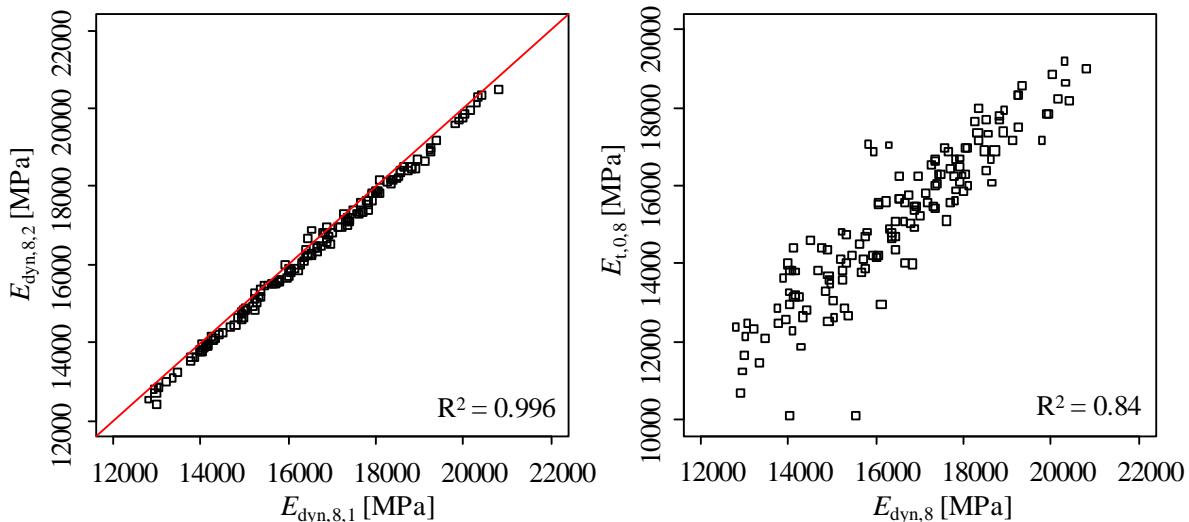


Abbildung 9: Vergleich der mit zwei unterschiedlichen Geräten ermittelten dynamischen Elastizitätsmodulen (links) und Gegenüberstellung von dynamischem und statischem Elastizitätsmodul (rechts).

Die mit den beiden verwendeten Sortiergeräten ermittelten dynamischen Elastizitätsmodulen stimmen sehr gut überein (Abbildung 9, links). Beide Geräte eignen sich also in gleichem Masse für die mechanische Sortierung von Buchenbrettern.

Insbesondere der Zusammenhang von dynamischem und statischem Elastizitätsmodul ist äußerst ausgeprägt (Abbildung 9, rechts), d.h. die Steifigkeit der Bretter lässt sich sehr präzise vorhersagen.

5.1.6 Optimierungspotential in der Prozesskette

Die gelieferten Bretter sämtlicher Sägereien und Standorte besitzen das mechanische Potential zur Produktion von Buchen-BSH hoher Festigkeit. Um eine unnötige Beanspruchung von Kapazitäten hinsichtlich Trocknung, Transport und / oder Sortierung zu vermeiden, ist die frühestmögliche Ausscheidung offensichtlich ungeeigneter Ware anzustreben. Dabei seien insbesondere die folgenden Punkte genannt:

- Vermeidung der Trocknung und Lieferung von Lamellen, die aufgrund der vorhandenen Astgrößen offensichtlich zur visuellen Deklassierung führen (z.B. Abbildung 10): Dies erfordert zumindest eine Vorsortierung im nassen Zustand bei der Sägerei. Um eine möglichst effiziente Prozesskette zu erreichen, ist darüber hinaus eine maschinelle Sortierung vor der Trocknung (Bestimmung von ρ_{nass} bzw. $E_{\text{dyn}, \text{nass}}$) anzustreben. Aus dieser Vorgehensweise würde resultieren, dass (1) die Beanspruchung unnötiger Kapazitäten durch letztlich ungeeignetes Material vermieden, (2) der Säger anstelle von „Buchenbrettern“ das höherwertigere Produkt „BSH-Lamellenteil“ liefert und (3)

eine zweite, zeit- und letztlich kostenintensive Sortierung beim BSH-Produzent entfallen kann.

- Vermeidung der Lieferung von Lamellen, deren Oberflächen aufgrund von Rissen und Hobelungenauigkeiten offensichtlich nicht den visuellen Vorgaben entsprechen (Abbildung 11): Bei der Trocknung von Buchenbrettern kann eine verstärkte Rissbildung oder Verformung einzelner Bretter nicht ausgeschlossen werden. Wichtig ist, dass die betroffenen Bretter nicht zum BSH-Produzenten geliefert werden und dann dort aussortiert werden müssen. Zum einen würden dadurch unnötige Kapazitäten im Transport bzw. der (Nach-) Sortierung beansprucht. Zum anderen bestellt der BSH-Produzent Bretter mit vorgegebenen (gewünschten) Eigenschaften (z.B. gehobelt, maximale Krümmung, etc.) und hat das Recht, Bretter, die diesen Vorgaben offensichtlich nicht entsprechen, abzulehnen. Entstandener Material- und Personalaufwand für diese Bretter sind nach Möglichkeit seitens der Sägerei in den Preis des letztlich gelieferten und akzeptierten Materials einzukalkulieren.



Abbildung 10: Aufgrund der Astgrösse offensichtlich zu deklassierende Lamelle.



Abbildung 11: Aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit offensichtlich zur Produktion von BSH ungeeignete Lamelle.

Die Resultate sind im Detail in den folgenden Publikationen beschrieben. Eine Zusammenstellung sämtlicher im Rahmen des Projektes erfolgten Publikationen ist im Teilbericht zu Modul 7 () in diesem Schlussbericht enthalten.

- Paper Ehrhart et al. (2016a); World Conference on Timber Engineering (WCTE); Wien, Österreich.
- Präsentation Ehrhart et al. (2016a); World Conference on Timber Engineering (WCTE); Wien, Österreich.
- Paper Ehrhart et al. (2016b); Annual Meeting of the International Network on Timber Engineering Research (INTER); Graz, Österreich.
- Präsentation Ehrhart et al. (2016b); Annual Meeting of the International Network on Timber Engineering Research (INTER); Graz, Österreich.
- Folien zur Meilenstein-Sitzung zu Modul 2 vom 22.03.2016.

5.2 Meilensteine

Das Erreichen der im Abschnitt 3 erwähnten Meilensteine wurde am 22.03.2016 an der Empa besprochen. Auf Grund der vorgestellten Resultate äusserten die anwesenden Sitzungsteilnehmer keine Bedenken bezüglich einer Weiterführung des Projekts.

Trotz verbesserter Wirtschaftlichkeit bei 30 mm (Endmass im fertigen BSH) dicken Brettern, soll im weiteren Projektverlauf mit einer Brett- bzw. Lamellendicke von 25 mm (Endmass) gearbeitet werden, da die n'h Bu-BSH bisher praktisch ausschliesslich aus 25 mm dicken Lamellen hergestellt hat. Es sollen jedoch im Modul 3 zusätzlich Untersuchungen für 30 mm dicke Bretter bzw. Lamellen (Keilzinkenverbindung, Flächenverklebung) eingebaut werden.

5.3 Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit

Die von U. C. Luginbühl durchgeföhrten Studien zur Wirtschaftlichkeit und zu Möglichkeiten zu deren Optimierung sind Gegenstand eines separaten, durch U.C. Luginbühl verfassten Berichts, welcher diesem Bericht als Anhang beigefügt ist. In dieser Studie kommt U. C. Luginbühl zusammenfassend zum Schluss, dass „zum Aufbau von kostenoptimierten Fertigungsprozessen die Anzahl der Arbeitsschritte zu reduzieren, die Sortierung so früh wie möglich umzusetzen und insbesondere in den letzten Arbeitsschritten die Ausbeute möglichst hoch zu halten sind.“

6 Deliverables in Modul 2

Die Ergebnisse aus den Forschungsarbeiten in Modul 2 werden in den 2 Publikationen Ehrhart et al. (2016a und 2016b), den zugehörigen Präsentationsfolien sowie in einem separaten Bericht von U. C. Luginbühl zur Wirtschaftlichkeit und Möglichkeiten zu deren Optimierung vorgestellt.

7 Literatur

- DIN 4074-5 (2008): Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 5: Laubschnittholz. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Deutschland.
- EN 408 (2012). Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties; German version. European Committee for Standardization CEN, Brussels, Belgium.
- EN 1194 (1999). Timber structures - Glued laminated timber - Strength classes and determination of characteristic values. European Committee for Standardization CEN, Brussels, Belgium.
- EN 14080 (2013). Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements. European Committee for Standardization CEN, Brussels, Belgium.
- Blass H. J., Denzler J., Frese M. & Linsenmann P. (2005): Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche. Band 1 der Reihe Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Universitätsverlag Karlsruhe: Karlsruhe, Germany.
- Drewes H. (1985): Ausgleichsfeuchten von Holzwerkstoffen für das Bauwesen. Holz als Roh- und Werkstoff. Volume 43, Seite 97-103.
- Ehrhart T., Fink G., Steiger R. & Frangi A. (2016a): Experimental investigation of tensile strength and stiffness indicators regarding European beech timber. World Conference on Timber Engineering 2016 (WCTE 2016): Vienna, Austria, August 22-25, 2016.
- Ehrhart T., Fink G., Steiger R. & Frangi A. (2016b): Strength grading of European beech lamellas for the production of GLT & CLT. International Network on Timber Engineering Research INTER Meeting: Graz, Austria, August 16-19, 2016.
- Frese M. & Blass H. J. (2006): Characteristic bending strength of beech glulam. Materials and Structures, 40:3-13, DOI 10.1617/s11527-006-9117-9.
- Frühwald K. & Schickhofer G. (2004): Strength grading of hardwoods. World Conference on Timber Engineering 2004 (WCTE 2004): Lahti, Finland.
- BAFU (Hrsg.) (2015): Jahrbuch Wald und Holz 2015. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1520: 162 S.

Anhang:

Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit
Urs Christian Luginbühl, Holzindustrie Schweiz

Inhaltsverzeichnis

1	VORWORT	63
2	EINFLUSS DER AUSBEUTE AUF DIE KOSTEN	63
3	EINFLUSS DER BRETTDIMENSION AUF DIE KOSTEN	65
4	EINFLUSS DES FERTIGUNGSPROZESSES AUF DIE KOSTEN.....	66
5	SCHLUSSFOLGERUNGEN	68

1 Vorwort

Zur Wirtschaftlichkeit und den Marktpotentialen von Buchen-Brettschichtholz (Buchen-BSH) wurden bereits viele Abklärungen bei interessierten Unternehmungen getätigt und verschiedene Studien umgesetzt. Im Rahmen dieses Kurzberichtes wird darauf verzichtet, diese alle zu erwähnen resp. zu kommentieren.

In diesem Bericht werden jedoch die Kosten entlang des Fertigungsprozesses näher betrachtet, mit dem Ziel, so auch Möglichkeiten für Kosteneinsparungen aufzeigen zu können. Dabei werden die Einflüsse der Ausbeute, der Brettdimension und der Fertigungsprozesse detailliert behandelt. Im letzten Kapitel sind einige Schlussfolgerungen festgehalten.

2 Einfluss der Ausbeute auf die Kosten

In der Holzindustrie entspricht die Ausbeute dem Verhältnis der Materialmenge eines Fabrikates zur Menge des eingesetzten Rohmaterials. Somit können entlang des Fertigungsprozesses verschiedene Bezugsgrößen angenommen werden. In diesem Kapitel wird das Lamellenvolumen (im Brettschichtholzträger BSH eingebaut) als prozentualer Anteil am Rundholzvolumen berechnet. Es wird also aufgezeigt, welcher Anteil vom rohen Stamm letztlich in den BSH-Trägern verbaut wird.

In den Sägewerken werden neben dem Hauptprodukt (BSH-Lamellen) verschiedene Nebenprodukte hergestellt. Dazu gehören Seitenbretter, Schwarten, Spreissel und auch Sägemehl. Da diese Nebenprodukte im Fertigungsprozess der Lamellen immer anfallen, werden diese auch Koppelprodukte genannt. In Tabelle 1 werden die ungefähren prozentualen Anteile des ersten Verarbeitungsschrittes aufgezeigt. Der Anteil der Lamellen kann in Abhängigkeit der Rundholzqualität, aber auch der erforderlichen Lamellenqualität stark variieren. Entscheidend ist letztlich auch, ob ein Brett über die gesamte Länge eine definierte Qualität haben muss, oder ob Auskappungen (z.B. eines Astes) toleriert werden. Je kleiner die minimale Brettlänge, desto grösser ist die Ausbeute im Sägewerk. Diese Thematik wird in den anderen Dokumenten des Moduls 2 detaillierter behandelt.

Tabelle 1: Ausbeuten beim Rundholzeinschnitt

Bezugsgrösse Rundholz:	[Fm]	1.00	100.0%
BSH-Lamellen (roh, frisch)	[m ³]	0.41	41.0%
Bretter	[m ³]	0.11	11.0%
Schwarten/Spreissel, Hackschnitzel	[Fm]	0.35	35.0%
Sägespäne	[Fm]	0.13	13.0%

In der Tabelle 2 werden die Volumenveränderungen der nachfolgenden Arbeitsschritte dargestellt. Die Abmessungen wurden analog der im Projekt gewählten Lamellenquerschnitte (Dicke 25mm, Breite 160mm) angenommen. Ebenso werden die verschiedenen Arbeitsschritte entsprechend dem bisher üblichen Produktionsverfahren dargestellt.

Tabelle 2: Ausbeuten bei der BSH-Produktion

	Verlust [%]	Länge [mm]	Dicke [mm]	Breite [mm]	Volumen [m ³]	Materialanteil [%]
Lamellen (roh, frisch)		3000	35.0	186.0	0.020	41.0%
Trocknung auf 8%		3000	32.9	174.8	0.017	36.2%
Sortieren, kappen	10%	2700	32.9	174.8	0.016	32.6%
Kalibrieren		2700	31.0	174.8	0.015	30.7%
Keilzinken	15%	2295	31.0	174.8	0.012	26.1%
Lamellen hobeln		2295	25.5	174.8	0.010	21.5%
Träger hobeln		2295	25.0	160.0	0.009	19.3%

In dieser Tabelle ist ersichtlich, dass vom rohen, frischen Brettvolumen nur rund die Hälfte letztlich als fertige Lamellen in die BSH-Träger fliesst. Dies hängt einerseits mit dem Volumenverlust durch die Holztrocknung und andererseits mit den zahlreichen Bearbeitungsschritten (verdicken und mehrmals hobeln) zusammen. Das Buchenholz hat das mit Abstand grösste Volumenschwindmass der einheimischen Holzarten. Bei der Trocknung von Buchenholz sind somit auch die Formveränderungen am grössten, was einen Teil der ausserordentlichen Zumasse (insbesondere in der Dicke) erklärt.

Die vorhergehenden zwei Tabellen zeigen, dass mit der momentanen Produktionsweise die Ausbeute (Lamellenvolumen/Rundholzvolumen) lediglich 19,3 % beträgt. Anders ausgedrückt heisst dies, dass für die Herstellung eines Kubikmeters Buchen-BSH ca. 5,19 Kubikmeter Rundholz eingeschnitten werden müssen. Diese Ausbeute liegt in einer realistischen Grössenordnung. In den Vorprojekten zum vorliegenden Buchen-Projekt wurden am internationalen Work-Shop an der ETH 15-17% genannt, die BFH geht in ihrem Bericht zum Marktpotenzial der verklebten Laubholzprodukte von 22% aus.

Da nur rund ein Fünftel des eingesetzten Rundholzes in die BSH-Träger kommt, spielen die Erträge aus dem Verkauf der Nebenprodukte und der Resthölzer eine entscheidende Rolle. In Tabelle 3 werden diese exemplarisch dargestellt. Die angenommenen Preise entsprechen ca. den momentanen Marktpreisen. Für die Hackschnitzel und die Kappstücke wurden die Preise für thermisch genutzte Produkte angenommen, welche höher sind als die Preise für die stoffliche Nutzung. Inwiefern diese letztlich realisiert werden könnten, hängt vom Standort der Produktionsbetriebe ab.

Die Tabelle 3 zeigt, wie sich die reinen Holzkosten entlang des Fertigungsprozesses entwickeln und welche Nebenerträge in den verschiedenen Phasen erzielt werden können. Mit den angenommenen Preisen (Rundholz, Nebenprodukte, Resthölzer) können die Nebenerträge insgesamt ca. den Volumenverlust bei den Lamellen decken, so dass die reinen Holzkosten der fertigen Lamellen immer noch über 500 Fr./m³ betragen. Da beim Rundholz nur wenig Spielraum besteht, können die Holzkosten der Lamellen nur über höhere Nebenerträge und über bessere Ausbeuten reduziert werden.

Betreffend Ausbeute ist zu erwähnen, dass die Konkurrenzprodukte deutlich bessere Werte erreichen. Beim Furnierschichtholz oder Sperrholz sind diese ca. doppelt so hoch.

Tabelle 3: Holzkosten bei Buchen-BSH-Trägern

Prozessschritte	Materialanteil	Volumen [m ³]	Preis	Wert
Rundholz franko Sägewerk:	100.0%	5.19	100 Fr./Fm	518.89 Fr.
Ertrag Nebenprodukte	11.0%	0.57	170 Fr./m ³	-97.03 Fr.
Ertrag Hackschnitzel	35.0%	1.82	24 Fr./Srm	-117.68 Fr.
Ertrag Sägespäne	13.0%	0.67	15 Fr./Srm	-30.36 Fr.
Rohe frische Brett, ungekappt:	41.0%	2.13		273.82 Fr.
Rohe trockene Brett, ungekappt:	36.2%	1.88		309.89 Fr.
Ertrag Kappstücke, gehackt:			24 Fr./Srm	-12.18 Fr.
Trockene Bretter, gekappt	32.6%	1.69		332.14 Fr.
Ertrag Hobelspäne:			10 Fr./Srm	-4.89 Fr.
Trockene Bretter, kalibriert	30.7%	1.59		347.61 Fr.
Ertrag Kappstücke, gehackt:			24 Fr./Srm	-15.49 Fr.
Trockene Bretter keilgezinkt	26.1%	1.36		393.46 Fr.
Ertrag Hobelspäne:			10 Fr./Srm	-12.02 Fr.
Trockene Bretter gehobelt	21.5%	1.11		466.30 Fr.
Ertrag Hobelspäne:			10 Fr./Srm	-5.73 Fr.
Holzkosten fertige Lamelle:	19.3%	1.00		514.02 Fr.

3 Einfluss der Brettdimension auf die Kosten

Die Brettdimension hat einen entscheidenden Einfluss auf die Kosten des Endproduktes. Je grösser der Brettquerschnitt ist, desto grösser ist die Ausbeute, da beispielsweise das Dickenzumass für das Lamellenhobeln bei einem dünnen und bei einem dicken Brett praktisch gleich gross ist. Der Brettquerschnitt beeinflusst aber auch die Leistung und somit die Kosten der linearen Bearbeitungen der Lamellen. In den Tabellen 4 und 5 werden die Unterschiede bei verschiedenen Brettdimensionen für die Sägewerke und die BSH-Werke dargestellt. Die tabellierten Dimensionen führen zu Fertigbreiten von 80-180mm und zu Fertigdicken von 25, 30 oder 40mm. Dabei ist zu beachten, dass die üblichen Dicken aus technischen Gründen 25mm und in wenigen Fällen 30mm betragen. Dicken von 40mm (analog Nadelholz) werden aus Buchenholz kaum hergestellt.

Generell kann festgehalten werden, dass aus technischer Sicht die kleinen Dimensionen bezüglich Kräfte, Gewichte, Holztrocknung, Homogenisierung usw. eher Vorteile haben. Aus wirtschaftlicher Sicht sind jedoch die grossen Brettquerschnitte zu bevorzugen, da dort die Kosten teilweise wesentlich tiefer sind. Ausnahme sind die Trocknungskosten, welche mit zunehmender Brettdicke steigen.

Tabelle 4: Leistung in linearen Prozessschritten im Sägewerk

Dicke [mm]	Breite					
	[mm]	[mm]				
101	122	143	165	186	207	
35	32.8%	39.7%	46.5%	53.7%	60.5%	67.3%
40	37.5%	45.3%	53.1%	61.3%	69.1%	76.9%
52	48.8%	58.9%	69.1%	79.7%	89.9%	100.0%

Tabelle 5: Leistung in linearen Prozessschritten im BSH-Werk

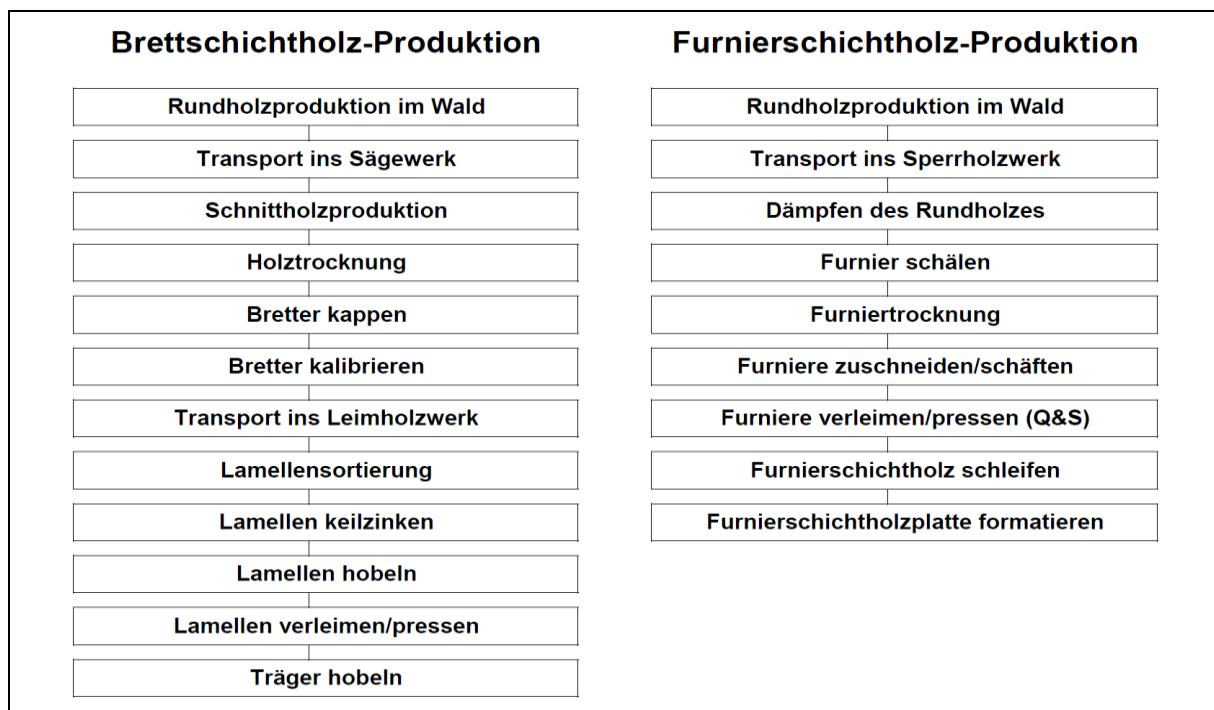
Dicke [mm]	Breite					
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
	95	115	135	155	175	195
31	32.8%	39.7%	46.7%	53.6%	60.5%	67.4%
36	38.1%	46.2%	54.2%	62.2%	70.2%	78.3%
46	48.7%	59.0%	69.2%	79.5%	89.7%	100.0%

4 Einfluss des Fertigungsprozesses auf die Kosten

Das Buchen-Brettschichtholz wird zurzeit noch nicht in industriellen Prozessen hergestellt. Bisher werden jährlich auch nur wenige hundert Kubikmeter produziert. Die Ausführungen in diesem Kapitel beziehen sich auf die IST-Situation. In optimierten, industriellen Prozessen würden somit andere Kosten anfallen.

In Abbildung 1 werden die Prozessschritte in der heutigen BSH-Produktion dargestellt. Dabei werden auch die verschiedenen Produktionsstandorte berücksichtigt, was zu zusätzlichen Transporten und somit Kosten führt. Weiter ist ersichtlich, dass zurzeit sehr viele und zudem personalintensive Prozessschritte umgesetzt werden. So werden die Lamellen zweimal sortiert, zweimal gekappt und auch zweimal gehobelt, was zu beträchtlichen Materialverlusten führt (siehe Kapitel 2). Exemplarisch wird auch der Fertigungsprozess bei der Furnierschichtholz-Produktion dargestellt. Selbstverständlich lassen sich diese Produkte nicht direkt vergleichen. Je nach erforderlicher Dimension sind weitere Arbeitsschritte, wie beispielsweise 'Schichtverleimen' oder 'Auftrennen' von Querschnitten erforderlich.

Abbildung 1: Fertigungsprozess bei Buchen-BSH-Trägern



Jeder Prozessschritt führt zu Kosten. Somit steigt auch der Wert der Fabrikate mit jedem Arbeitsschritt an. Wie in Kapitel 3 beschrieben variieren die Kosten in Abhängigkeit der Brettquerschnitte, aber auch der Trägerquerschnitte des Brettschichtholzes. In der Abbildung 2 werden die Kosten und die Entwicklung der Warenwerte in den verschiedenen Prozessschritten exemplarisch aufgezeigt. Dabei sind die Frankenbeträge teilweise grob geschätzt, sie entsprechend aber in der Größenordnung der heutigen Situation.

Abbildung 2: Kosten und Warenwerte in den verschiedenen Prozessschritten

Dicke der fertigen Lamelle		25mm	30mm	40mm	
Leistung pro Laufmeter im Sägewerk		60.5%	69.1%	89.9%	
Leistung pro Laufmeter im Leimwerk		60.5%	70.2%	89.7%	
Annahmen:					
Rohe trockene Bretter, ungekappt:		580.00	580.00	580.00	Fr./m ³
Kappen trockenes Brett	60 Fr./m ³	60.00	52.50	40.38	Fr./m ³
Materialverlust		64.44	64.44	64.44	Fr./m ³
Ertrag Kappstücke, gehakt:	24 Fr./Srm	-6.48	-6.48	-6.48	Fr./m ³
Trockene Bretter, gekappt		697.96	690.46	678.35	Fr./m ³
Kalibrieren	30 Fr./m ³	30.00	26.25	20.19	Fr./m ³
Materialverlust		27.02	15.34	27.13	Fr./m ³
Ertrag Hobelspane:	10 Fr./Srm	-1.86	-1.09	-1.92	Fr./m ³
Trockene Bretter, kalibriert		753.12	730.97	723.75	Fr./m ³
Transport Bretter	18 Fr./m ³	18.00	18.00	18.00	Fr./m ³
Lager/Logistik Leimwerk	15 Fr./m ³	15.00	15.00	15.00	Fr./m ³
Bretter vor Leimholzproduktion		786.12	763.97	756.75	Fr./m ³
Sortieren und Keilzinken	110 Fr./m ³	110.00	94.72	74.13	Fr./m ³
Materialverlust		132.90	128.99	127.72	Fr./m ³
Ertrag Kappstücke, gehakt:	24 Fr./Srm	-9.72	-9.72	-9.72	Fr./m ³
Lamellen, keilgezinkt, roh		1019.30	977.97	948.88	Fr./m ³
Lamellen hobeln	30 Fr./m ³	30.00	25.83	20.22	Fr./m ³
Materialverlust		219.85	176.35	128.86	Fr./m ³
Ertrag Hobelspane:	10 Fr./Srm	-8.87	-7.64	-5.98	Fr./m ³
Lamellen, keilgezinkt, gehobelt		1260.28	1172.52	1091.98	Fr./m ³
Träger verleimen	20 Fr./m ³	20.00	20.00	20.00	Fr./m ³
Leimkosten (grobe Schätzung)		55.00	48.00	36.00	Fr./m ³
BSH-Träger verklebt, roh		1335.28	1240.52	1147.98	Fr./m ³
Träger hobeln	20 Fr./m ³	20.00	20.00	20.00	Fr./m ³
Materialverlust		153.03	137.65	122.16	Fr./m ³
Ertrag Hobelspane:	10 Fr./Srm	-5.14	-4.99	-4.81	Fr./m ³
BSH-Träger gehobelt		1503.17	1393.17	1285.33	Fr./m ³
Einfluss der Lamellendicke:			-110.00	-217.84	Fr./m ³

In der Abbildung ist ersichtlich, dass der Einfluss der Brettdicke 110 bis 220 Fr/m³ betragen kann. Besonders eindrücklich sind jedoch die enormen Kosten infolge der Materialverluste in den letzten Prozessschritten. Die teuersten Materialverluste entstehen beim 'Lamellen hobeln', gefolgt vom 'Träger hobeln' und vom 'Keilzinken'.

5 Schlussfolgerungen

Wie bereits erwähnt, wird das Buchen-BSH zurzeit noch nicht in industriellen Prozessen hergestellt. Die Produkte werden in vielen verschiedenen und teilweise personalintensiven Arbeitsschritten gefertigt. Da diese Arbeiten an verschiedenen Produktionsstandorten erfolgen entstehen zusätzliche Transportkosten. Durch die geringe Ausbeute und das Fehlen von wertvollen Nebenprodukten entstehen für die Haupterzeugnisse, die Buchen-Brettschichtholzträger, beträchtliche Kosten.

Die Marktpotentiale der verklebten Laubholzprodukte wurden durch die Berner Fachhochschule BFH im Auftrag des BAFU (Aktionsplan Holz) im Detail betrachtet. Wie stark diese Potentiale letztlich von Schweizer Buche-BSH ausgeschöpft werden können, ist schwer abzuschätzen. Grundvoraussetzung ist jedoch sicher, wie im BFH-Bericht erwähnt, der Aufbau einer industriellen Fertigung. Im Bereich der Sägewerke sind die Technologien und Kapazitäten in der Schweiz vorhanden. Im Bereich Holztrocknung besteht jedoch ein Optimierungspotential. Im Bereich der BSH-Werke werden die Laubholzprodukte bisher auf Anlagen hergestellt, welche für Nadelholz konzipiert sind. Optimierungsmöglichkeiten bestehen insbesondere bei der Keilzinkenverbindung.

Durch die industrielle Fertigung können die Kosten sicher gesenkt werden, womit die Markttchancen steigen. Entscheidend wird aber letztlich die Konkurrenzfähigkeit des Schweizer Buchen-BSH im Vergleich zu den Substitutionsprodukten (andere Holzprodukte, Stahl, Beton) sein. Dabei muss ein fundierter Vergleich von Preis und Leistung umgesetzt werden.

In Anbetracht der momentanen Marktsituation (Frankenstärke) werden Schweizer Produkte mit Sicherheit früher oder später durch Importware konkurrenziert. Der Aufbau von kostenoptimierten Fertigungsprozessen ist daher unerlässlich. Dabei ist zu beachten, dass die Optimierung in einem Bereich zu Folgekosten in anderen Bereichen führen kann. So reduziert beispielsweise die Standardlänge von Brettern in der Festigkeitssortierung des BSH-Werkes die Kosten, jedoch wird dadurch die Ausbeute im Sägewerk verringert, was zu Mehrkosten führt. Der Prozess ist somit immer als Ganzes zu betrachten.

Nachfolgend werden einige Gedanken zur Kostenoptimierung festgehalten.

- Ausbeute:
Die Zumasse sind auf ein Minimum zu reduzieren. Mehrmaliges kappen, verdicken und hobeln ist zu vermeiden. Die idealen Brettquerschnitte (insbesondere Dicke) sind noch festzulegen. Im Bereich Holztrocknung sind Optimierungsmöglichkeiten zu suchen, damit die Ausbeute gesteigert werden kann (kleinere Verformungen, weniger Risse).
- Nebenerträge:
Die Nebenerträge müssen gesteigert werden. Dazu sind weitere Absatzkanäle zu prüfen. Ideal wäre die Weiterverwendung dieser Sortimente direkt am Standort, damit die

Transportkosten entfallen. Alternativ wäre zu prüfen, ob die Lamellen bei anhaltend kleiner Nachfrage auch als Nebenprodukte hergestellt werden können. Dazu bräuchte es jedoch eine Standardisierung und möglicherweise auch eine Abnahmegarantie. Dieser Weg ist nicht einfach, da im Bereich Buchenholz nur noch wenige Hauptprodukte nachgefragt werden.

- Transportkosten:

Die Transportkosten sind nach Möglichkeit zu reduzieren. Ideal wäre die Herstellung der Produkte an einem Standort (ohne Zwischentransporte). Jeder Zwischentransport erhöht die Kosten (Transport, interne Logistik und Administration) oder verringert die Erträge ab Werk.

- Prozessoptimierung:

Die Anzahl der Prozessschritte ist zu reduzieren, da jeder Prozessschritt infolge Material-Handling etc. zu Zusatzkosten führt. Aus wirtschaftlicher Sicht ist zudem die Sortierung möglichst früh im Fertigungsprozess zu platzieren. Je später die Selektion erfolgt, desto teurer wird der Materialverlust, ohne dass die Neben- und Restholzerträge deutlich steigen (siehe die horrend teuren Materialverluste in den letzten Prozessschritten der Abbildung 2). Ideal wäre aus Kostensicht eine Sortierung bereits am rohen, frischen Brett oder alternativ am rohen getrockneten Brett. Dadurch verringern sich auch die Transportvolumen zu den nachfolgenden Produktionsstandorten.

Zum Aufbau von kostenoptimierten Fertigungsprozessen sind somit zusammenfassend die Anzahl der Arbeitsschritte zu reduzieren, die Sortierung so früh wie möglich umzusetzen und insbesondere in den letzten Arbeitsschritten die Ausbeute möglichst hoch zu halten.

Homogenes und kombiniertes Buchen-Brettschichtholz

**Technische Grundlagen zur
Marktimplementation als Bauprodukt
für Biegeträger und Stützen**

**Bundesamt für Umwelt BAFU
Aktionsplan Holz**

Projekt REF-1011-04200

Technischer Schlussbericht Modul 3

**Lamellenproduktion und
Flächenverklebung**

Das [**Modul 3**](#) wurde eigenständig an der Berner Fachhochschule (BFH) Architektur, Holz und Bau (AHB) durchgeführt.

Autoren: Gaspard Clerc, Martin Lehmann und Thomas Volkmer



Aktionsplan Holz

Brettschichtholz aus Laubholz – Technische Grundlagen zur Marktimplementierung als Bauprodukt in der Schweiz

Bericht: Modul 3, Projekt-Nr.: REF 1011-04200, Buchen-BSH
[Download Link](#)

Bericht Nr. R.007547-10-62FE-01-PB-01

Auftrag Nr. R.007547-10-62FE-01

Klassifizierung Öffentlich

Datum 17.8.2017

Fördergeber Aktionsplan Holz, BAFU

Adresse der Forschungsstelle Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau
Institut für Werkstoffe und Holztechnologie
Kompetenzbereich Werkstoffe, Möbel und Design
Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel
Tel / Fax +41 (0)32 344 03 41/91
www.ahb.bfh.ch

Verfasser Gaspard Clerc, Martin Lehmann und Thomas Volkmer

Projektverantwortlicher Thomas Volkmer

Institutsleiter Frederic Pichelin

Homogenes und kombiniertes Buchen-Brettschichtholz

Technische Grundlagen zur Marktimplementierung als Bauprodukt für Biegeträger und Stützen

**Bundesamt für Umwelt BAFU
Aktionsplan Holz**

Projekt REF-1011-04200

Technischer Schlussbericht

Modul 4

**Experimentelle Ermittlung der
mechanischen Eigenschaften des BSH**

René Steiger
Thomas Ehrhart

Empa, Abt. Ingenieur-Strukturen
ETH Zürich

Inhaltsverzeichnis

1 RAHMEN UND ZIELE DES PROJEKTS	79
2 INHALTE UND ZIELE VON MODUL 4	79
3 MEILENSTEINE.....	79
4 PRÜFPLAN IN MODUL 4	80
5 ROHMATERIAL	83
5.1 HERKUNFTSGEBIETE UND BESTELLMENGE.....	83
5.2 FESTIGKEITSSORTIERUNG DES ROHMATERIALS.....	85
5.3 DOKUMENTATION DER BRETEIGENSCHAFTEN	88
6 PRODUKTION, TRANSPORT UND KLIMATISIERUNG DES BUCHEN-BSH..	91
6.1 QUERSCHNITTE	91
6.2 KEILZINKUNG UND FLÄCHENVERKLEBUNG.....	92
6.3 DOKUMENTATION DES TRÄGERAUFBAUS	93
6.4 TRANSPORT DER TRÄGER.....	93
6.5 PRÜFKLIMA	94
6.6 HOLZFEUCHTIGKEIT.....	94
7 4-PUNKT BIEGEVERSUCHE	95
7.1 PRÜFAUFBAU	95
7.2 MESSEINRICHTUNG	97
7.3 BELASTUNGSPROTOKOLL.....	98
7.4 ERGEBNISSE	100
7.4.1 <i>Rohdichte</i>	100
7.4.2 <i>Lokaler und globaler Biege-Elastizitätsmodul</i>	101
7.4.3 <i>Biegefestigkeit</i>	103
7.4.4 <i>Schubmodul</i>	103
7.4.5 <i>Bruchverhalten und Bruchbild</i>	104
8 AXIALE DRUCK- UND KNICKVERSUCHE	105
8.1 PRÜFAUFBAU, MESSEINRICHTUNG UND BELASTUNGSPROTOKOLL.....	105
8.2 ERGEBNISSE	108
8.2.1 <i>Druck-Elastizitätsmodul in Faserrichtung</i>	108
8.2.2 <i>Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung</i>	109
8.2.3 <i>Ergebnisse der Knickversuche</i>	110
9 SCHUBVERSUCHE	113
9.1 3-PUNKT BIEGEVERSUCH	113
9.1.1 <i>Prüfaufbau</i>	113
9.1.2 <i>Messeinrichtung</i>	115
9.1.3 <i>Belastungsprotokoll</i>	115
9.2 ASYMMETRISCHER 4-PUNKT BIEGEVERSUCH	116
9.2.1 <i>Prüfaufbau</i>	116
9.2.2 <i>Messeinrichtung</i>	117
9.2.3 <i>Belastungsprotokoll</i>	117
9.3 DRUCKSCHERVERSUCH IN ANLEHNUNG AN DIE EN 408	118
9.3.1 <i>Prüfaufbau</i>	118

9.3.2 <i>Messeinrichtung</i>	118
9.3.3 <i>Belastungsprotokoll</i>	118
9.4 GEGENÜBERGESTELLTE ERGEBNISSE DER SCHUBVERSUCHE	119
10 ZUGVERSUCHE AN LAMELLENBÜNDELN	120
10.1 PRÜFAUFBAU, MESSEINRICHTUNG UND BELASTUNGSPROTOKOLL	120
10.2 ERGEBNISSE.....	121
11 ZUSAMMENFASSUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE AUS MODUL 4.....	123
12 DELIVERABLES IN MODUL 4	124
13 MEILENSTEIN IM MODUL 4.....	125
14 AUSBLICK UND WEITERES VORGEHEN	125
15 LITERATUR.....	126

1 Rahmen und Ziele des Projekts

Durch die Angabe von Eigenschaftswerten, Bemessungsgrundlagen und Anforderungen an die Qualitätssicherung und -kontrolle für die gesamte Produktionskette sollen die technischen Rahmenbedingungen dafür geschaffen werden, dass homogenes und kombiniertes Buchen-Brettschichtholz (BSH) der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und, wenn möglich, GL55 vermehrt als qualitätsgesichertes Bauprodukt in Form von Biegeträgern und Stützen in der Feuchtekategorie 1 eingesetzt wird. Ausgehend von der Rohmaterialbereitstellung (Auswahl, Trocknung, Festigkeitssortierung) werden sämtliche Prozessschritte (Keilzinkung, Flächenverklebung) bis zur mechanischen Prüfung und Bemessung des fertigen Produkts in die Untersuchung einbezogen.

2 Inhalte und Ziele von Modul 4

Das Projekt-Modul 4 umfasst die Produktion von Buchen-BSH der Festigkeitsklassen GL40h, GL48h, GL55h (homogener Querschnittsaufbau für Stützen), GL40c, GL48c und GL55c (kombinierter Querschnittsaufbau für Biege- und Schubträger) sowie die experimentelle Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der produzierten Träger und Stützen. Die Projektetappen im Modul 4 sind die folgenden:

- Sortierung und Dokumentation des Rohmaterials entsprechend der Erkenntnisse aus dem Modul 2 (Festigkeitssortierung).
- Produktion der Buchen-BSH Träger und Stützen, basierend auf den Erkenntnissen aus dem Modul 3 (Keilzinkung und Flächenverklebung).
- Experimentelle Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der produzierten Träger und Stützen:
 - Biegefestigkeit (f_m)
 - Lokaler und globaler Biege-Elastizitätsmodul ($E_{m,l}$ und $E_{m,g}$)
 - Schubfestigkeit parallel zur Faser (f_v)
 - Schubmodul parallel zur Faser (G_0)
 - Druckfestigkeit in Faserrichtung ($f_{c,0}$)
 - Druck-Elastizitätsmodul in Faserrichtung ($E_{c,0}$)
 - Zugfestigkeit von Lamellenbündeln in Faserrichtung ($f_{t,0,bund}$)
 - Zug-Elastizitätsmodul von Lamellenbündeln in Faserrichtung ($E_{t,0,bund}$)
- Experimentelle Untersuchung zum Einfluss der Prüfkörpergrösse auf die Biege-, Schub- und Druckeigenschaften von Buchen-BSH für die genannten mechanischen Eigenschaften.
- Begleitende numerische Simulationen sämtlicher Versuche, basierend auf der detaillierten Dokumentation des Rohmaterials sowie des Aufbaus der BSH-Träger und Stützen.

3 Meilensteine

In das Modul 4 fällt der folgenden Projekt-Meilenstein:

- Meilenstein 5: Ermittlung der Festigkeitseigenschaften von BSH-Trägern und Stützen
→ Werden die kennzeichnenden Werte für BSH der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55 erreicht?

4 Prüfplan in Modul 4

Im Anhang 1 des Beitragsgesuches „BSH aus Laubholz“ ist der in der Tabelle 1 angeführte ursprüngliche Prüfplan beschrieben. Die Abmessungen bzw. geometrischen Verhältnisse waren dabei in Anlehnung an die Prüfnorm EN 408 (2012) definiert worden.

Tabelle 1: Ursprünglicher Prüfplan für die experimentellen Untersuchungen im Modul 4; Stand 20.02.2015 (Projektantragsphase); Abmessungen in mm.

Biegeträger: 4-Punkt Biegeprüfungen				
n = 45	120/400/7600	160/600/11400	160/600/15200	180/800/11400
GL32h	-	5	-	-
GL40c	-	5	-	-
GL40c	-	5	-	-
GL48h	-	5	-	-
GL48c	5	5	5	5
GL55c	-	5	-	-
Zugbündel: Zugprüfungen				
n = 15	75/160/4600			
T33	5			
T42	5			
T50	5			
Schubträger: 3-Punkt Biegeprüfungen				
n = 30	160/600/1800			
GL40c	10			
GL48c	10			
GL55c	10			
Stützen: Druckprüfungen				
n = 60	150/150/900	200/200/1200	300/300/1800	
GL40h	10	10	10	
GL48h	10	10	10	

Im Verlauf des Projektes wurde der ursprüngliche Prüfplan Empa/ETH-intern, sowie während der Projektmeetings mit allen Projektpartner und der Projektleitung, diskutiert und hinsichtlich der wesentlichen zu untersuchenden Fragestellungen optimiert. Daraus ist der in der Tabelle 2 aufgeführte Prüfplan entstanden.

Tabelle 2: Aktueller Prüfplan für die experimentellen Untersuchungen im Modul 4; Stand nach dem Kick-off Meeting vom 18.01.2017; Abmessungen in mm.

Biegeträger: 4-Punkt Biegeprüfungen					
n = 39	80/200/3800	160/400/7600	160/600/11400	180/800/15200	
GL40c	-	7	-	-	
GL48c	7	7	7	4	
GL55c	-	7	-	-	
Zugbündel: Zugprüfungen					
n = 21	75/160/4600				
T33	7				
T42	7				
T50	7				
Schubträger: 3-Punkt Biegeprüfungen bzw. *asymmetrische 4-Punkt Biegeprüfung					
n = 41	80/200/600	160/400/1200	160/600/1800	*160/400/3200	EN408
GL48c	7	7	7	7	6
GL55c	-	7	-	-	-
Stützen: Druck- und Knickprüfungen					
n = 51	150/150/900	200/200/1200	280/280/1680	200/200/2400	200/200/3600
GL40h	-	7	-	3	3
GL48h	7	7	7	5	5
GL55h	-	7	-	-	-

Als wesentliche Änderungen vom ursprünglichen zum aktuellen Prüfplan seien die folgenden Punkte genannt und begründet:

- 4-Punkt Biegeprüfungen (Biegung):
 - Reduktion der untersuchten Festigkeitsklassen durch Verzicht auf die Prüfung von homogenen Querschnittsaufbauten; Argument: Wird ein BSH-Träger ausreichender Spannweite auf Biegung belastet, tritt in der Regel ein Biegezugversagen in den äussersten, zugbeanspruchten Randlamellen auf. Die Festigkeit eines Trägers ist also durch die Zugfestigkeit seiner Randlamellen determiniert. Die Prüfung homogener Querschnitte hätte gegebenenfalls einen leichten Einfluss auf die Biegesteifigkeit, jedoch ist kein Einfluss auf die Festigkeiten zu erwarten. Des Weiteren werden in der Praxis für Biegeträger überwiegend kombinierte Querschnittsaufbauten gewählt. Der Biege-Elastizitätsmodul für homogene Querschnittsaufbauten kann rechnerisch auf Basis der Festigkeitsklassen der Lamellen ermittelt werden.
 - Erweiterung der geprüften Querschnittsgrößen nach unten ($h = 200$ mm); Argument: Mit sehr geringem Materialaufwand kann das Spektrum der untersuchten Querschnittsgrößen deutlich erweitert werden. Aufgrund der höheren Festigkeit und

Steifigkeit von Buchenholz im Vergleich zu Nadelholz können kleinere Querschnitte, z.B. für den Einsatz als Gurtungen in Fachwerken, interessant sein.

- Erhöhung der Anzahl Prüfkörper je Serie von 5 auf 7; Argument: Mit zunehmendem Prüfumfang steigt naturgemäß die statistische Aussagekraft der Untersuchungen. Da der Aufwand (einmalige Planung und Aufbau des Prüfsetups, Einarbeitungseffekte, etc.) mit zunehmender Prüfkörperanzahl relativ sinkt, wurde, auch im Hinblick auf die im Vergleich zum ursprünglichen Prüfplan reduzierte Anzahl der Versuche, die Probengröße um 2 Prüfkörper je Serie erhöht.
- Zugprüfungen:
 - Erhöhung der Prüfkörper je Serie von 5 auf 7; Argument: Steigerung der statistischen Aussagekraft bei eingeschränktem zusätzlichen Material- und Stundenaufwand.
- 3-Punkt Biegeprüfungen (Schub):
 - Reduktion der untersuchten Festigkeitsklassen durch Verzicht auf die Prüfung von Prüfkörpern der Klasse GL40c; Argument: Ein Schubversagen tritt in der Regel in den Innenlagen, etwa auf halber Trägerhöhe, auf, da dort die Schubspannungen ihren Höchstwert erreichen. Da für die definierten Querschnittsaufbauten GL40c und GL48c innerhalb des Projektes innen jeweils Bretter der Festigkeitsklasse T22 eingesetzt werden, würde dies eine doppelte Untersuchung der Schubfestigkeit und Steifigkeit dieser Klasse bedeuten.
 - Untersuchung verschiedener Querschnittsgrößen (nebst $h = 600$ mm auch 200, 400 und 800 mm); Argument: Der Einfluss der Prüfkörpergröße auf die Schubfestigkeit steht im Fokus zahlreicher wissenschaftlicher Untersuchungen und sollte innerhalb des Projektes unbedingt Beachtung erfahren, um hier auch für Buchen-BSH Prüfergebnisse als Basis für eine zuverlässige Festlegung der mechanischen Eigenschaften zu generieren.
 - Reduktion der Prüfkörperanzahl von 10 auf 7 je Serie; Argument: Ein einheitlicher Prüfumfang wird erreicht und der Material- und Arbeitsaufwand reduziert bzw. optimiert.
- Stützen:
 - Reduktion der Prüfkörperanzahl von 10 auf 7 je Serie; Argument: Ein einheitlicher Prüfumfang wird erreicht und der Material- und Arbeitsaufwand reduziert bzw. optimiert.
 - Zusätzlich werden jeweils 8 Prüfkörper mit Knicklängen von 2400 mm und 3600 mm getestet. Dies soll es erlauben, bestehende Knickkurven für Buchen-BSH in verschiedenen Schlankheitsbereichen zu verifizieren bzw. gegebenenfalls Anpassungen vorschlagen zu können. Die gewählten Längen entsprechen Geschosshöhen im Wohnungs- und Bürobau (2400 mm) und im Industriebau (3600 mm).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass durch die Anpassungen des Prüfplans die Aussagekraft gesteigert und zusätzliche Aspekte untersucht werden konnten. Dies bringt eine leicht erhöhte Gesamtanzahl an Versuchen (152 statt 150) mit sich. Die benötigte Holzkubatur konnte insgesamt reduziert werden.

5 Rohmaterial

5.1 Herkunftsgebiete und Bestellmenge

Das untersuchte Rohmaterial wurde, wie bereits jenes im Modul 2, von folgenden Sägereien geliefert (Abbildung 1):

- I: *Corbat Holding SA*: Jura (Vendlincourt, JU)
- II: *Richard Lütscher AG*: Mitteland (Burgdorf, BE)
- III: *Sägerei Koller*: Mittelland (Attelwil, AG)
- IV: *Konrad Keller AG*: Ostschweiz (Unterstammheim, ZH)

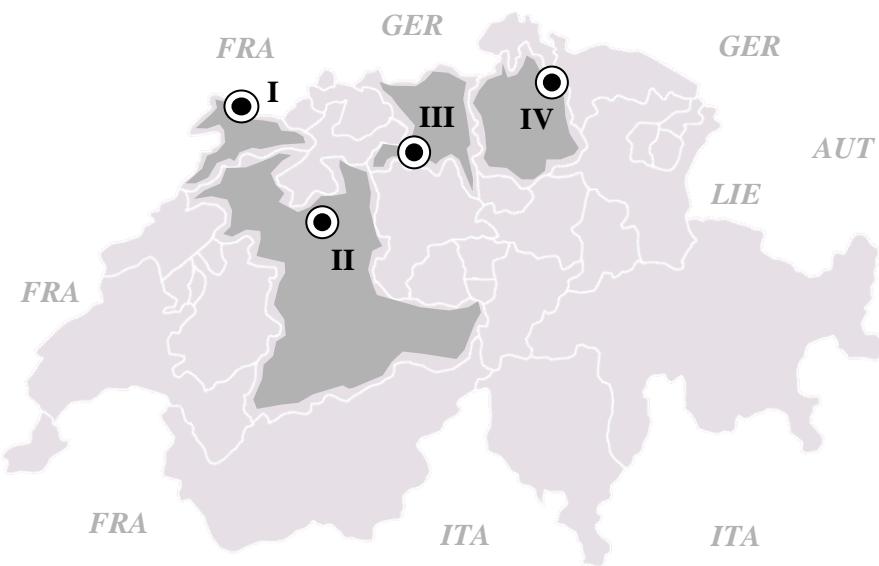


Abbildung 1: Standorte der liefernden Sägereien.

Bei den Sägereien wurden gehobelte Buchenbretter mit einer Holzfeuchte von $8 \pm 2\%$ und einer Mindestlänge von 2 m bestellt. Mit dem Ziel der Vereinfachung der Festigkeitssortierung, sollten die Bretter durch die Säger zu Bündeln mit einheitlicher Länge zugeordnet werden. Informationen betreffend der von den Sägereien angewendeten Trocknungsmethoden sowie weiteren Prozessschritten sind im Technischen Schlussbericht zum Modul 2 (Steiger & Ehrhart, 2016) verfügbar.

Um Buchen-BSH der angestrebten Dimensionen und Qualitäten herstellen zu können, wurde bei den Sägereien entsprechend den Kriterien in der Tabelle 3 visuell vorsortiertes Material der Klassen 1*, 2* und 3* bestellt. Die Menge und Abmessungen der bestellten Bretter je Sägerei (Co = Corbat, Ko = Koller, Ke = Keller, Lö = Lütscher) sind in der Tabelle 4 ersichtlich.

Tabelle 3: Sortiermerkmale und Grenzwerte für die Sägerei-seitige visuelle Vorsortierung der Buchenbretter für die BSH-Produktion im Modul 4.

APHolz_REF-1011-04200_BuBSH			
Sortiermerkmale	Sortierklassen		
	3*	2*	1*
1. Äste			
- Einzelast	≤ 50 mm	≤ 30 mm	≤ 15 mm
- Astansammlung	≤ 60 mm	nicht zulässig	nicht zulässig
- Schmalseitenast	zulässig	zulässig	nicht zulässig
2. Rindeneinwuchs	≤ 50 mm	≤ 30 mm	≤ 10 mm
3. Markröhre	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
4. Risse			
- Schwindrisse	zulässig	zulässig	nicht zulässig ^a
- Blitz- und Frostrisse	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
- Ringschäle	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
5. Baumkante	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
6. Krümmung			
- Längskrümmung	≤ 18 mm	≤ 12 mm	≤ 12 mm
- Verdrehung	≤ 20 mm	≤ 10 mm	≤ 10 mm
- Querkrümmung	≤ 8 mm	≤ 5 mm	≤ 3 mm
7. Rotkern, Verfärbung, Fäule			
- Rotkern	zulässig	zulässig	zulässig
- nagelfeste Verfärbungen	≤ 90 mm	≤ 60 mm	nicht zulässig
- Fäule	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
8. Insektenfrass	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
9. Wellenförmige Fladern	zulässig	zulässig	nicht zulässig
10. Sonstige Merkmale			
- sichtbare Faserablenkung in Schmal- oder Breitseite	zulässig	zulässig	nicht zulässig
Gültig für Brettlänge 3000 mm und Brettbreite von b = 160 mm			
^a Endrisse bis 50 mm sind zulässig			

Tabelle 4: Bestellmenge, Dimension und Sortierklasse je Sägerei in m³.

Bestellmenge [m ³]	Sortierklassen in der Vorsortierung		
Querschnittsabmessungen	3*	2*	1*
135 × 30 mm ²	Co: 2.5	Co: 2	-
175 × 30 mm ²	Co: 18 / Ko: 4 / Lö: 8	Co: 15 / Ko: 3 / Lö: 6	Co: 2 / Ko: 0.5 / Lö: 1
195 × 30 mm ²	Co: 10 / Ke: 8.2	Co: 10 / Ke: 8.2	-

5.2 Festigkeitssortierung des Rohmaterials

Um den Transport nicht benötigter Qualitäten und Quantitäten zu vermeiden, wurde die Festigkeitssortierung vor Ort in den Sägereien in den Monaten Januar bis April 2017 durchgeführt. Als positiver Nebeneffekt ermöglichte dies, den Sägereien einen Einblick in den Sortierprozess zu geben und ein direktes Feedback zum bereitgestellten Material zu geben.

Die Festigkeitssortierung erfolgte gemäss den Erkenntnissen aus dem Modul 2 des Projektes (siehe Technischen Schlussbericht zu Modul 2 (Steiger & Ehrhart, 2016) sowie Ehrhart et al., 2016a) kombiniert visuell und maschinell. Der dynamische E-Modul wurde dabei mit dem Gerät Timber Grader MTG der Firma Brookhuis gemessen. Da die Ansprüche hinsichtlich der Festigkeit und Steifigkeit für die Innenlangen der kombinierten BSH-Querschnitte GL40c und GL48c niedriger als T33 sind, wurde zusätzlich die Klasse T22 definiert. Eine Beschreibung der berücksichtigten Kriterien sowie Untersuchungen zu deren Einfluss auf die Festigkeit und Steifigkeit sind in Ehrhart et al. (2016b) enthalten. Die bei der Festigkeitssortierung angewandten Grenzwerte sind in der Tabelle 5 (visuelle Sortierung) und der Tabelle 6 (maschinelle Sortierung) ersichtlich.

Tabelle 5: Grenzwerte für die visuelle Festigkeitssortierung von Buchenbrettern.

APHolz_REF-1011-04200_BuBSH				
Sortiermerkmale	Sortierklassen			
	4	3	2	1
1. Äste				
- Einzelast (KAR)	≤ 0.40	≤ 0.20	≤ 0.10	≤ 0.05
- Astansammlung (tKAR)	≤ 0.40	≤ 0.20	≤ 0.10	≤ 0.05
2. Rindeneinwuchs (KAR)	≤ 0.40	≤ 0.20	≤ 0.10	≤ 0.05
3. Markröhre	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
4. Risse				
- Schwindrisse	zulässig	zulässig	zulässig	nicht zulässig ^a
- Blitz- und Frostrisse	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
- Ringschäle	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
5. Baumkante	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
6. Krümmung				
- Längskrümmung	$\leq 12 \text{ mm}$			
- Verdrehung	$\leq 10 \text{ mm}$			
- Querkrümmung	$\leq 3 \text{ mm}$			
7. Rotkern, Verfärbung, Fäule				
- Rotkern	zulässig	zulässig	zulässig	zulässig
- nagelfeste Verfärbungen	$\leq 0.3b$	$\leq 0.1b$	zulässig	zulässig
- Fäule	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
8. Insektenfrass	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
9. Wellenförmige Fladern	zulässig	zulässig	zulässig	nicht zulässig
10. Sichtbare Faserablenkung	zulässig	zulässig	zulässig	nicht zulässig
Gültig für Brettlänge 3000 mm und Brettbreite von $b = 160 \text{ mm}$; ^a Endrisse bis 50 mm sind zulässig				

Tabelle 6: Grenzwerte des dynamischen Elastizitätsmoduls zur Klassierung von gemäss Tabelle 5 vorgängig visuell sortierten Buchenbrettern bei einer Holzfeuchte von $u = 8 \pm 2\%$.

Visuelle Sortierklasse	Sortierklassen			
	T22	T33	T42	T50
1	≥ 10000	≥ 12000	≥ 14000	≥ 16500
2	≥ 10000	≥ 14000	≥ 16500	nicht zulässig
3	≥ 10000	≥ 16500	≥ 18000	nicht zulässig
4	≥ 15000	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig

Die seitens der Sägereien zur Verfügung gestellten Ressourcen ermöglichten einen reibungslosen Sortiervorgang bei allen Betrieben. Bei den Sägereien Richard Lötscher AG und Konrad Keller AG erlaubten überdachte Freilager, bei der Firma Corbat Holding SA die Sortierung Indoor ein von der Witterung unabhängiges Arbeiten (Abbildung 2). Ebenso sei die gute Unterstützung durch das Werkspersonal, etwa durch Staplerfahrer beim Transport der Pakete, bei allen Betrieben erwähnt.



Abbildung 2: Festigkeitssortierung im überdachten Freilager der Firma Konrad Keller AG in Unterstammheim/ZH (links) und in der Produktionshalle der Corbat Holding SA in Vendlincourt/JU (rechts).

Hinsichtlich der Qualität, Vorbereitung und Verarbeitung der Bretter und Pakete gab es zwischen den Sägereien grössere Unterschiede. Bei den Betrieben Konrad Keller AG und Corbat Holding SA wurden, wie vereinbart, beidseitig gehobelte, visuell grob vorsortierte und paketweise längengleiche Bretter zur Verfügung gestellt, was ein zügiges Voranschreiten der Festigkeitssortierung ermöglichte.

Bei den Sägereien Richard Lötscher AG und Koller erschwerten uneinheitliche Brettängen im Paket sowie nicht allseitig ausgehobelte Oberflächen die Festigkeitssortierung. Ändert sich die Länge der Bretter, so muss Mass genommen und die Geräteeinstellungen geändert werden, was den Zeitaufwand je Brett etwa verdoppelt. Nicht vollständig ausgehobelte Oberflächen erschweren einerseits die visuelle Beurteilung eines Brettes, deuten andererseits aber auch auf eine grosse Querkrümmung (Schüsselung) hin und erfordern regelmässig die Bestimmung selbiger als etwaiges Ausschlusskriterium gemäss Tabelle 5. Diese Aspekte wurden während der Besuche mit den Mitarbeitern und Sägewerkbesitzern diskutiert.



Abbildung 3: Uneinheitliche Brettängen (links) und nicht ausgehobelte Oberflächen (Mitte) erschweren die Festigkeitssortierung und erhöhen den Zeitaufwand. Bretter mit starker Markröhre oder Baumkante entsprechen nicht der vereinbarten Vorsortierung (rechts) und hätten bereits vor dem Hobeln entnommen werden sollen.

Bei den Sägereien Konrad Keller AG und Corbat Holding SA betrug der Anteil des Ausschusses 12.7% bzw. 8.4% der sortierten Bretter. Die Festigkeitsklassen T22, T33 und T42 und T50 wurden von diesen Sägereien sehr gut bedient. Der im Vergleich höhere Anteil der Festigkeitsklasse T50 der Sägerei Corbat kann auf die Vorbestellung besserer Qualitäten zurückgeführt werden (Abbildung 4).

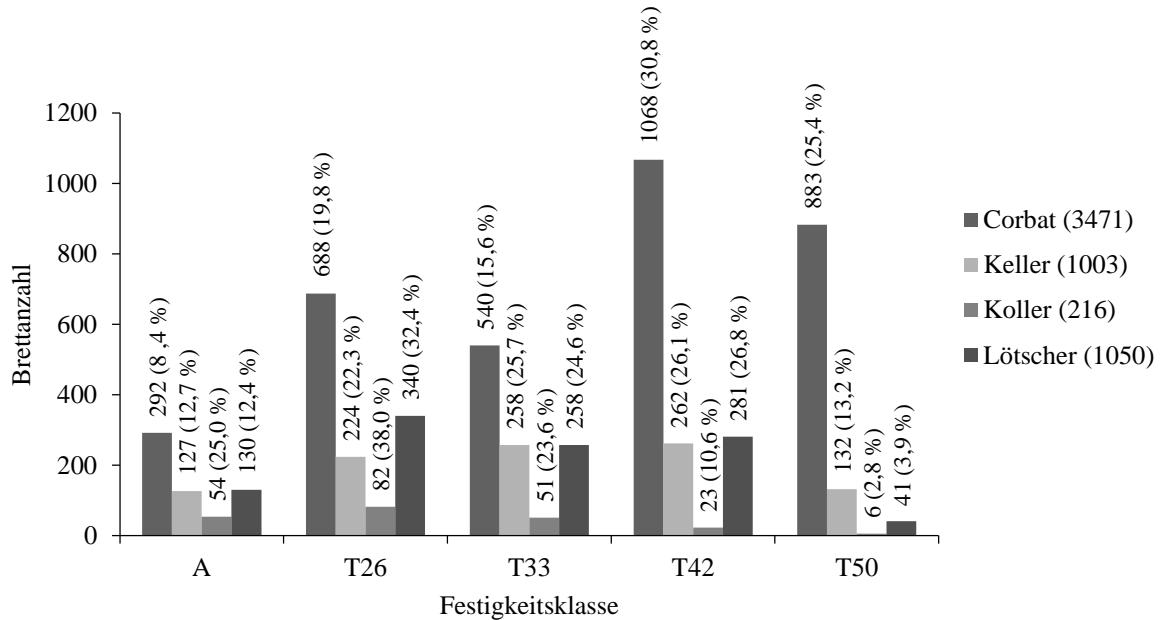


Abbildung 4: Anzahl und prozentuelle Verteilung der Bretter je Festigkeitsklasse nach Sägerei (A = Ausschuss, Werte in Klammer = Anzahl der sortierten Bretter je Sägerei).

Nach eigener Aussage wurde das Brettmaterial der Firma Lötscher nicht vorsortiert und sämtliche beim Einschnitt anfallenden Bretter zur Verfügung gestellt. Dies entspricht zwar nicht der vereinbarten Vorgehensweise, erlaubt dafür eine Betrachtung der Gesamtausbeute bei einer grösseren Anzahl an Brettern ($n = 1050$). Mit 12.4% liegt der Anteil des Ausschusses im Bereich der Sägereien Konrad Keller AG und Corbat Holding SA, das Gros der Bretter wird den Festigkeitsklassen T22 (32.4%), T33 (24.6%) und T42 (26.8%) zugeordnet, nur 4% entfallen auf die Klasse T50 (Abbildung 4).

Die Bewertung der Qualität der von der Sägerei Koller gelieferten Bretter kann nicht abschliessend erfolgen, da einige wenige visuell gute Bretter bereits vor der Sortierung durch T. Ehrhart für die Herstellung der Delaminierungsproben den Paketen entnommen wurden. Die verbleibenden Bretter entsprachen allerdings nicht der bestellten Qualität. Daher wurde die Sortierung nach etwa 200 Brettern abgebrochen. Sehr häufig waren die Bretter stark markhaltig, enthielten verwachsene Äste, welche die geforderte Maximalgrösse deutlich überschritten, oder waren stark gekrümmmt. Da der Anteil von Koller an der Gesamtbestellung bei nur ca. 7.6% liegt, sollten zunächst aus dem vorhandenen Material die Biege-, Zug-, Schub- und ein Teil der Druckprüfkörper produziert werden. Dies bisher nicht verwendete Material liegt bei der neuen Holzbau AG in Lungern. Gegebenenfalls fehlendes Material zur Produktion der verbleibenden Prüfkörper sollte später, unter Berücksichtigung der zugewonnenen Erkenntnisse, nachbestellt werden.

5.3 Dokumentation der Bretteigenschaften

Zusätzlich zur Festigkeitssortierung gemäss Tabelle 5 und Tabelle 6 wurden die ermittelten Eigenschaften der Bretter auch quantitativ erfasst und dokumentiert. Hierfür wurde zunächst jedes Brett mit einer Identifikationsnummer an der Stirnseite und entlang der Brettschmalseite versehen. Verschiedenfarbige Markierungen im Abstand von einem Meter sollten darüber hinaus im fertigen Träger die Identifizierung der Position von lokalen Charakteristika wie Ästen und Rindeneinwüchsen ermöglichen (Abbildung 5).



Abbildung 5: Farbige Markierung der Seitenfläche alle 500 mm (links) und stirnseitige Beschriftung der sortierten und aufgenommenen Buchenbretter (rechts).

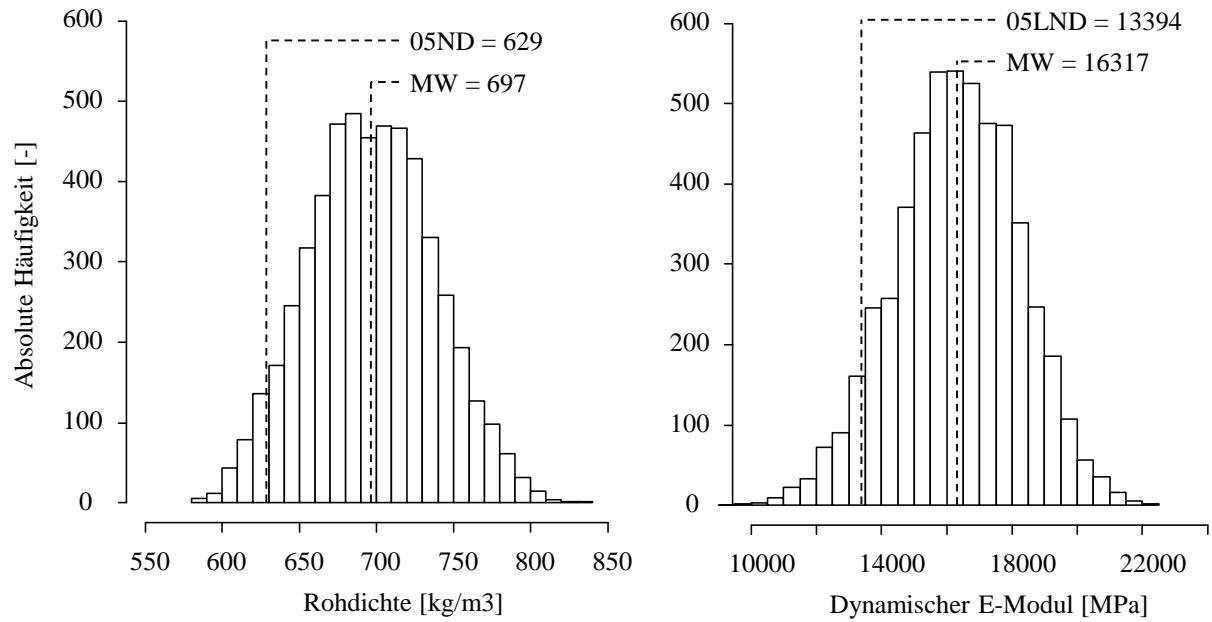


Abbildung 6: Verteilung der Rohdichte (links) und des dynamischen E-Moduls (rechts); $n = 5292$. Die Bretter weisen eine Holzfeuchte von 8% auf.

Die Abbildung 6 gibt, für die eine Holzfeuchte von 8% aufweisenden Bretter, einen Überblick zur Verteilung der Dichte und des dynamischen Elastizitätsmoduls (ohne Unterscheidung nach Sägerei). Der Mittelwert liegt für die Dichte bei 697 kg/m^3 und für den dynamischen Elastizitätsmodul bei 16317 MPa . Die Dichte liegt damit ca. 3.5% unter dem im Modul 2 ermittelten Wert von 724 kg/m^3 , der dynamische Elastizitätsmodul ist auf nahezu identischem Niveau.

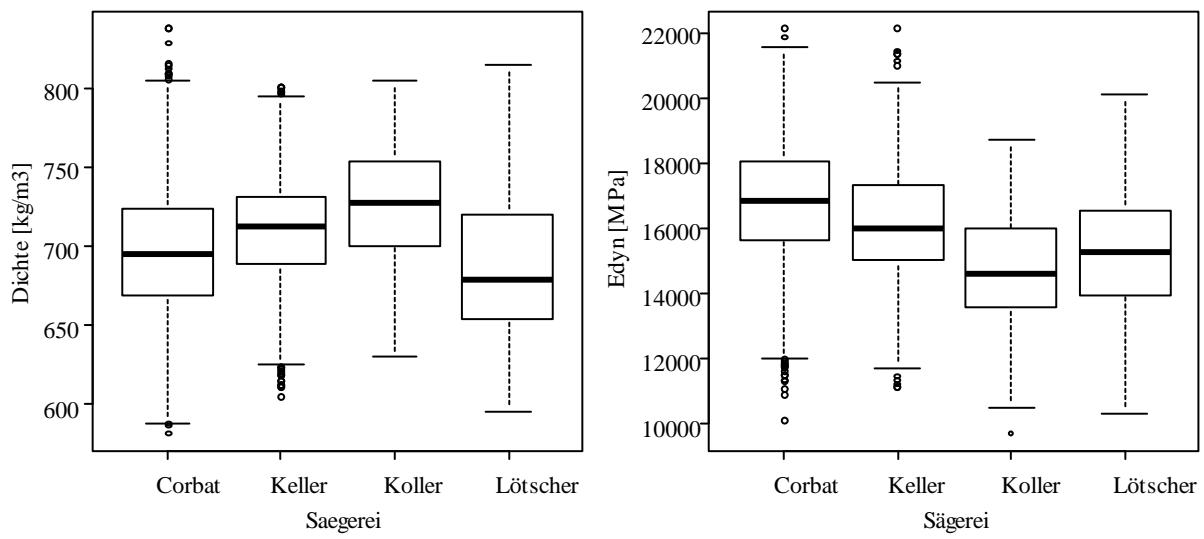


Abbildung 7: Verteilung von Dichte (links) und dynamischem E-Modul (rechts) nach Sägerei. Die Bretter weisen eine Holzfeuchte von 8% auf.

Zwischen den Sägereien bestehen nicht nur hinsichtlich der Verteilung der Bretter in die Festigkeitsklassen (siehe Abbildung 4), sondern auch hinsichtlich der physikalischen Eigenschaften Unterschiede. Die mittlere Dichte schwankt zwischen 686 kg/m^3 (Lötscher) und 724 kg/m^3 (Koller), das Material von Corbat (696 kg/m^3) und Keller (710 kg/m^3) liegt dazwischen. Beim dynamischen Elastizitätsmodul sind die Werte von Corbat mit im Mittel 16770 MPa am höchsten vor Keller (16104 MPa), Lötscher (15241 MPa) und Koller (14635 MPa). Ursache dafür sind vermutlich einerseits unterschiedliche Wuchsbedingungen, andererseits aber auch die unzureichende bzw. fehlende Vorsortierung (Corbat & Keller vs. Lötscher & Koller) sowie die Lieferung von stark markhaltiger, astiger und gerissener Ware (Koller).

In der Bestellung des Materials für die BSH-Produktion im Modul 4 wurde eine Mindestlänge der Bretter von 2000 mm vorgegeben. Die in den Bestellungen für die Module 2 und 3 aufgrund der für die Zugversuche notwendigen freien Prüflänge und dem Einspannbereich definierte Länge von 3000 mm wurde reduziert, um den Sägereien beim Einschnitt mehr Möglichkeiten zur optimierten Stammnutzung zu geben. Kürzere Längen als 2000 mm wurden vermieden, weil der Sortieraufwand je Brett praktisch unabhängig von dessen Länge ist und längere Bretter deshalb ein schnelleres Voranschreiten bei der Sortierung erlauben. Die Verteilung der Längen der zur Verfügung gestellten Bretter ist in der Abbildung 8 (links) ersichtlich. Das Gros der Bretter (89.7%) wies eine Länge von 2000 bis 3200 mm auf, einige wenige Bretter der Länge 5000 mm wurden von der Firma Koller zur Verfügung gestellt.

Überschritten visuelle Merkmale von Brettern die in der Tabelle 5 definierten Grenzwerte für die visuelle Klasse 4, so führte dies nicht zwingend dazu, dass das gesamte Brett dem Ausschuss zugeordnet wurde. Teils lagen beispielsweise grosse Äste nahe den Brettenden und der verbleibende gute Abschnitt des Brettes konnte einer höheren visuellen Klasse zugeordnet und für die Produktion von Buchen-BSH verwendet werden. Die akzeptierte Mindestlänge dieser Abschnitte wurde in Absprache mit Vertretern der BSH produzierenden Firma neue Holzbau AG infolge technischer Anforderungen bei der Keilzinkung auf 1500 mm festgelegt.

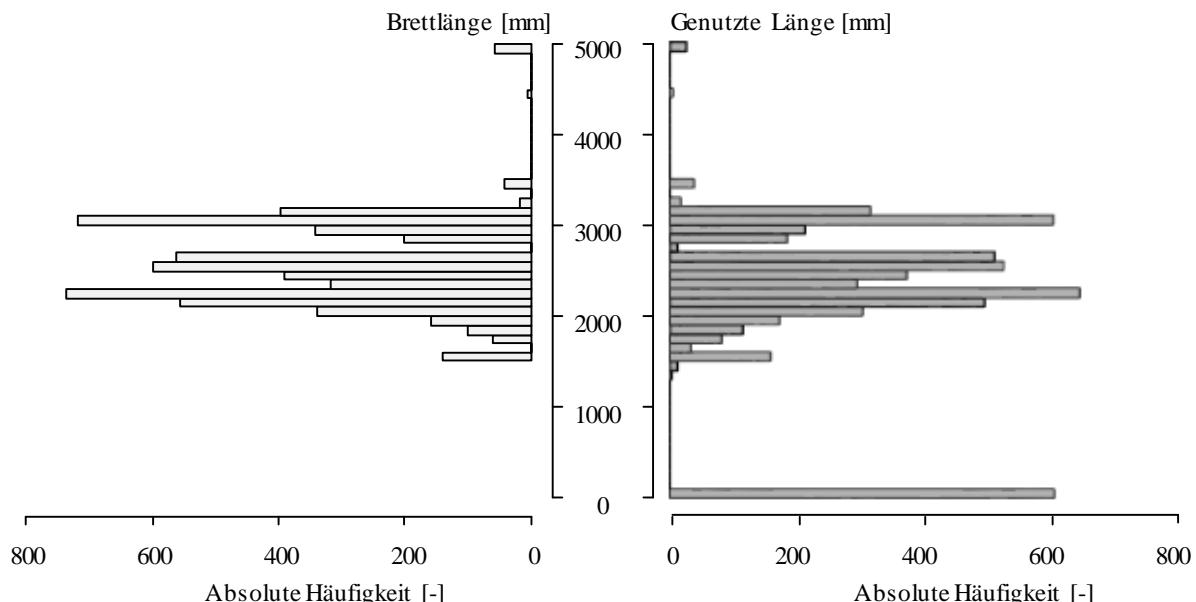


Abbildung 8: Längen der von den Sägereien zur Verfügung gestellten Bretter (links) und genutzte Brettlängen (rechts; genutzte Länge „0“ entspricht Ausschussbrett).

Die tatsächlich genutzte Länge wurde dokumentiert und ist in der Abbildung 8 (rechts) der Verteilung der Längen der gelieferten Bretter gegenübergestellt. Größtenteils (bei 92.5% der Bretter) konnten Längen von 1800 mm bis 3200 mm genutzt werden. Eine genutzte Brettlänge von 0 mm entspricht dabei einem zur Gänze dem Ausschuss zugeordneten Brett. Hauptgründe dafür, dass ein Brett vollständig dem Ausschuss zugeordnet werden musste, waren weitläufige Markröhre (176 Bretter; 3.0% der Gesamtanzahl), starke Krümmung (161; 2.8%), stark gerissene Oberfläche oder gespaltene Bretter (100; 1.7%) und grosse Äste in ungünstiger Lage (83; 1.4%). Sowohl Bretter mit Markröhre, als auch solche mit grossen Ästen in einer Position, die keine nutzbare Mindestlänge von 1500 mm erlaubt, sollten bereits vor der Trocknung entnommen werden, um einen unnötigen Ressourceneinsatz bzw. Arbeitsaufwand im BSH-Produktionswerk zu vermeiden.

6 Produktion, Transport und Klimatisierung des Buchen-BSH

6.1 Querschnitte

Die Prüfkörper für die 4-Punkt Biegeversuche wiesen Querschnitte mit einer Höhe und Breite von 200 mm / 120 mm, 400 / 160, 600 / 160 und 800 / 160 auf (Abbildung 9). Die Prüfkörper der Biegefestigkeitsklasse GL40c wurden aus Brettern der Festigkeitsklasse T33 (Randlamellen) und T22 (Innenlagen) aufgebaut, GL48c-Prüfkörper bestanden aus den Brettern der Klassen T42 und T22 und die GL55c-Prüfkörper aus Brettern der Klasse T50 und T33. Um bei einer konstanten Brettstärke von 25 mm ein gleichbleibendes Verhältnis von höheren und niedrigeren Lamellenqualitäten für verschiedene Querschnittshöhen zu gewährleisten und damit Untersuchungen zum Größeneffekt zu ermöglichen, wurde ein Randbereich von $2 \times 25\%$ der Gesamthöhe definiert. Dies ermöglichte, für sämtliche Geometrien mit der ganzen Brettstärke von 25 mm zu arbeiten ($8 \times 25 = 200$ mm, $16 \times 25 = 400$ mm, usw.) Der Randbereich bestand aus jeweils ober- und unterseitig 2 (50 mm), 4 (100 mm), 6 (150 mm) und 8 Lamellen (200 mm) der höheren Qualität (Abbildung 9).

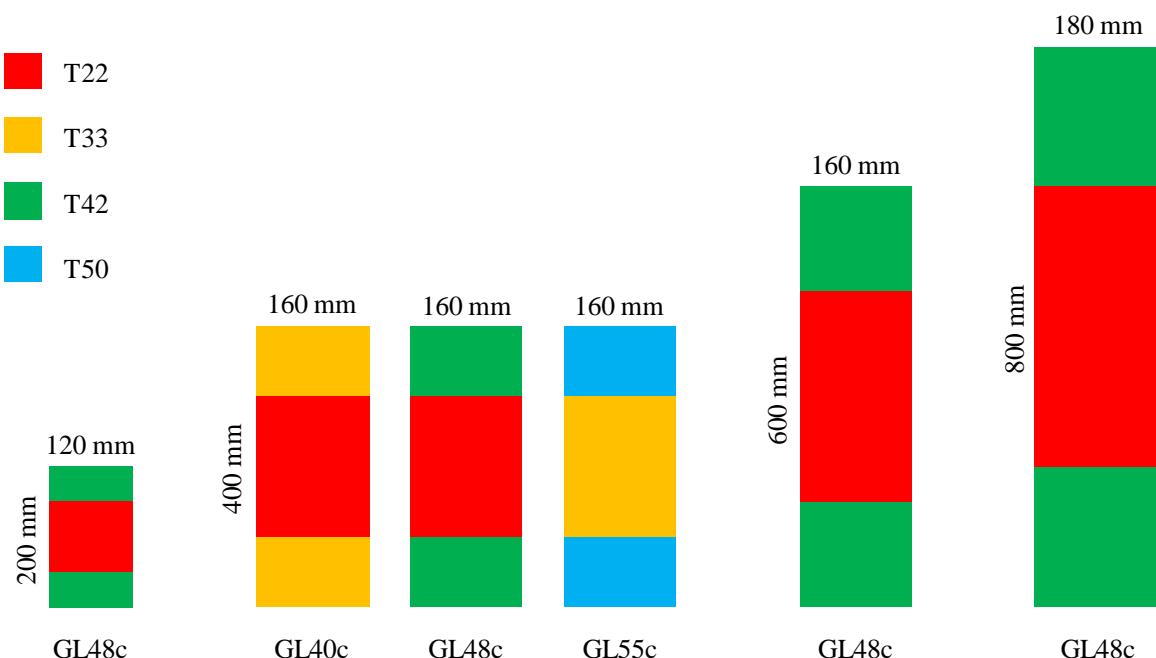


Abbildung 9: Querschnittsaufbau und Geometrie für die 4-Punkt Biegeversuche.

Um die Wahrscheinlichkeit eines vorzeitigen und unerwünschten Biegezugversagens der Schubprüfkörper zu vermeiden, wurden für den Randbereich der 3-Punkt Biegeprüfkörper durchwegs Bretter der höchsten Festigkeitsklasse T50 verwendet und lediglich die Festigkeitsklassen der Bretter in den Innenlagen variiert (Abbildung 10, rechts). Im Bereich der Krafteinleitung bzw. Auflager wurden zur Verstärkung der Schubträger eingeklebte Gewindestangen bzw. selbstbohrende Schrauben eingesetzt.

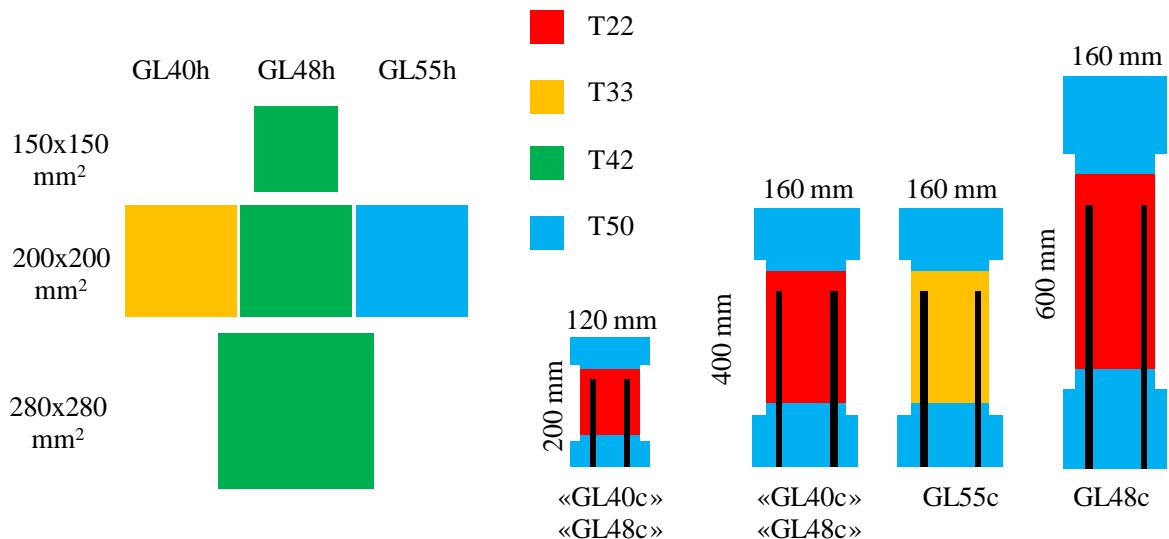


Abbildung 10: Querschnittsaufbau und Geometrie der Prüfkörper für die Druck- (links) und Schubversuche (rechts). Die schwarzen vertikalen Linien entsprechen Verstärkungen zur Krafteinleitung mittels selbstbohrenden Schrauben oder eingeklebten Gewindestangen.

6.2 Keilzinkung und Flächenverklebung

Die Produktion der BSH-Prüfkörper fand während 3 Wochenenden am 6.-9. Mai, 13.-16. Mai und 20.-23. Mai 2017 bei der neuen Holzbau AG in Lungern/OW statt. Dabei wurden zunächst jeweils am Samstag die je Charge benötigten Bretter der geforderten Längen keilgezinkt. Am Montag wurde dann die erste Hälfte der Charge flächenverklebt.



Abbildung 11: Auftrag von Primer und Klebstoff (links) sowie Pressvorgang (rechts) bei der Firma neue Holzbau AG in Lungern; 8. Mai 2017.

Den Ergebnissen und Erkenntnissen aus dem Modul 3 des Projektes folgend, wurde dazu der 1-K Polyurethan Klebstoff HS 709 mit einer Auftragsmenge von 180 g/m² sowie ein Primer (Auftragsmenge 20 g/m², Konzentration 10%, ohne Ablüften) eingesetzt. Nach der Aushärtung der ersten Hälfte der Charge wurde dienstags der zweite Teil produziert (Abbildung 11).

6.3 Dokumentation des Trägeraufbaus

Wie im Kapitel 5.3 beschrieben, wurden die visuellen und physikalischen Eigenschaften der zur Produktion der Prüfkörper verwendeten Bretter detailliert dokumentiert. Um den Zusammenhang zwischen Bretteigenschaften und Trägeraufbau herstellen zu können, wurden die Seitenflächen der BSH-Träger und -Stützen vor deren Abbund aufgenommen (Abbildung 12).



Abbildung 12: Stirnseite Beschriftung der BSH-Träger (links) und Aufnahme der Seitenfläche vor dem Abbund (rechts) zur Dokumentation der Trägeraufbauten und -Eigenschaften.

6.4 Transport der Träger

Die produzierten BSH-Träger und -Stützen wurden mit Sattelschleppern von der neuen Holzbau AG zur Empa Dübendorf geliefert und mit den Hallenkränen abgeladen (Abbildung 13). Während des Transportes und der Lagerung waren die BSH-Träger mit einer Kunststofffolie gegen die Witterung geschützt.



Abbildung 13: Anlieferung und Ablad der ersten BSH-Biegeträger an der Empa Dübendorf; 15. Mai 2017.

6.5 Prüfklima

Aufgrund der Abmessungen und des Gesamtvolumens der Prüfkörper war eine Lagerung unter kontrollierten Klimabedingungen (Klimaraum) nicht möglich. Die Prüfkörper wurden nach Anlieferung in der Bauhalle der Empa Dübendorf deshalb in Kunststoff-Folie luftdicht verpackt gelagert und die Lufttemperatur sowie die relative Luftfeuchtigkeit während der Lagerung und Prüfung mit einem Klimalogger (Ecolog TH1 der Firma ELPROM) in einem Messintervall von 5 Minuten aufgezeichnet. Der für die 21 Biegeträger der Höhe 400 mm relevante Zeitraum von 15. Mai bis 13. Juni 2017 ist exemplarisch in Abbildung 14 dargestellt. Der Mittelwert der Temperatur lag bei 24.7°C, jener der relativen Luftfeuchte bei 39.7%.

Die Ausgleichsfeuchte liegt für diese Lufttemperatur und -Feuchtigkeit bei ca. 7 bis 8%, also sehr gut im angestrebten Bereich von $8 \pm 2\%$. Die vorübergehend nicht konditionierte Lagerung der Prüfkörper kann deshalb als nicht problematisch angesehen werden.

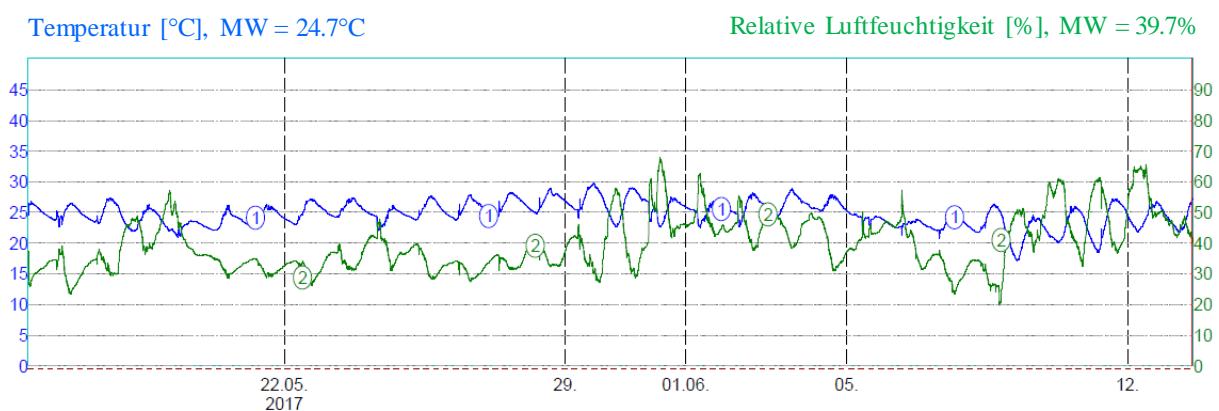


Abbildung 14: Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit in der Prüfhalle für den Zeitraum 15. Mai bis 13. Juni 2017.

6.6 Holzfeuchtigkeit

Detaillierte Angaben zu den von den Sägereien angewendeten Trocknungsmethoden sind im Technischen Schlussbericht zum Modul 2 (Steiger & Ehrhart, 2016) verfügbar.

Die Holzfeuchtigkeit der Zug-, Biege-, Schub-, Druck- und Knickprüfkörper wurde jeweils im Anschluss an die Versuche mittels elektrischer Widerstandsmessung gemessen (Messgerät H-DI 3.10, Firma BES BOLLMANN; Abbildung 15, rechts). Es wurden dazu bis zu drei Messungen je Prüfkörper in den Randlamellen durchgeführt, wobei maximal eine Messung je Lamelle (getrennt durch Keilzinkenverbindungen) stattfand. Exemplarisch sind in der Abbildung 15 die Ergebnisse der 106 Messungen an den 4-Punkt Biegeträgern dargestellt. Die ermittelten Werte lagen zwischen 7.1% und 10.8%, im Mittel bei 8.7% und damit sehr gut in dem für das Projekt definierten Bereich von $8 \pm 2\%$. Da von insgesamt 106 Feuchtemessungen nur 7 knapp ausserhalb des definierten Bereiches von $8 \pm 2\%$ lagen und innerhalb der Träger die gemessene Feuchtigkeit verschiedener Lamellen nicht konstant ist, wird auf eine Feuchtekorrektur der ermittelten mechanischen Eigenschaften und der Dichte im Folgenden verzichtet. Informationen zu den Holzfeuchten der Schub-, Druck- und Zugprüfkörper sind den jeweiligen Kapiteln dieses Berichts zu entnehmen.

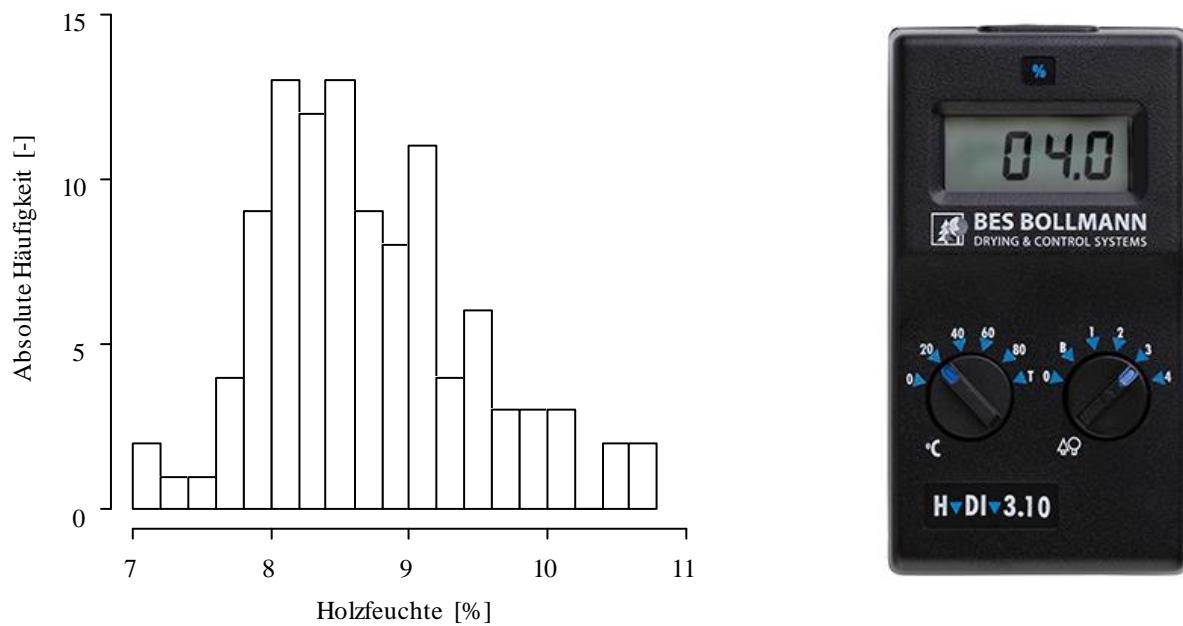


Abbildung 15: Verteilung der ermittelten Holzfeuchtigkeit der Biegeträger ($n = 106$) und verwendetes elektrisches Widerstands-Messgerät H-DI 3.10 der Firma BES BOLLMANN.

7 4-Punkt Biegeversuche

7.1 Prüfaufbau

Die 4-Punkt Biegeversuche zur Bestimmung (i) der Biegefestigkeit parallel zur Faser, (ii) des lokalen Biege-Elastizitätsmoduls, (iii) des globalen Biege-Elastizitätsmoduls sowie (iv) des Schubmoduls parallel zur Faser wurden gemäss EN 408 durchgeführt (Abbildung 16).

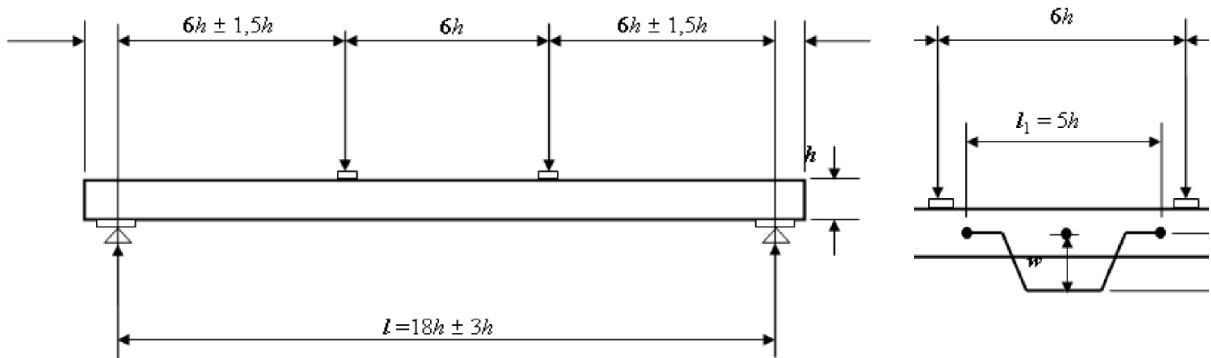


Abbildung 16: Prüfaufbau und geforderte geometrische Verhältnisse gemäss EN 408 zur Bestimmung der Biegefestigkeit parallel zur Faser (links) und zur Ermittlung des lokalen Biege-Elastizitätsmoduls (rechts).

Die Kraft wurde dabei in den beiden Drittelpunkten eingeleitet, die Spannweite entsprach der Normenforderung und betrug die 18-fache Trägerhöhe. Für die Trägerhöhen von 200, 400, 600 und 800 mm ergaben sich Spannweiten von 3600, 7200, 10800 und 14400 mm (Abbildung 17).



Abbildung 17: Setup zur 4-Punkt Biegeprüfung eines Buchen-BSH Trägers mit einer Höhe von 800 mm und einer Spannweite von 14.4 m; 15. August 2017.

Die Auflager waren beidseitig gelenkig und einseitig horizontal verschieblich. Dadurch sollte eine freie Verdrehung über dem Auflager gewährleistet und Horizontalkräfte vermieden werden (Abbildung 18, links).

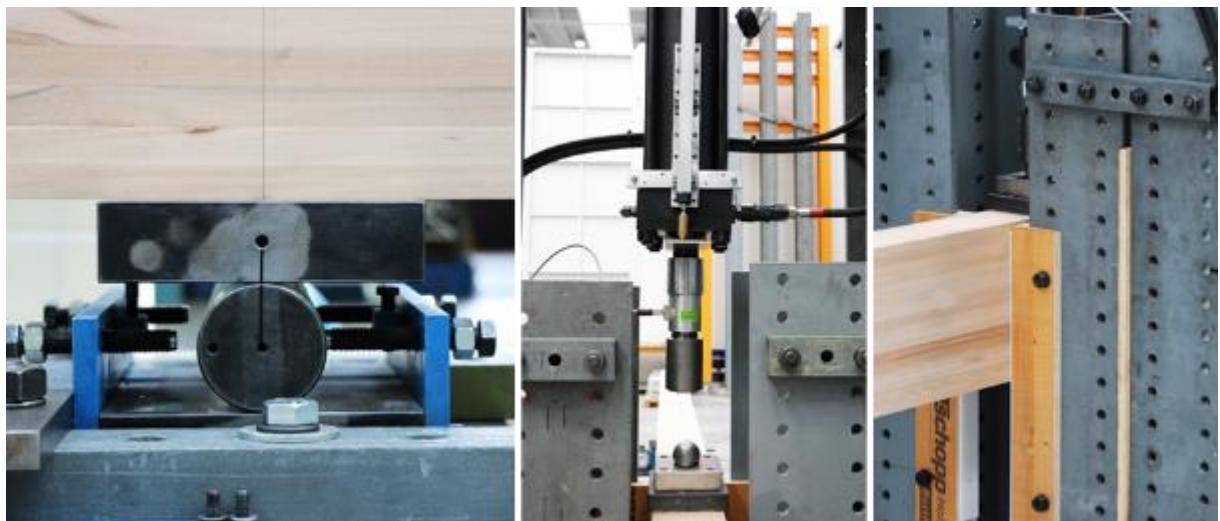


Abbildung 18: Auflagerkonstruktion (links), Hydraulikzylinder mit Kraftmessdose und sphärischer Lagerung auf der Lasteinleitungsplatte (Mitte) und reibungsarme Kipphalterung im Bereich der Krafteinleitung (rechts).

Die Kraft wurde mittels 2 Hydraulikzylindern mit einer Kapazität von je 700 kN aufgebracht. Zur Kontrolle der Kraftmessung mittels Öldruck wurden zwischen den Zylindern und der Lasteinleitungsplatte jeweils eine Kraftmessdose platziert (Abbildung 18, Mitte). Um ein Kippen der Träger zu verhindern, wurden Kippsicherungen mit Führungen aus reibungssarmen Kunststoff (Polyacetal, POM-Delrin) konstruiert und beidseitig des Trägers in den Drittelpunkten angeordnet (Abbildung 18, rechts).

7.2 Messeinrichtung

Zur Bestimmung des lokalen Biege-Elastizitätsmoduls wurden beidseitig Aluminiumprofile, die entsprechend den Vorgaben der EN 408 im Abstand von $0.5 \cdot h$ von den Lasteinleitungspunkten auf eigens konstruierten Führungsrollen auflagen (siehe Abbildung 16, rechts), und laseroptische Wegsensoren (optoNCDT ILD 2200-100 des Herstellers Micro-Epsilon) verwendet (Abbildung 19, links und Mitte). Der lokale Biege-Elastizitätsmodul wird im Bereich der reinen Biegung ermittelt und beinhaltet deshalb keine Anteile aus Schub-, Querdruck- oder Setupverformung. Er dient u.a. zur Einstufung in Festigkeitsklassen gemäss EN 338 (2016). Die Gesamt-Durchbiegung in Feldmitte wurde mit einem weiteren laseroptischen Wegsensor (optoNCDT ILD 2200-200) von oben (Abbildung 19, rechts) bis zum Versagen gemessen und basierend darauf der globale Biege-Elastizitätsmodul berechnet.

Im Gegensatz zum lokalen Biege-Elastizitätsmodul tragen Schub-, Querdruck- und Setupverformungen zur Reduktion des globalen Biege-Elastizitätsmoduls bei. In der EN 384 (2016) wird für Nadelholz für die Berechnung des lokalen Biege-Elastizitätsmoduls auf Basis des globalen Biege-Elastizitätsmoduls die folgende Gleichung 1 angegeben:

$$E_{m,l} = 1,3 \cdot E_{m,g} - 2690 \quad (1)$$

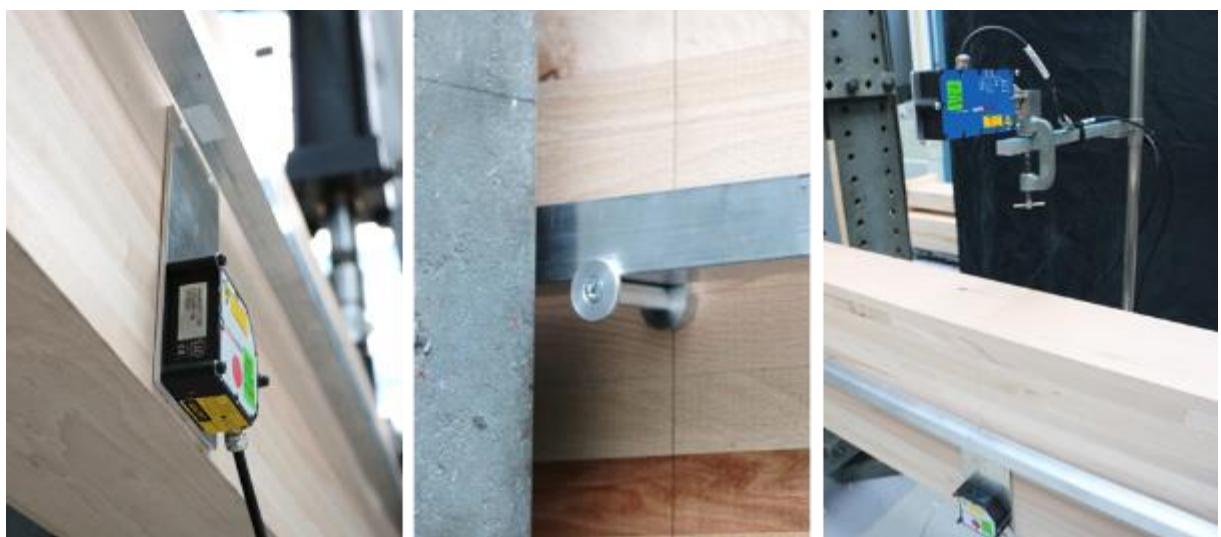


Abbildung 19: Beidseitig montierte Laser zur optischen Messung der lokalen (Biege-) Verformung (links), Halterung und Führung der Messlatte zur Ermittlung des lokalen Biege-Elastizitätsmoduls (Mitte) und laseroptische Messung der globalen Vertikalverformung (rechts).

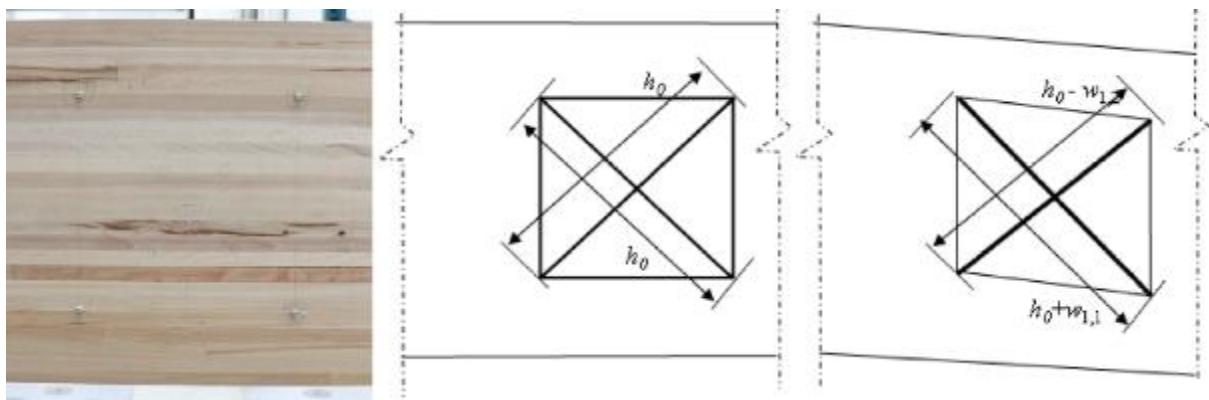


Abbildung 20: Messpunkte zur Ermittlung des Schubmoduls gemäss EN 408 (links) und Illustration der Verformung der Diagonalen aufgrund der Schubspannung (Mitte und rechts).

Die Bestimmung des Schubmoduls erfolgte mit zwei unterschiedlichen Ansätzen. Zum einen wurden in 3 von 4 Schubfeldern mittig im Bereich zwischen der Lasteinleitung und bei den Auflagern entsprechend EN 408 4 Messpunkte quadratisch mit einer Diagonalen-Länge von 500 mm angeklebt und die Längenänderungen der Diagonalen mit Messuhrenstangen ermittelt (Abbildung 20). Der vierte Schubfeldbereich wurde mit einem stochastischen Muster versehen und das Verzerrungsfeld mithilfe des Digital Image Correlation (DIC) Systems ARAMIS der Firma GOM in regelmässigen Belastungsschritten festgehalten (Abbildung 21).

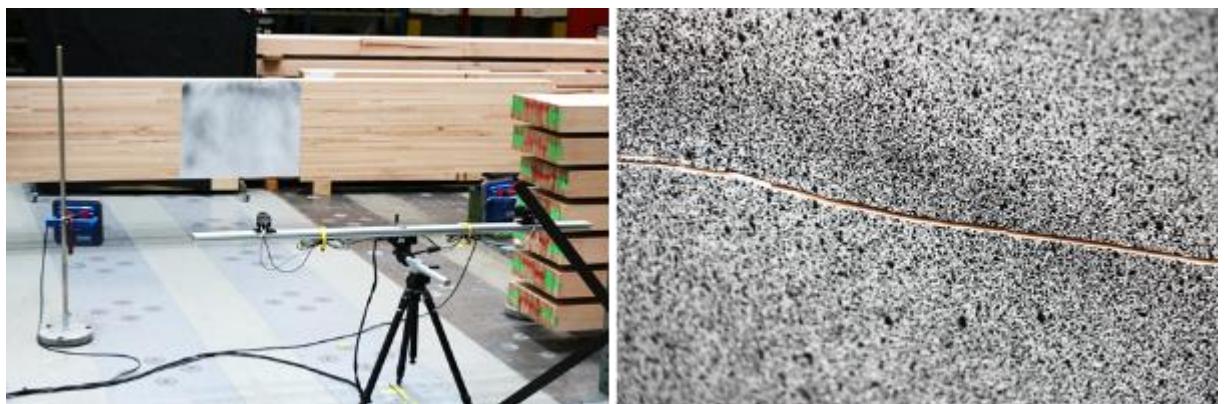


Abbildung 21: Aufbau zur DIC-Messung des Schubfeldes (links) und stochastisches Muster.

7.3 Belastungsprotokoll

Die Belastung der Prüfkörper wurde weggesteuert, das heisst mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit der Hydraulikzylinder, aufgebracht. Dabei wurden das Belastungsprotokoll in Anlehnung an die EN 26891 gemäss Abbildung 22 in die folgenden Phasen unterteilt:

Phase 1: Bis zum Erreichen einer Kraft von 1% der Maximalkapazität (700 kN) der Prüfzylinder ist eine präzise Steuerung der Kraft nicht möglich. Deshalb wurde bis zum Erreichen der Vorlast von 7 kN die Last sehr langsam aufgebracht und manuell gesteuert.

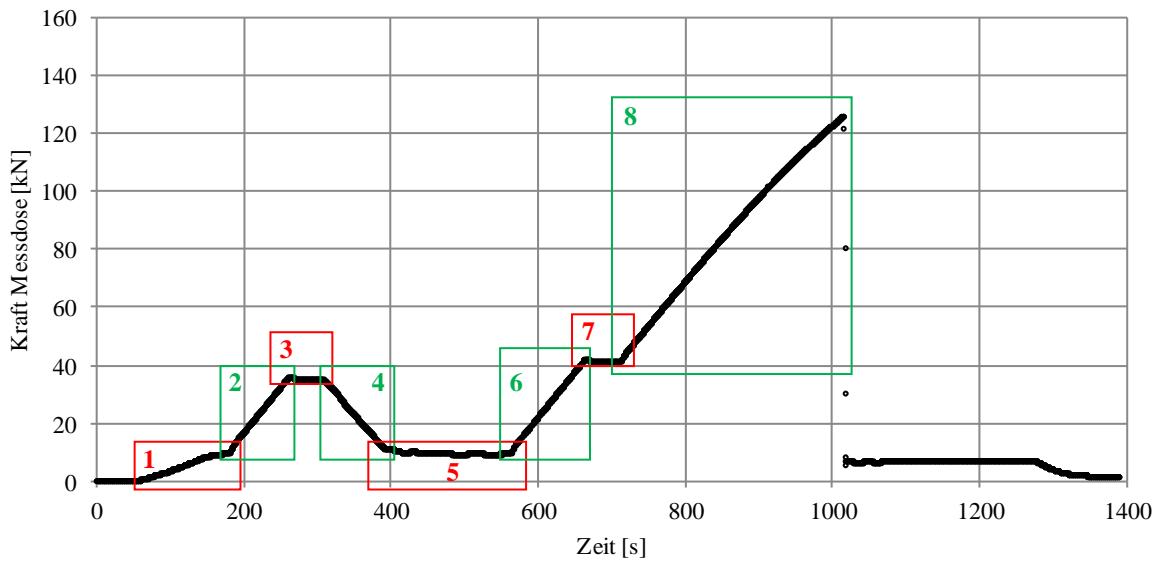


Abbildung 22: Aufgezeichnetes Belastungsprotokoll (Kraft-Zeit Diagramm) während eines 4-Punkt Biegeversuches (Prüfkörper: 400-40-4).

Phase 2: Nach Erreichen der Vorlast von 7 kN wurden die Hydraulikzylinder mit einer, abhängig von der Trägerhöhe und der erwarteten Bruchlast bzw. erwarteten maximalen Durchbiegung, konstanten Prüfgeschwindigkeit von 0,15 mm/s ($h = 200$ mm) bis 0,65 mm/s ($h = 800$ mm) ausgefahren.

Phase 3: Nach Erreichen von 40% der geschätzten Maximallast wurde die Last für 30 Sekunden konstant gehalten.

Phase 4: Der Prüfkörper wurde mit derselben Geschwindigkeit wie bei den Belastungsphasen bis zu einer Last von 10% der geschätzten Maximallast entlastet.

Phase 5: Bei einer konstanten niedrigen Last von 10% der geschätzten Maximallast wurden die seitlichen laseroptischen Wegsensoren sowie das Messgestänge abmontiert, um dieses vor Beschädigung infolge Versagens des Prüfkörpers zu schützen.

Phase 6: Die Hydraulikzylinder wurden erneut mit konstanter Prüfgeschwindigkeit, identisch zu jener aus Phase 2, bis zu einer Last von 50% der geschätzten Maximallast ausgefahren.

Phase 7: Die Last wurde konstant gehalten und die Verschieblichkeit der Auflager geändert. Um ein statisch bestimmtes System zu gewährleisten, darf lediglich ein Auflager horizontal unverschieblich sein. Dies führt dazu, dass der Träger im Laufe der Prüfung etwas in die Richtung des verschieblichen Lagers wandert. Das ursprünglich verschiebliche Lager wurde bei 50% der geschätzten Maximallast horizontal fixiert und das gegenüberliegende freigegeben, um bei Erreichen der Maximallast eine möglichst vertikale Ausrichtung der Prüfzylinder zu erzielen.

Phase 8: Die Last wurde bis zum Bruch mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit (entsprechend Phase 2 und 6 zwischen 0,15 mm/s und 0,65 mm/s) gesteigert.

7.4 Ergebnisse

Die Holzfeuchte der Biege-Prüfkörper lag im Bereich von 7.1 bis 10.8% und im Mittel bei 8.7% ($n = 106$, Messung mit elektrischem Widerstands-Messgerät der Firma BES BOLLMANN). Die Mittelwerte getrennt nach den sechs Serien (Trägerhöhe bzw. Festigkeitsklasse) lagen bei 8.1 bis 9.5% und damit sehr gut im vorgegebenen Bereich von $8 \pm 2\%$.

In den dargestellten Boxplots (Abbildung 23 bis Abbildung 26) wird die Box jeweils durch die ersten und dritten Quartile definiert. Die horizontale Linie innerhalb der Box repräsentiert den Median und horizontale Linien ausserhalb der Box stellen Minima und Maxima dar. Ausreisser, die mehr als den 1,5-fachen Interquartilsabstand ober- oder unterhalb der Box liegen, werden als Punkt dargestellt. Die Boxen für die Versuchswerte in der Referenzhöhe $h_{\text{ref}} = 400$ mm sind jeweils grau hinterlegt.

Den Vorgaben der EN 14358 (2016) bzw. den Empfehlungen des JCSS Model Code (2006) folgend, wurde für die Berechnung der statistischen Kennwerte für die Rohdichte eine Standardnormalverteilung (ND) angenommen. Für die Biegefestigkeit sowie den lokalen und globalen Biege-Elastizitätsmodul wurde eine Log-Normalverteilung (LND) verwendet.

Zu Vergleichszwecken wurden die Fraktilewerte auch gemäss EN 14358 (2016) mit dem vereinfachten Ausdruck (Werte «....EN») berechnet, wobei die definierte minimale Standardabweichung von 0,05 (ND) bzw. $0,05 \cdot \bar{y}$ (LND) nicht angesetzt wurde. Die Anwendung dieser Norm-Vorgabe hätte unter anderem zur Folge, dass für die Dichte der BSH-Biegeträger 5%-Fraktilewerte von teilweise unter 600 kg/m^3 errechnet würden. Sowohl die Verteilung der Rohdichte der Bretter (Abbildung 6, links) als auch jene der BSH-Träger (Abbildung 23) lässt erkennen, dass dies ein unangebracht niedriger Wert ist, welcher nicht in der Lage ist, die tatsächlichen Eigenschaften zu beschreiben.

7.4.1 Rohdichte

Die Dichte der BSH-Träger wurde mittels Gewichtsmessung per Kranwaage und über die Trägergeometrie bestimmt. In der Abbildung 23 sind die Verteilung der Dichte, getrennt nach Festigkeitsklasse und Trägerhöhe (links), sowie die Mittelwerte und 5%-Fraktilewerte (rechts) dargestellt.

Obwohl die Dichte der Festigkeitsklasse GL40c ($h = 400$ mm) etwas unter der der anderen Festigkeitsklassen liegt, kann kein deutlicher Zusammenhang zwischen der Festigkeitsklasse oder Trägerhöhe und der Dichte festgestellt werden. Dies ist unter anderem auf den Sortierprozess zurückzuführen, in welchem die Dichte nur indirekt über den dynamischen Elastizitätsmodul als Parameter berücksichtigt wird und deshalb gegenüber visuellen Kriterien oder der Bretteigenfrequenz eine untergeordnete Rolle bei der Klassierung eines Brettes spielt.

Aufgrund der bereits sehr gering streuenden Dichteigenschaften innerhalb des Rohmaterials nimmt die Streuung der Dichten – wie aufgrund des Homogenisierungseffektes zumindest tendenziell zu erwarten war – für zunehmende Trägerhöhen nicht erkennbar ab.

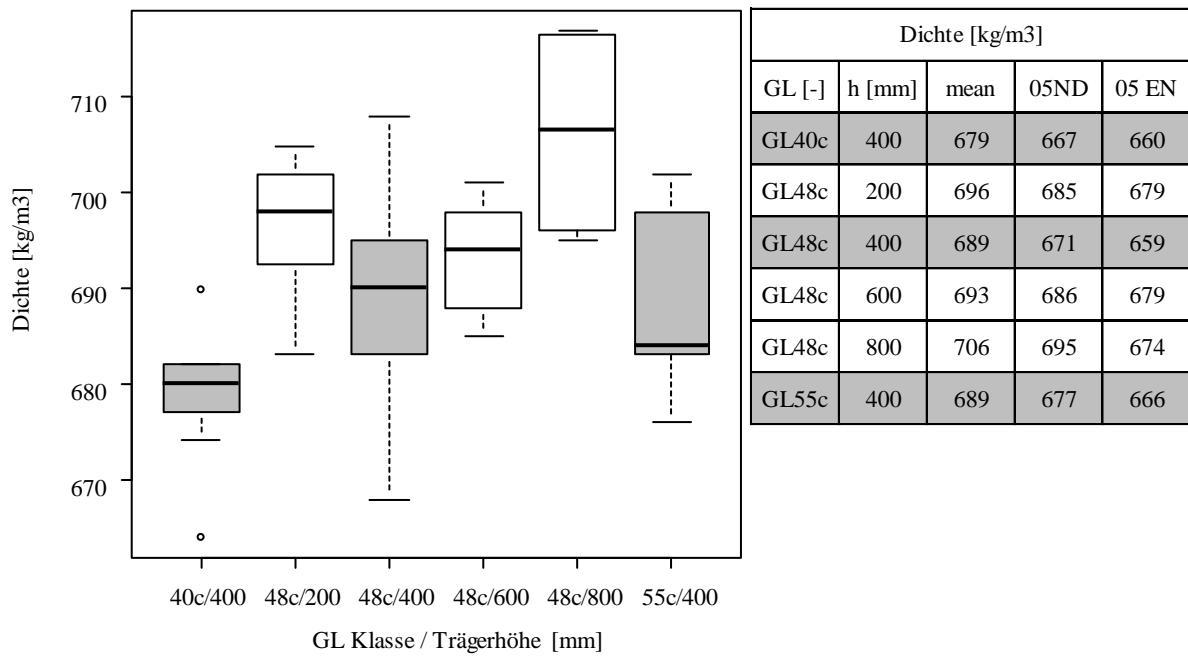


Abbildung 23: Verteilung der Dichte der Brettschichtholzträger nach Festigkeitsklasse und Trägerhöhe sowie statistische Kenndaten. Die Holzfeuchte der Träger beträgt 8%.

7.4.2 Lokaler und globaler Biege-Elastizitätsmodul

Der *lokale Biege-Elastizitätsmodul* wurde mit der Gleichung 2 gemäss EN 408 berechnet und liegt für die Träger der Festigkeitsklasse GL40c im Mittel bei 14200 MPa, für jene der Festigkeitsklasse GL48c (alle Höhen gemittelt) bei 15300 MPa und für die Festigkeitsklasse GL55c bei 16200 MPa (Abbildung 24).

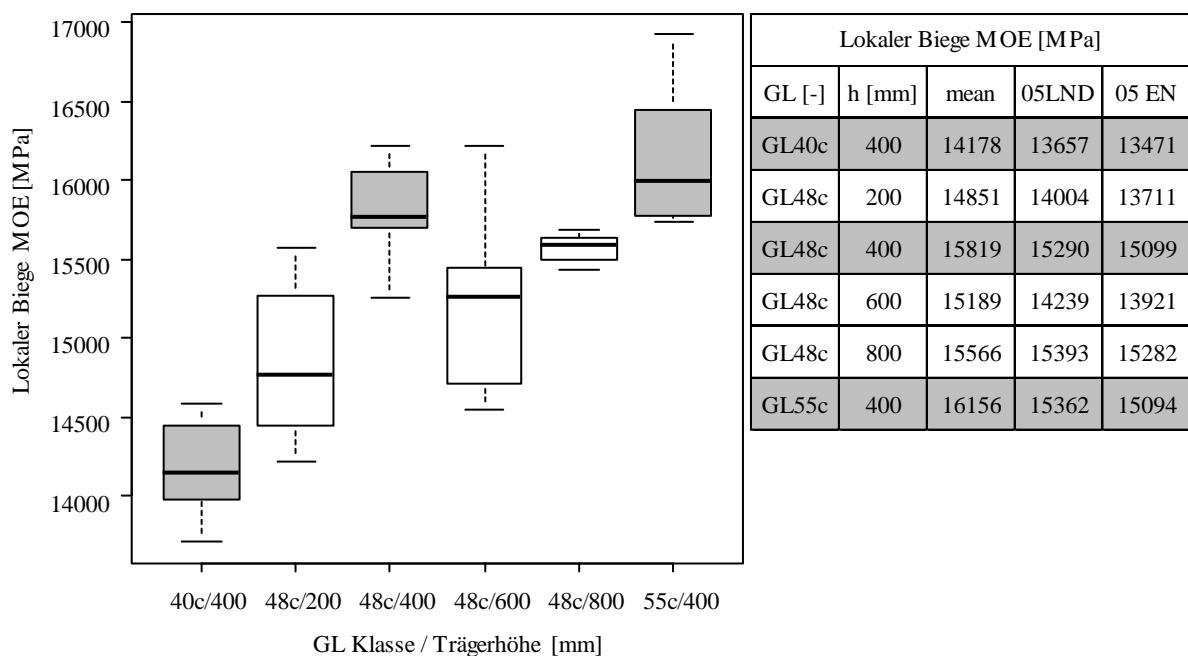


Abbildung 24: Verteilung der lokalen Biege-Elastizitätsmoduln nach Festigkeitsklasse und Trägerhöhe sowie statistische Kenndaten. Die Holzfeuchte der Träger beträgt 8%.

Dies entspricht einer Zunahme von jeweils etwa 1000 MPa zwischen den Festigkeitsklassen. Die teilweise grossen Streuungen der lokalen Biege-Elastizitätsmoduln, insbesondere für Träger der Höhen 200 mm und 600 mm der Festigkeitsklasse GL48c, lassen sich mit der Systematik der Messung erklären. Da jeweils nur ein kurzer Abschnitt der Träger mit der Länge 5 h betrachtet wird, sind für die Verformung die Steifigkeitseigenschaften sehr weniger Bretter massgebend und der Homogenisierungseffekt kommt nur in geringem Masse zur Wirkung.

$$E_{m,l} = \frac{a \cdot l_1^2 \cdot (F_2 - F_1)}{16 \cdot I \cdot (w_2 - w_1)} \quad (2)$$

$$E_{m,g} = \frac{3 \cdot a \cdot l^2 - 4 \cdot a^2}{2 \cdot b \cdot h^3 \cdot \left(2 \cdot \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6 \cdot a}{5 \cdot G \cdot b \cdot h} \right)} \quad (3)$$

Der *globale Biege-Elastizitätsmodul* wurde mit der Gleichung 3 gemäss EN 408 berechnet (Annahme: $G = \infty$) und liegt für die Träger der Festigkeitsklasse GL40c im Mittel bei 13600 MPa, für jene der Festigkeitsklasse GL48c (alle Höhen gemittelt) bei 14800 MPa und für die Festigkeitsklasse GL55c bei 15400 MPa (Abbildung 25). Da bei der Ermittlung des globalen Biege-Elastizitätsmoduls die Gesamt-Durchbiegung eines Trägers betrachtet wird, ist die Anzahl der beeinflussenden Bretter im Vergleich zum lokalen Biege-Elastizitätsmodul deutlich grösser und der Homogenisierungseffekt kommt stärker zur Geltung, resultierend in einer geringeren Streuung der Ergebnisse.

Der in der EN 384 (2016) für Nadelholz beschriebene Zusammenhang von lokalem und globalem Biege-Elastizitätsmodul lässt sich für BSH aus Buche nicht bestätigen. Die Anwendung der angegebenen Gleichung führt für sämtliche Festigkeitsklassen zu einer nicht konservativen Überschätzung des lokalen Biege-Elastizitätsmoduls von 6 bis 8%.

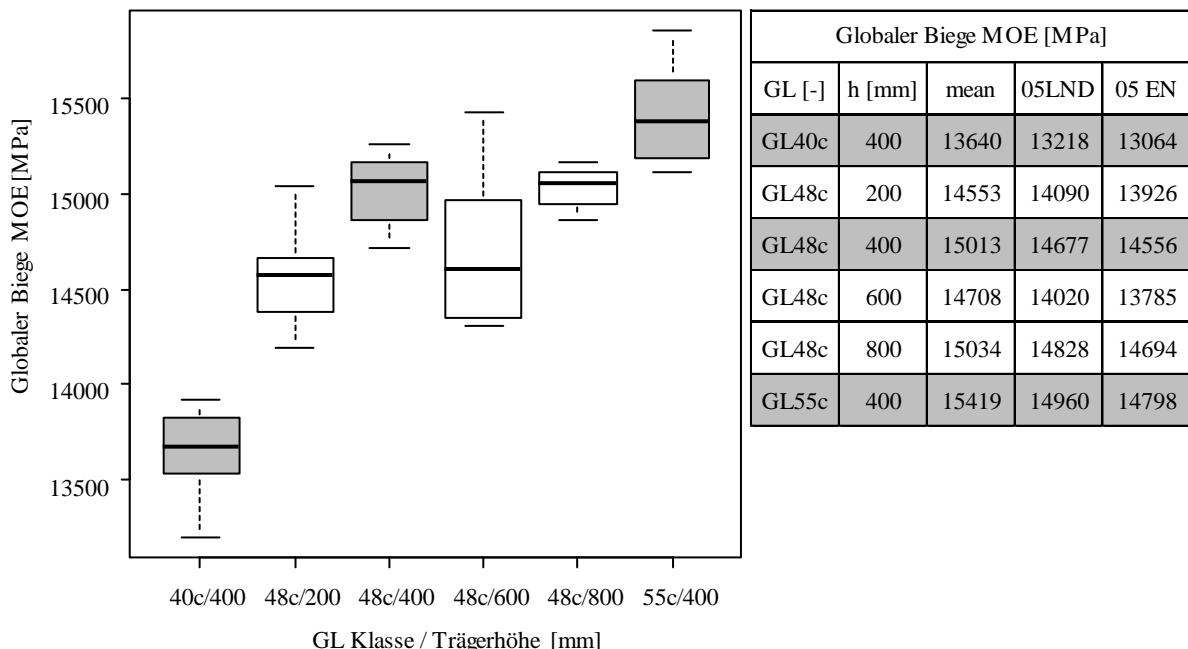


Abbildung 25: Verteilung des globalen Biege-Elastizitätsmoduls nach Festigkeitsklasse und Trägerhöhe sowie statistische Kenndaten. Die Holzfeuchte der Träger beträgt 8%.

7.4.3 Biegefestigkeit

Die Biegefestigkeit wurde mit der Gleichung 4 gemäss EN 408 berechnet. In der Abbildung 26 sind die Verteilung der Biegefestigkeit und die statistischen Kenndaten nach Festigkeitsklasse und Trägerhöhe dargestellt.

$$f_m = \frac{3 \cdot F \cdot a}{b \cdot h^2} \quad (4)$$

Werden zunächst nur die Träger der Festigkeitsklasse GL48c betrachtet, so ist eine stete Abnahme der Festigkeit mit zunehmender Trägerhöhe festzustellen, was auf einen ausgeprägten Grösseneffekt schliessen lässt. Dieser ist bedingt durch die Zunahme der Anzahl potentieller Schwachstellen im Träger.

Zwischen den verschiedenen Festigkeitsklassen (Betrachtung der grau hinterlegten Boxen) sind die Unterschiede gering. Zwar ist die geringste Festigkeit bei einem Träger der niedrigsten Festigkeitsklasse GL40c und die maximale bei einem Träger der höchsten Festigkeitsklasse GL55c ermittelt worden, die Mittelwerte und Fraktilwerte liegen allerdings auf sehr hohem Niveau nahe beieinander.

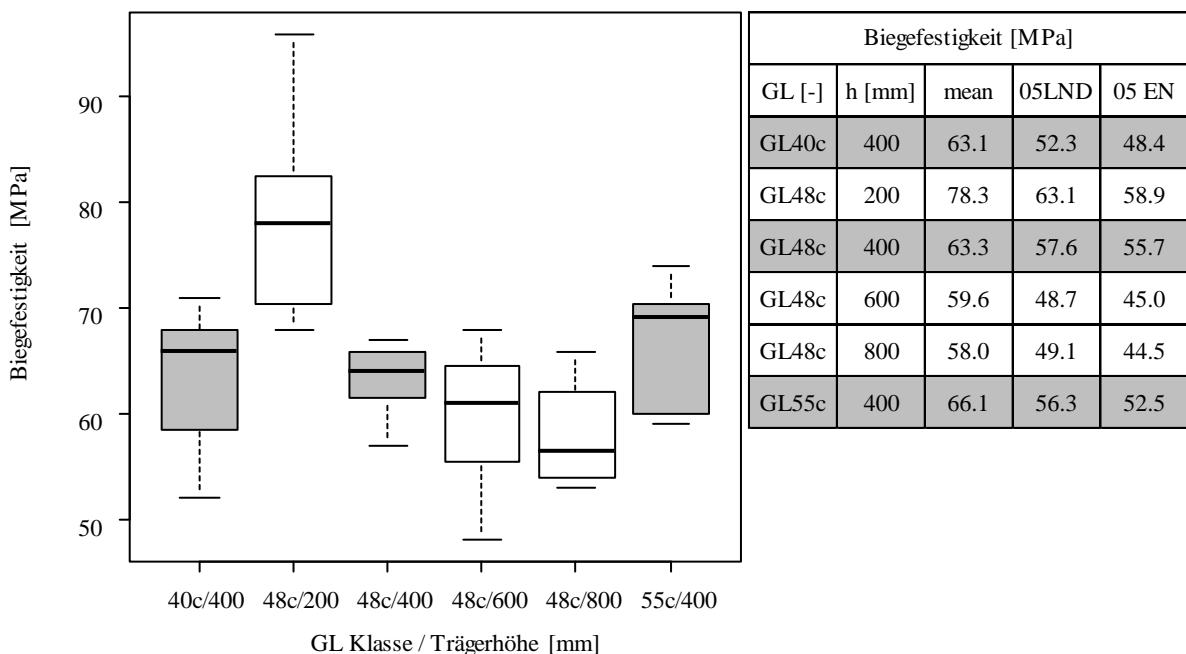


Abbildung 26: Verteilung der Biegefestigkeit nach Festigkeitsklasse und Trägerhöhe sowie statistische Kenndaten. Die Holzfeuchte der Träger beträgt 8%.

Die Anforderungen an die Biegefestigkeit in den Festigkeitsklassen GL40c und GL48c werden demnach deutlich überschritten. Auch der berechnete 5%-Fraktilwert der Festigkeitsklasse GL55c liegt mit 56,3 MPa oberhalb des definierten Wertes von 55 MPa.

7.4.4 Schubmodul

Bei den insgesamt 22 Schubfeldmessungen, 7×2 davon an Prüfkörpern der Höhe $h = 600$ mm und 4×2 an Prüfkörpern der Höhe $h = 800$ mm, wurde ein mittlerer Schubmodul von $G_v,mean = 1082$ MPa ermittelt ($COV = 5\%$, $G_{v,0.05} = 816$ MPa).

7.4.5 Bruchverhalten und Bruchbild

Das Versagen sämtlicher 4-Punkt Biegeprüförper ist als spröd zu bezeichnen. Die Steifigkeit war bis zum Versagenseintritt nahezu konstant (siehe auch Abbildung 22) und der Bruch fand – mit Ausnahme vereinzelter Knackgeräusche – ohne Vorankündigung schlagartig statt.

Als Ausgangspunkt des Bruches und damit Versagensursache konnten zum einen die Keilzinkenverbindungen in den Randlamellen identifiziert werden, wobei nur in seltenen Fällen ein reines Keilzinkenversagen vorgefunden wurde. In der Regel trat das Versagen von Keilzinken in Kombination mit einem Schubbruch entlang der Holzfasern auf (Abbildung 27, links), wobei die Grösse der Zone des Keilzinkenversagens variierte, oder in Kombination mit einem Holzbruch (Abbildung 27, rechts).



Abbildung 27: Keilzinkenversagen in der Randlamelle kombiniert mit einem Schubbruch entlang der Faser (links) und kombiniert mit Holzbruch über rd. 2/3 des Querschnittes (rechts).

Weitere häufige Versagensursache war die Schräglasigkeit in den Randlamellen. Aufgrund genereller Schräglasigkeit (Abbildung 28, links) oder lokaler Schräglasigkeit (Abbildung 28, rechts) traten in den auf Zug beanspruchten Randlamellen Schubspannungen auf, welche zu einem frühzeitigen Scherversagen entlang der Holzfasern führten. Da in Seitenbrettern die kritische Fläche der geringsten Schubfestigkeit durch die im Tangentialschnitt / Fladerschnitt als Spindeln sichtbaren Holzstrahlen angezeigt wird, konnte häufig der tatsächliche Bruchverlauf bereits vor dem Versuch vermutet werden (z.B. Abbildung 28, links).



Abbildung 28: Schubversagen in der Randlamelle entlang der Holzfasern aufgrund erhöhter genereller (links) und lokaler Schräglasigkeit (rechts).



Abbildung 29: Schubbrüche über 2/3 der Höhe (links) und bis zum Auflagerbereich (rechts) als sekundärer Bruchmechanismus nach dem Versagen der Zugrandlamelle.

Nach Eintritt des Primärversagens in den Randlamellen folgten bei sämtlichen 4-Punkt Biegeprüfungen multiple Schubbrüche über weite Teile der Trägerhöhe bzw. in Richtung der Trägerlängsachse teilweise bis zum Trägerende (Abbildung 29). Die Analyse der Schubbruchbilder ergab, dass die sekundären Schubbrüche in Seitenbrettern grösstenteils entlang der Jahrringgrenzen und in Rift- und Halbriftbrettern nahezu ausschliesslich entlang des spindelförmigen Holzstrahlenmusters verliefen.

8 Axiale Druck- und Knickversuche

8.1 Prüfaufbau, Messeinrichtung und Belastungsprotokoll

Der Prüfaufbau (Abbildung 30, links) und –Ablauf erfolgte in Anlehnung an die Prüfnorm EN 408. Die Länge der Prüfkörper betrug jeweils die 6-fache Querschnittsabmessung (900, 1200 bzw. 1680 mm). Die Prüfgeschwindigkeit betrug 0.015, 0.025 bzw. 0.035 mm/s für die Querschnittsabmessungen 150 mm, 200 mm bzw. 280 mm.



Abbildung 30: Prüfaufbau zur Bestimmung der Druckfestigkeit und des Druckelastizitätsmoduls (links) sowie beidseitig montierte Laser zur optischen Messung der Verformungen über eine Länge entsprechend der 4-fachen Querschnittsabmessung (rechts).

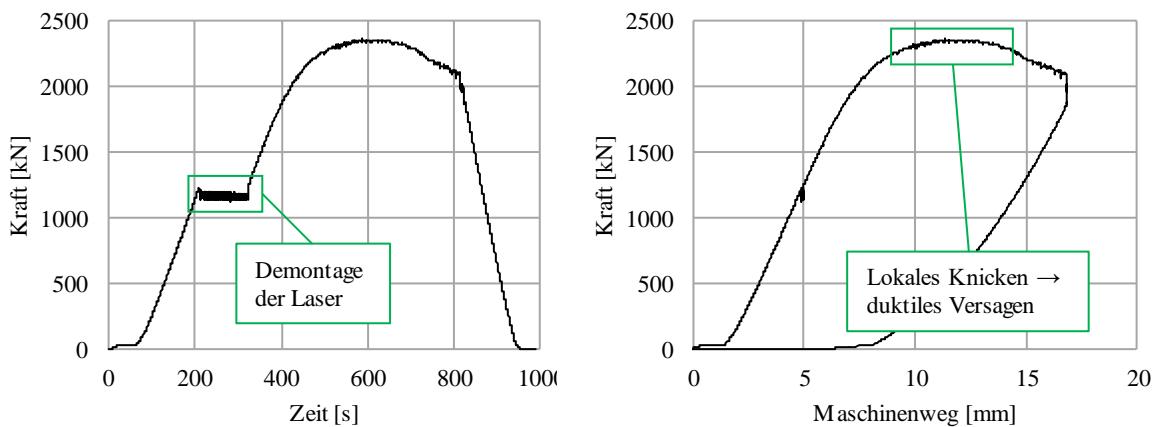


Abbildung 31: Belastungsprotokoll eines Druckversuchs (GL40h, $a = 200$ mm) im Kraft-Zeit (links) und Kraft-Weg (rechts) Format.

Zur Ermittlung des Druckelastizitätsmoduls wurde eine Messlänge der 4-fachen Querschnittsabmessung (600, 800 bzw. 1120 mm) betrachtet. Beidseitig angebrachte Laser wurden zur optischen Messung der Verformungen verwendet (Abbildung 30, rechts). Bei rund 50% der geschätzten Maximalkraft wurden die Messsysteme entfernt, um eine Beschädigung infolge Versagens des Prüfkörpers zu vermeiden.



Abbildung 32: Überblick über die insgesamt 35 Druck-Prüfkörper zur Ermittlung der Druckfestigkeit und des Druckelastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung: es wurden 3 unterschiedliche Geometrien und 3 Festigkeitsklassen getestet.

Das Verhalten der Prüfkörper der Geometrie $a = 150$ mm wurden darüber hinaus mithilfe digitaler Bildkorrelation (2D-Messung mithilfe einer konventionellen Kamera) aufgezeichnet. In Abbildung 31 ist das Belastungsprotokoll in den Formaten „Kraft-Zeit“ und „Kraft-Weg“ exemplarisch für Prüfkörper GL40h / $a = 200$ mm dargestellt.

Zusätzlich zu den Druckfestigkeitsversuchen wurden Knickversuche an schlanken Stützen mit quadratischen Querschnitten ($a = 200$ mm) und Knicklängen von 2400 mm und 3600 mm durchgeführt. Dazu wurden die Stützen mit einer planmässigen Exzentrizität von 5 bis 8 mm (entsprechend ca. 1/500) und beidseitig gelenkiger Lagerung getestet (Abbildung 33). Die Knicklängen von 2400 mm und 3600 mm ergeben sich aus den Stützenlängen von 2170 mm bzw. 3370 mm sowie einer Lagerhöhe bis zum (gelenkigen) Auflager von insgesamt 230 mm. Zur Positionierung und Einleitung der Prüfkraft wurden stirnseitig Stahlplatten verwendet, welche mittels 2 Stabdübeln und 2 selbstbohrenden Schrauben an den Prüfkörpern befestigt wurden.

Auf den der Knickrichtung zu- und abgewandten Seiten wurden auf halber Stützenhöhe jeweils zwei induktive Verformungsmessungen auf einer Länge von 600 mm durchgeführt. Auf den Seitenflächen parallel zur Knickebene wurde jeweils eine solche Messung durchgeführt. Darüber hinaus wurden die relative Gesamtverschiebung der beiden Lastplatten, sowie die horizontale Verformung der Stütze an 5 Punkten gemessen. Die Last wurde bei allen Versuchen weggesteuert aufgebracht (Belastungsgeschwindigkeit: 0.025 mm/s).



Abbildung 33: Prüfaufbau zur Bestimmung der Knicklast einer Stütze mit Knicklänge 3600 mm (links) sowie Grundplatte zur Montage und gelenkigen Lagerung (rechts, oben und unten).

8.2 Ergebnisse

Die Holzfeuchte der Druck-Prüfkörper lag in einem Bereich von 5.4 bis 9.5% und im Mittel bei 7.5% ($n = 34$, Messung per elektrischem Widerstands-Messgerät der Firma BES BOLLMANN). Werden die 5 Serien (nach Querschnittsgröße und Festigkeitsklasse) getrennt betrachtet, so lag die Holzfeuchtigkeit der Prüfkörper der Querschnittsgröße $a = 150$ mm (GL48h) mit einem Mittelwert von 8.6% deutlich über jener der anderen Serien (6.5, 6.5, 6.7 bzw. 6.9% für die Serien 200/40h, 200/48h, 200/55h bzw. 280/48h).

8.2.1 Druck-Elastizitätsmodul in Faserrichtung

Der Druckelastizitätsmodul wurde mit der Gleichung 5 gemäss EN 408 berechnet. In der Abbildung 34 sind die Verteilung der Druckelastizitätsmoduln sowie die statistischen Kenndaten nach Festigkeitsklasse und Querschnittsabmessung dargestellt.

$$E_{c,0} = \frac{l_1 \cdot (F_1 - F_2)}{A \cdot (w_2 - w_1)} \quad (5)$$

Der mittlere Druckelastizitätsmodul von Prüfkörpern der Referenzquerschnittsabmessung ($a = 200$ mm) steigt mit zunehmender Festigkeitsklasse von 15109 MPa (GL40h) auf 16036 MPa (GL48h) bzw. 17030 MPa (GL55h). Größere Querschnittsabmessungen sowie höhere Festigkeitsklassen bringen darüber hinaus geringere Streuung der Druckelastizitätsmoduln mit sich (Abbildung 34).

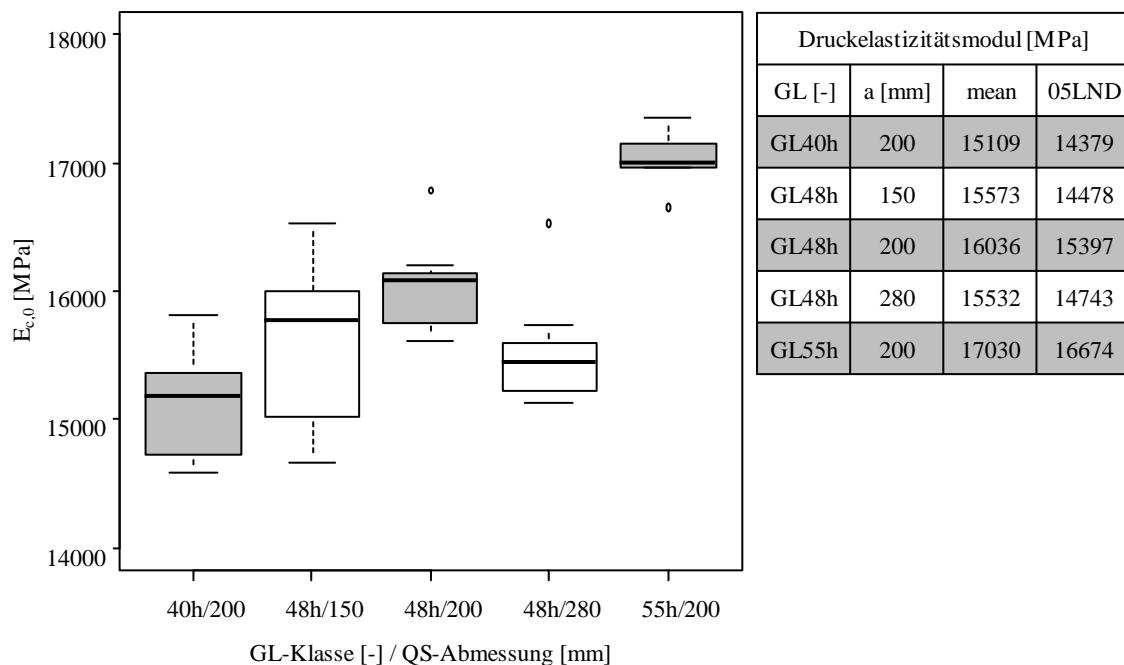


Abbildung 34: Verteilung des Druckelastizitätsmoduls nach Festigkeitsklasse und Prüfkörpergeometrie sowie statistische Kenndaten. Die Holzfeuchte der Stützen beträgt 8%.

8.2.2 Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung

Die Druckfestigkeit wurde mit Gleichung 6 gemäss EN 408 berechnet. In der Abbildung 35 sind die Verteilung der Druckfestigkeiten und die statistischen Kenndaten nach Festigkeitsklasse und Querschnittsabmessung dargestellt.

$$f_{c,0} = \frac{F_{max}}{A} \quad (6)$$

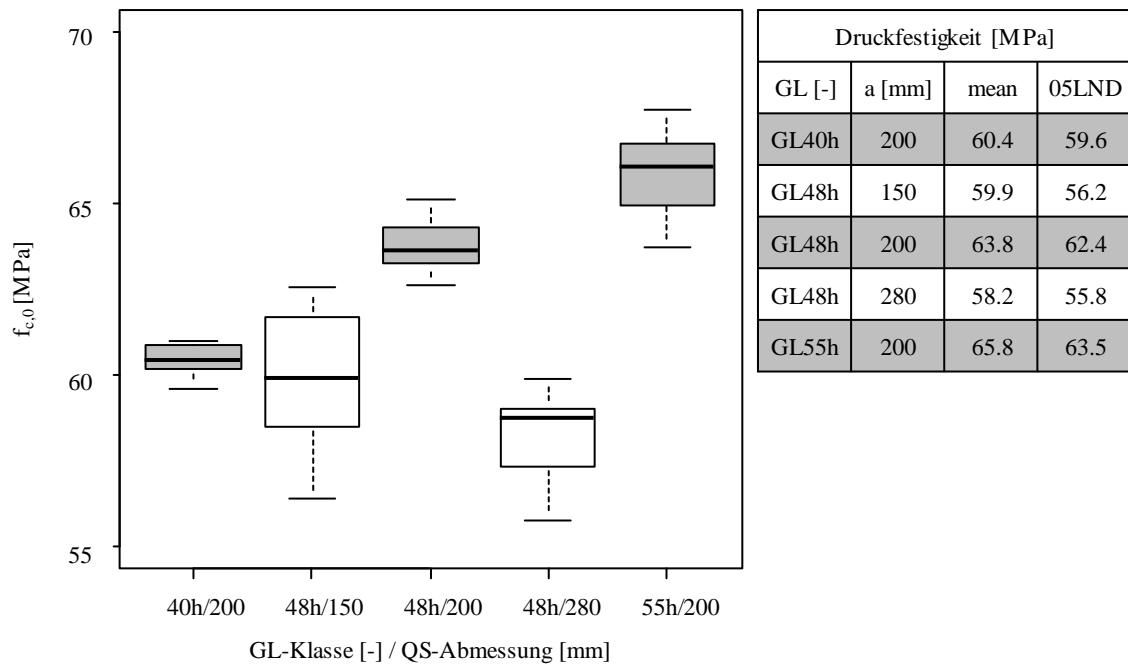


Abbildung 35: Verteilung der Druckfestigkeit nach Festigkeitsklasse und Prüfkörpergeometrie sowie statistische Kenndaten. Die Holzfeuchte der Stützen beträgt 8%.

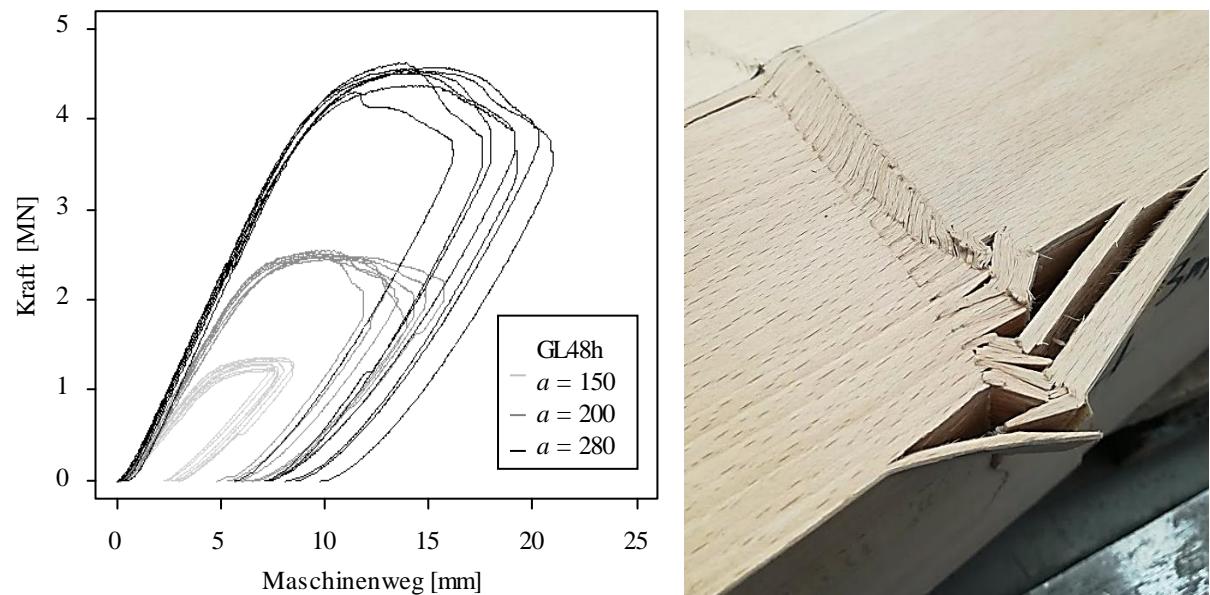


Abbildung 36: Kraft-Verformungsverhalten der Druckprüfkörper (GL48h) der Querschnitte $a = 150, 200, 280$ mm (links) und lokales Knicken im Bereich einer Keilzinkung (rechts).

Ähnlich zum Druckelastizitätsmodul steigt die mittlere Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung bei der Referenzquerschnittsabmessung ($a = 200$ mm) mit zunehmender Festigkeitsklasse von 60.4 MPa (GL40h) auf 63.8 MPa (GL48h) bzw. 65.8 MPa (GL55h) (Abbildung 35).



Abbildung 37: Prüfkörper der Festigkeitsklasse GL48h und Querschnittsabmessung $a = 200$ mm nach erfolgter Druckprüfung. Grosse Deformationen (Druckfalten) treten vor allem im Bereich von Keilzinkenverbindungen und Faserabweichungen auf und sorgen für ein duktiles Verhalten der Prüfkörper.

Neben dem generell hohen Niveau der Druckfestigkeit und der geringen Streuung der Ergebnisse ist insbesondere das duktile Versagensverhalten bemerkenswert (Abbildung 36, links). Die Ausbildung lokaler Druckfalten, insbesondere in Bereichen von Keilzinkenansammlungen (Abbildung 36, rechts), lokalen Faserablenkungen sowie Ästen führt zu einem global sehr duktilen Versagensverhalten (Abbildung 37).

8.2.3 Ergebnisse der Knickversuche

In der Abbildung 38 ist das typische Kraft-Verformungsverhalten während eines Knickversuches anhand von Messungen der Sensoren v1-6 dargestellt. Die Sensoren v1 und v2 (grün) befinden sich auf der der Knickrichtung abgewandten (Biegedruck-) Seite, die Sensoren v3 und v4 (rot) auf der (Biegezug-) Seite, in welche die Stütze aufgrund der planmässigen Exzentrizität knickt. Die Sensoren v5 und v6 befinden sich auf den parallel zur Knickebene orientierten Seitenflächen.

Es ist zu erkennen, dass zunächst der gesamte Querschnitt überdrückt ist (*Phase A*) und sämtliche Wegsensoren v1-6 Stauchungen aufzeichnen. Diese Stauchungen sind für v1 und v2 am grössten. Mit zunehmender Prüfkraft steigen die Verformungen auf der stärker druckbeanspruchten Seite (v1 und v2) überproportional an, was zu einer Erhöhung der horizontalen Auslenkung und damit zu einem steigenden Moment zweiter Ordnung führt. Die Dehnungen und Spannungen nehmen dabei auf der in Knickrichtung befindlichen Seite bis zur Erreichung der Knicklast stark ab.

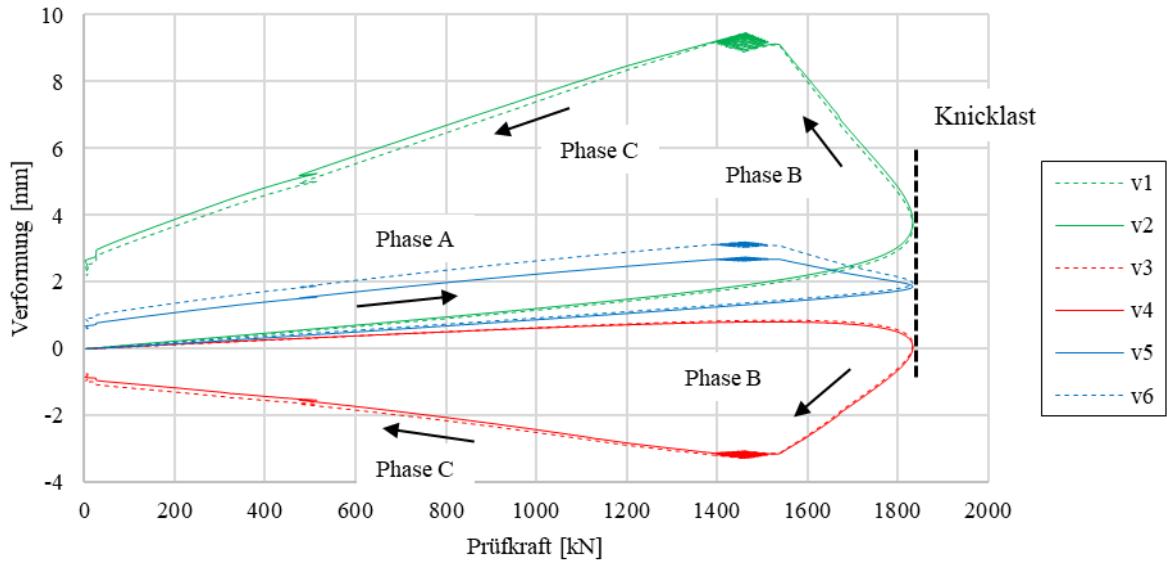


Abbildung 38: Phasen A, B und C eines typischen Knickversuches an einer Stütze mit einer Knicklänge von 2400 mm (hier Prüfkörper 2400-1).

Nach Erreichen der Knicklast sinkt die Prüfkraft bei zunehmendem Maschinenweg (*Phase B*). Dabei nimmt das Moment zweiter Ordnung stark zu, was zu Zugspannungen auf der in Knickrichtung befindlichen Seite (v3 und v4) und grossen Druckspannungen einhergehend mit der Bildung von Druckfalten (Abbildung 39) auf der gegenüberliegenden Seite (v1 und v2) führt. Nachdem die Prüfkraft auf rund 80% der Maximallast gesunken war, wurde der Prüfkörper mit einer Entlastungsgeschwindigkeit von 0.2 mm/s wieder entlastet (*Phase C*).



Abbildung 39: Druckfalten im Bereich der Biegedruckbeanspruchung von Prüfkörpern mit einer Knicklänge von 2400 mm.

Für sämtliche Prüfkörper beider Knicklängen sind in der Tabelle 7 die gemessene Exzentrizität (e_o = obere Exzentrizität, e_u = untere Exzentrizität), die Dichte, die maximale Prüfkraft sowie der Druckelastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung angegeben. Dieser wurde für sämtliche Prüfkörper mithilfe der Sensoren v5 und v6 (befindlich auf der parallel zur Knickebene orientierten Seitenflächen) in einem Lastbereich zwischen 125 und 550 kN ermittelt.

Für die Prüfkörper mit einer Knicklänge $l_{\text{knick}} = 2400$ mm wurde eine mittlere Maximallast von 1726 kN (GL40h) bzw. 1811 kN (GL48h) sowie ein mittlerer Druckelastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung von 16476 MPa bzw. 15032 MPa ermittelt. Bei den Prüfkörpern mit der grösseren Knicklänge $l_{\text{knick}} = 3600$ mm betrug die mittlere Maximallast 1150 kN (GL40h) bzw. 1221 kN (GL48h) und der mittlere Druckelastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung 14797 MPa (GL40h) bzw. 16316 MPa (GL48h).

Tabelle 7: Exzentrizität, Dichte, Knicklast und Druck-Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung der Knick-Prüfkörper.

l_{knick}	Nr.	GL	e_u	e_o	ρ_u	F_{max}	$E_{0,c}$
mm	-	-	mm	mm	kg/m ³	kN	MPa
2400	1	48h	6.5	5.8	726	1833	16828
2400	2	40h	6.5	5.8	689	1696	15176
2400	3	48h	6.5	5.8	734	1789	16448
2400	4	48h	7.5	5.8	724	1773	16448
2400	5	48h	7.0	5.8	724	1845	16326
2400	6	40h	7.3	5.8	683	1797	15592
2400	7	40h	6.8	5.8	694	1685	14328
2400	8	48h	7.5	5.8	732	1817	16330
Durchschnitt 2400, GL40h					689	1726	15032
Durchschnitt 2400, GL48h					728	1811	16476
3600	1	40h	5.5	7.5	677	1132	14231
3600	2	40h	5.0	7.5	694	1178	15796
3600	3	40h	5.3	6.5	686	1141	14364
3600	4	48h	5.3	6.5	721	1202	15861
3600	5	48h	6.5	5.5	728	1207	16131
3600	6	48h	7.0	5.8	731	1261	16828
3600	7	48h	7.0	5.3	719	1226	16351
3600	8	48h	6.8	5.5	710	1211	16410
Durchschnitt 3600, GL40h					686	1150	14797
Durchschnitt 3600, GL48h					722	1221	16316

Die Holzfeuchte der Knick-Prüfkörper lag im Bereich von 6.9 bis 8.6% und im Mittel bei 7.6% ($n = 26$, Messung mit elektrischem Widerstands-Messgerät der Firma BES BOLLMANN).

9 Schubversuche

Im Gegensatz zu Biege-, Druck-, und Zugversuchen sind Versuche zur Ermittlung der Schubfestigkeit von BSH derzeit nicht normativ geregelt. Aus diesem Grund wurde in der Projektsitzung vom 18.01.2017 die Durchführung von Schubversuchen mit drei unterschiedlichen Prüfkonfigurationen beschlossen. In den Kapiteln 9.1 (3-Punkt Biegeversuch), 9.2 (asymmetrischer 4-Punkt Biegeversuch) und 9.3 (Druckscherversuch) werden die drei verschiedenen Konfigurationen vorgestellt. Anschliessend werden im Kapitel 9.4 die Ergebnisse der Versuche einander gegenübergestellt.

Die Holzfeuchte der Schub-Prüfkörper lag im Bereich von 6.5 bis 8.5% und im Mittel bei 7.3% ($n = 68$, Messung mit elektrischem Widerstands-Messgerät H-DI 3.10 der Firma BES BOLLMANN). Zwischen den Prüfkörpern der acht Serien unterschiedlicher Festigkeitsklassen, Trägerhöhen und Prüfkonfigurationen konnte kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Holzfeuchtigkeit festgestellt werden (Mittelwerte zwischen 7.0 und 7.5%).

9.1 3-Punkt Biegeversuch

9.1.1 Prüfaufbau

Im Vergleich zu den 4-Punkt Biegeversuchen zur Ermittlung der Biegefestigkeit wurde die Spannweite im 3-Punkt Biegeversuch wesentlich reduziert. Durch die geringe Spannweite von $l_{sp} = 2.5 \times h$ soll ein Schubversagen erreicht und ein Biegezugversagen vermieden werden (Abbildung 40).

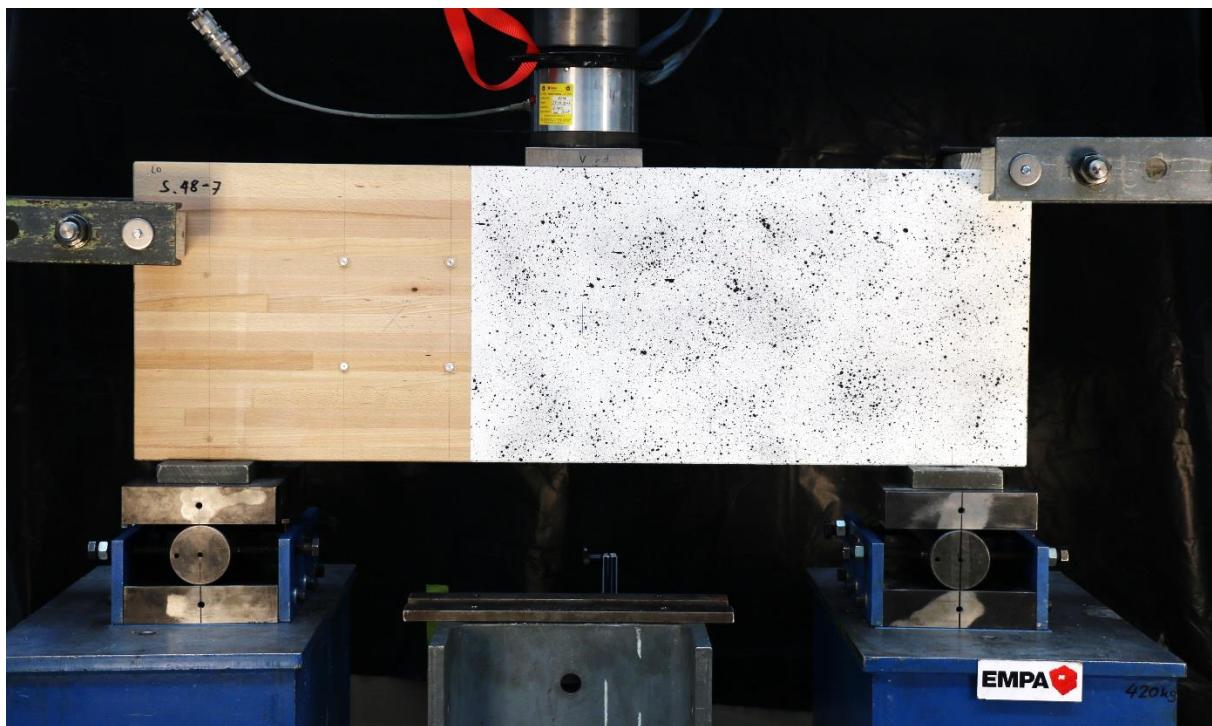


Abbildung 40: Setup zur Bestimmung der Schubfestigkeit mit einem 3-Punkt Biegeversuch ($h = 400 \text{ mm}$, $l_{sp} = 1000 \text{ mm}$).

Um ein mögliches Querdruckversagen zu vermeiden, wurden eingeklebte Gewindestangen (Prüfkörper mit $h = 400$ mm und $h = 600$ mm) bzw. Vollgewindeschrauben ($h = 200$ mm) im Bereich der Krafteinleitung und der Auflager eingebaut.

Trotz dieser Verstärkungsmassnahmen stellte sich bei nur einem der ersten vier Prüfkörper (GL48c, $h = 400$ mm) ein Schubversagen ein. Bei den drei anderen Versuchen traten grosse Eindrückungen rechtwinklig zur Faserrichtung (Abbildung 41, links) oder primäre Versagen im Biegezugbereich (Abbildung 41, rechts) auf. Diese Ergebnisse deuteten bereits auf eine (in der Versuchsplanung unterschätzte) sehr hohe Schubfestigkeit von regelmässig deutlich über 10 MPa hin.



Abbildung 41: Ungewünschte starke Eindrückungen rechtwinklig zur Faserrichtung im Bereich der Lasteinleitung trotz eingeklebter Gewindestangen (links) und unerwünschtes Biegezugversagen im Bereich einer Keilzinkenverbindung (rechts).

Um die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Schubversagens zu erhöhen, wurden deshalb die Querschnitte sämtlicher (31) verbleibender Schubprüfkörper von der rechteckigen Form auf eine I-Form (Abbildung 42) geändert. Bei nahezu unvermindertem Querdruck- und Biegetragwiderstand verringert sich durch die reduzierte Stegbreite der Schubwiderstand wesentlich, was zu überwiegendem Schubversagen führen soll. Der Grad der Reduktion der Stegbreite war dabei durch die bereits eingeklebten Gewindestangen beschränkt.

Um ein Ausknicken der Gewindestangen sowie eine Beschädigung der CNC-Maschine beim Abbund zu vermeiden, wurde eine Stegbreite von der 0.75-fachen Breite des ursprünglichen Querschnittes gewählt (z.B. $b = 160$ mm $\rightarrow b_{\text{Steg}} = 120$ mm). Die Höhe der Gurte wurde zu einem Fünftel der Gesamthöhe festgelegt (z.B. $h = 400$ mm $\rightarrow h_{\text{Gurt}} = 80$ mm).

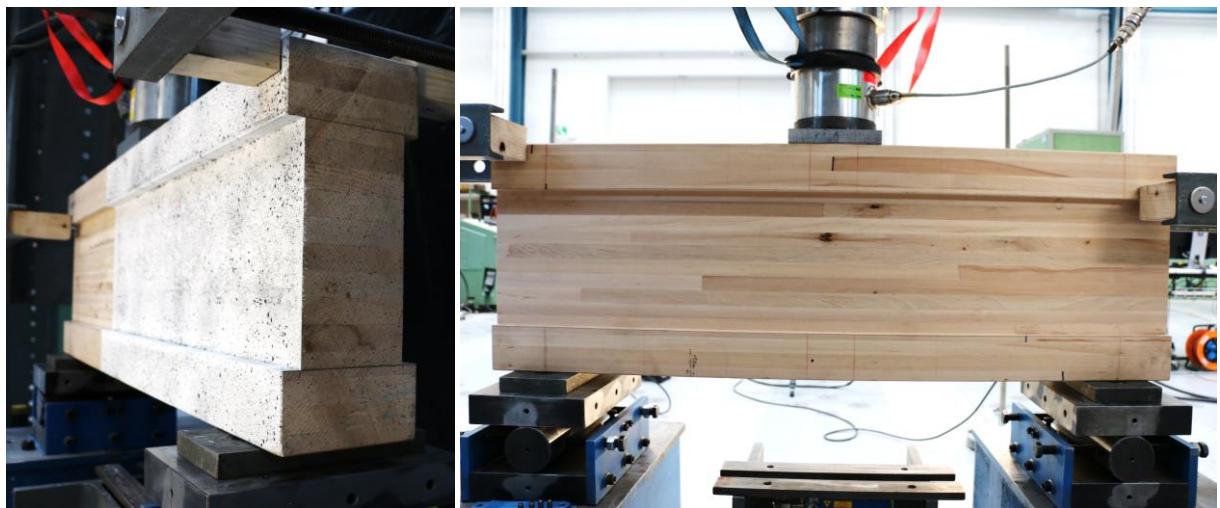


Abbildung 42: 3-Punkt Biegeprüfkörper nach erfolgtem CNC-Zuschnitt zu einem I-Profil.

9.1.2 Messeinrichtung

Die Prüfkraft wurde redundant mithilfe des Öldruckes sowie einer zwischen Prüfzylinder und Prüfkörper eingebauten Kraftmessdose bestimmt (Abbildung 43, links). Die Gesamtdurchbiegung wurde von der Unterseite mittels einem laseroptischem Messsystem (Abbildung 43, rechts) sowie von oben über den Zylinderweg (LVDT) gemessen.

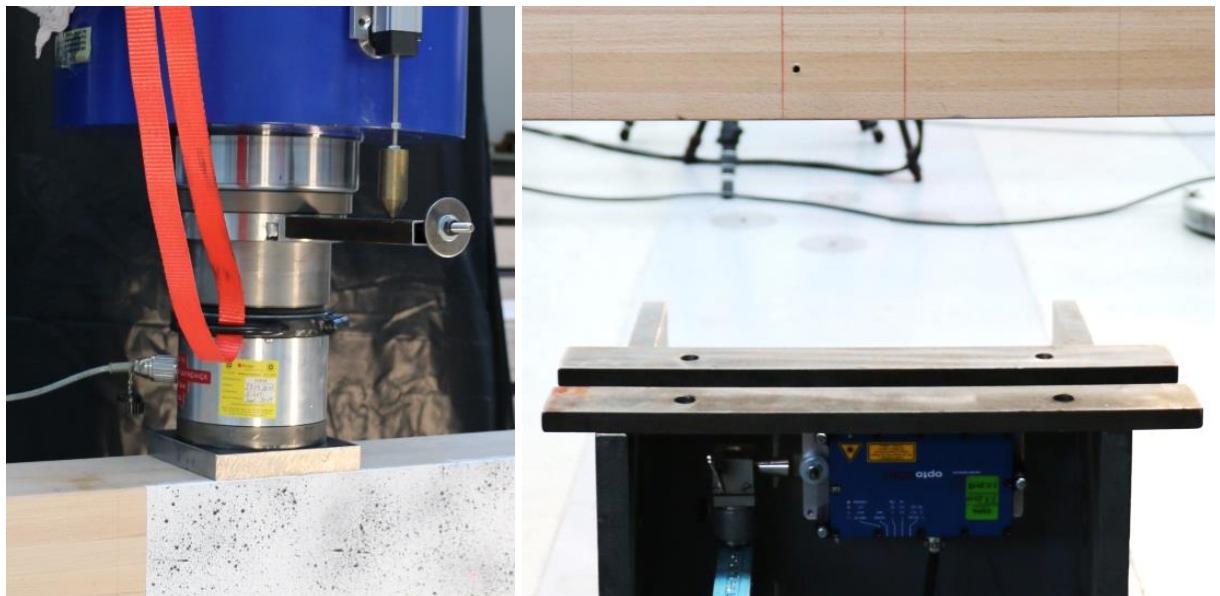


Abbildung 43: Prüfzylinder samt LVDT zur Bestimmung des Maschinenwegs und Kraftmessdose zur redundanten Bestimmung der Prüfkraft (links) sowie laseroptisches Messsystem zur Bestimmung der Gesamtdurchbiegung (rechts).

9.1.3 Belastungsprotokoll

Der Versuch wurde Weggesteuert mit konstanter ($v = 0.03 \text{ mm/s}$) durchgeführt. Bei ca. 40% der geschätzten Bruchlast wurden die laseroptischen Wegsensoren entfernt und die Verschieblichkeit der Auflager geändert (Abbildung 44), Begründung: siehe 7.3, Phase 7.

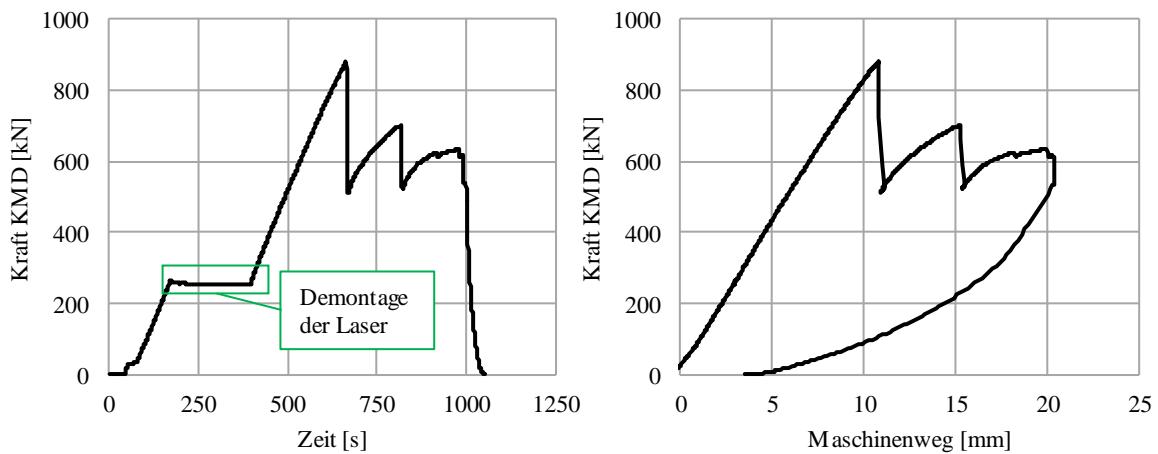


Abbildung 44: Belastungsprotokoll eines 3-Punkt Biegeversuchs zur Ermittlung der Schubfestigkeit (GL48c, $h = 400$ mm, PK 1) im Kraft-Zeit (links) und Kraft-Weg (rechts) Format.

9.2 Asymmetrischer 4-Punkt Biegeversuch

9.2.1 Prüfaufbau

Mit dem Ziel, die Prüflänge mit ungestörter Schubspannungsausbreitung im Vergleich zu den 3-Punkt Biegeprüfungen zu vergrössern und damit den Einfluss unerwünschter Querdruckspannungen auf die ermittelte Schubfestigkeit und den Schubmodul zu reduzieren, wurde ein neuer Prüfaufbau entwickelt.

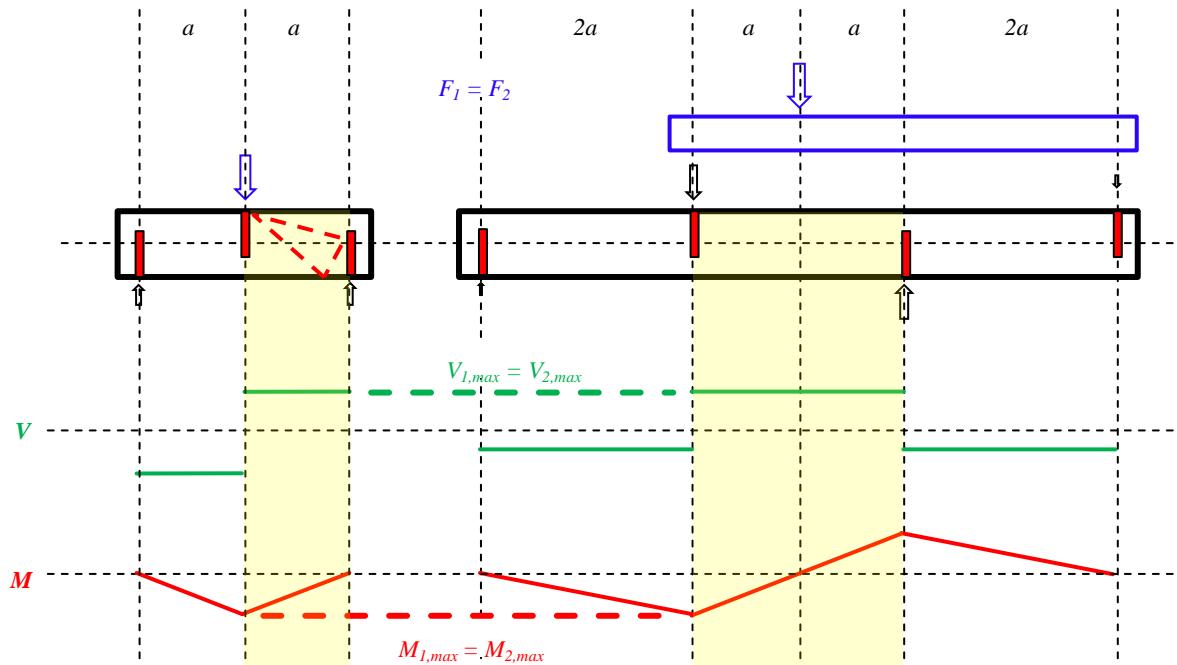


Abbildung 45: Vergleich der 3-Punkt (links) und asymmetrischen 4-Punkt Biegeversuche (rechts): Bei identischer Querkraft und Biegemoment kann die „unbeeinflusste“ Schubprüflänge im 4-Punkt Biegeversuch verdoppelt werden, und damit der Einfluss von Querdruck und Auflagerverstärkungen auf das Prüfergebnis reduziert werden.

Das Konzept des entwickelten asymmetrischen 4-Punkt Biegeversuchs ist in der Abbildung 45 (rechts) erkennbar. Bei gleicher Querkraftbeanspruchung im Vergleich zum 3-Punkt Biegeversuch kann der Bereich der ungestörten Schubbeanspruchung verdoppelt werden, ohne dass das maximale Biegemoment, welches zu unerwünschten Biegezugbrüchen führen kann, erhöht wird. Damit lässt sich der Einfluss von Querdruckspannungen, sowie der Einfluss der Verstärkungsmassnahmen im Auflager- und Krafteinleitungsbereich auf die ermittelte Schubfestigkeit wesentlich reduzieren.

9.2.2 Messeinrichtung

Bei sämtlichen asymmetrischen 4-Punkt Biegeprüfungen wurden mittels analoger Messuhren die Verformungen des Trägers an der Trägerunterseite an den beiden Punkten der Lasteinleitung gemessen. Ebenfalls wurden auf der Trägervorderseite und -rückseite jeweils mittig zwischen den Last- und Auflagerpunkten Schubfeldmessungen mittels Deformeterbolzen durchgeführt ($2 \times 3 = 6$ Messungen je Träger, Abbildung 46).

Bei 2 der insgesamt 7 Prüfkörper wurden darüber hinaus digitale Bildkorrelationsmessungen (DIC) im Trägerbereich symmetrisch um den Punkt der grösseren Krafteinleitung durchgeführt (Abbildung 46). Diese sollen es ermöglichen, ein vertieftes Verständnis für die Verteilung der Spannungen während der Prüfung zu erhalten und mögliche Spannungsinteraktionen von Querzug bzw. Querdruck und Schub zu detektieren.

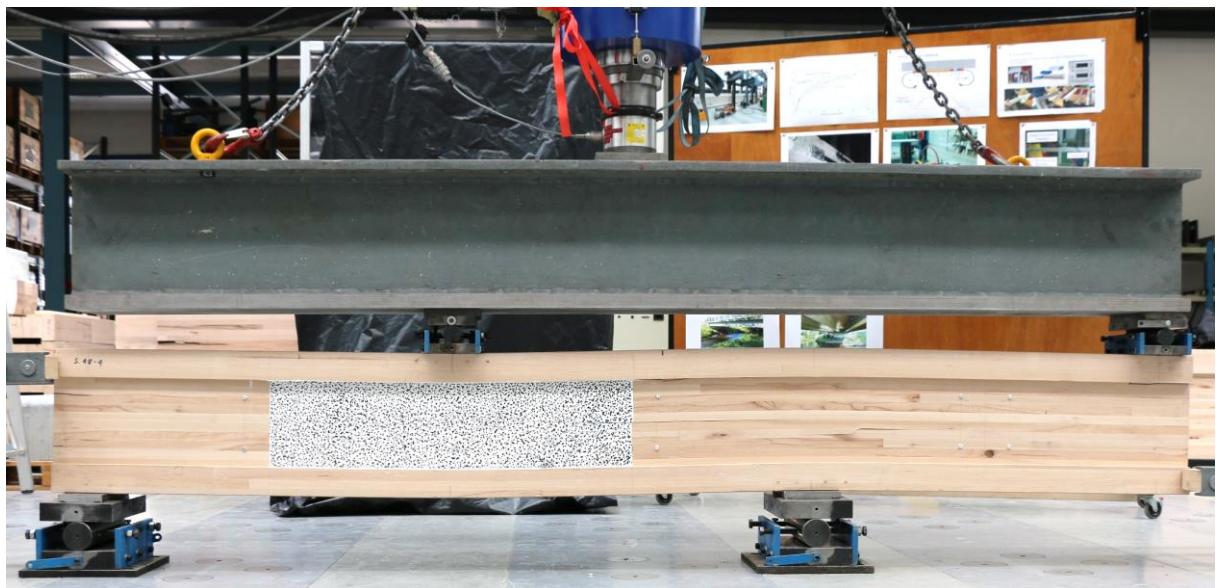


Abbildung 46: Asymmetrischer 4-Punkt Biegeversuch kurz vor Erreichen der Bruchlast. Das stochastische Muster zur Analyse der Spannungsverteilung mittels digitaler Bildkorrelation sowie die Deformeterbolzen zur Messung des Schubfeldes sind erkennbar.

9.2.3 Belastungsprotokoll

Sämtliche Versuche wurden weggesteuert mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von zunächst 0.02 mm/s (erster Prüfkörper) bzw. 0.04 mm/s durchgeführt. Bei einer Prüfkraft von ca. 10 und 40% der geschätzten Bruchlast wurde der Versuch gestoppt, um Messungen der Schubfelder mittels Deformeter durchzuführen. Bei 40% der geschätzten Bruchlast wurde darüber hinaus die horizontale Verschieblichkeit der Auflager gewechselt, Begründung: siehe 7.3, Phase 7.

9.3 Druckscherversuch in Anlehnung an die EN 408

9.3.1 Prüfaufbau

Die insgesamt 6 Prüfkörper für die Druckscherversuche wurden aus (augenscheinlich) unbeschädigten Abschnitten der 4-Punkt Biegeprüfkörper ($h = 200$ mm, $b = 120$ mm) gefertigt. Die Versuche wurden in Anlehnung an die EN 408 durchgeführt. Dabei wurden die Prüfkörperabmessungen so gewählt dass sich ein Kraft- zur Faser-Winkel von 14° und eine resultierende Prüflänge von 520 mm ergaben (Abbildung 47).

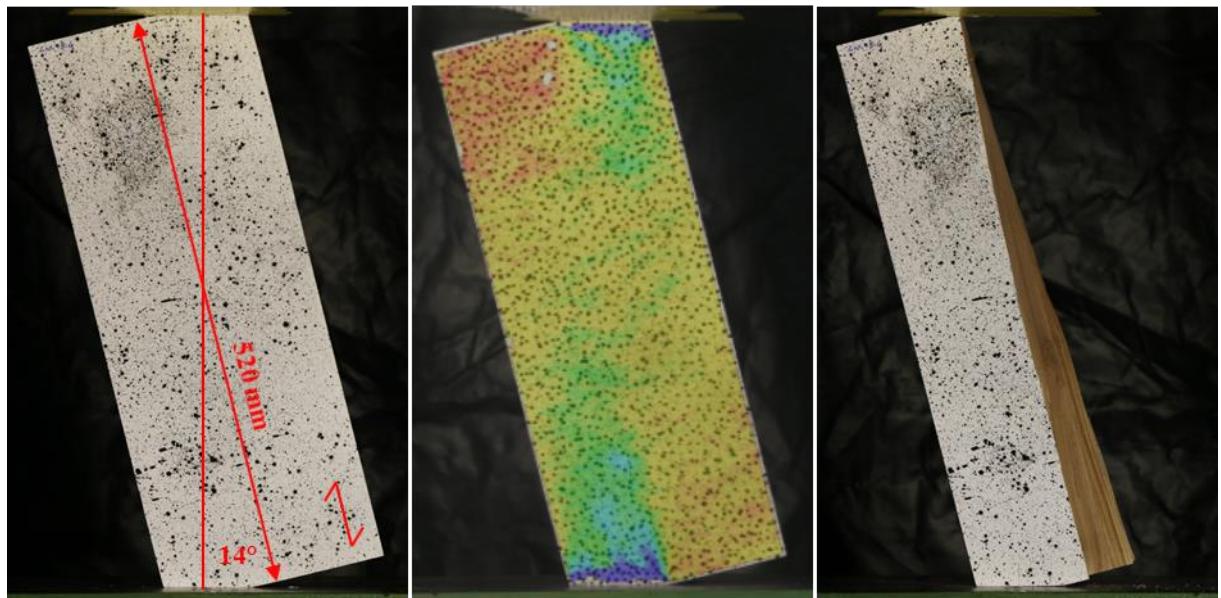


Abbildung 47: Druckscher-Prüfkörper in Anlehnung an die EN 408 zur Bestimmung der Schubfestigkeit und des Schubmoduls: Prüfkörper vor dem Versagen (links), Dehnungsverteilung ε_{xx} kurz vor dem Versagen (parallel zur Faserrichtung, Mitte) sowie Prüfkörper nach dem Versagen (rechts).

9.3.2 Messeinrichtung

Sämtliche Druckscher-Versuche wurden fotografisch dokumentiert, um – basierend auf einer Auswertung des aufgebrachten stochastischen Musters – eine Bildkorrelationsanalyse zu ermöglichen (z.B. Abbildung 47, Mitte). Zur Verifizierung der Ergebnisse dieser optischen Messungen wurde bei 3 der 6 Prüfkörper zusätzlich auf der Rückseite eine Messung der Relativverschiebung der beiden Innenlagen ($t = 50$ mm) auf halber Höhe des Prüfkörpers mittels LVDT durchgeführt.

9.3.3 Belastungsprotokoll

Die Prüfung wurde weggesteuert mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von 0.01 mm/s durchgeführt (Abbildung 48). Zur Demontage der Messgeräte wurden die Versuche mit LVDT-Messung bei einer Last von 250 kN gestoppt.

Nur bei 2 der insgesamt 6 Druckscher-Prüfkörper konnte ein Scherversagen erreicht werden. Bei den anderen 4 Prüfkörpern kam es bei Lasten von ca. 550 kN (bzw. $\tau_v = 8.6$ MPa) zu grossen Deformationen im Krafteinleitungsbereich, worauf die Versuche jeweils abgebrochen werden mussten, ohne dass ein Scherversagen erreicht werden konnte (Abbildung 48).

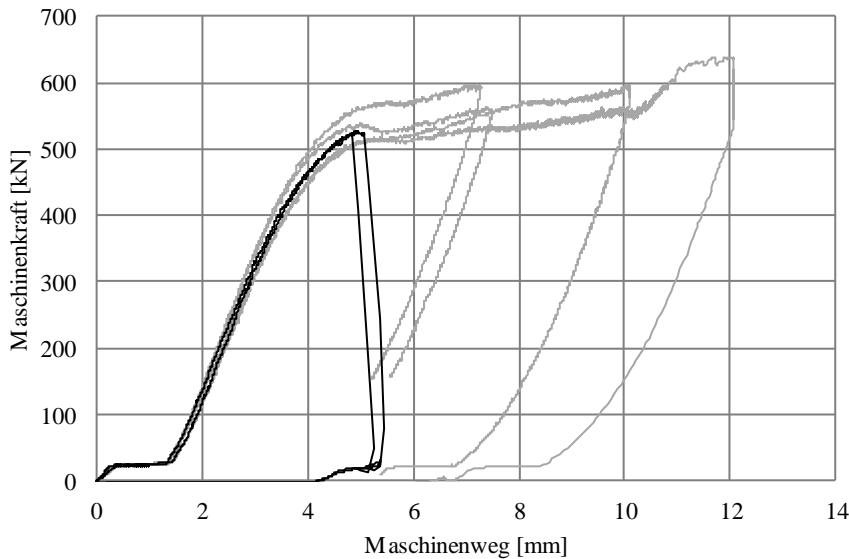


Abbildung 48: Belastungsprotokolle der 6 Druckscher-Prüfungen im Kraft-Weg Format. Lediglich bei 2 Prüfkörpern konnte ein Scherversagen erreicht werden (schwarz). Bei den verbleibenden 4 Prüfkörpern musste der Versuch aufgrund grosser Druckverformungen im Bereich der Lasteinleitung abgebrochen werden (grau).

9.4 Gegenübergestellte Ergebnisse der Schubversuche

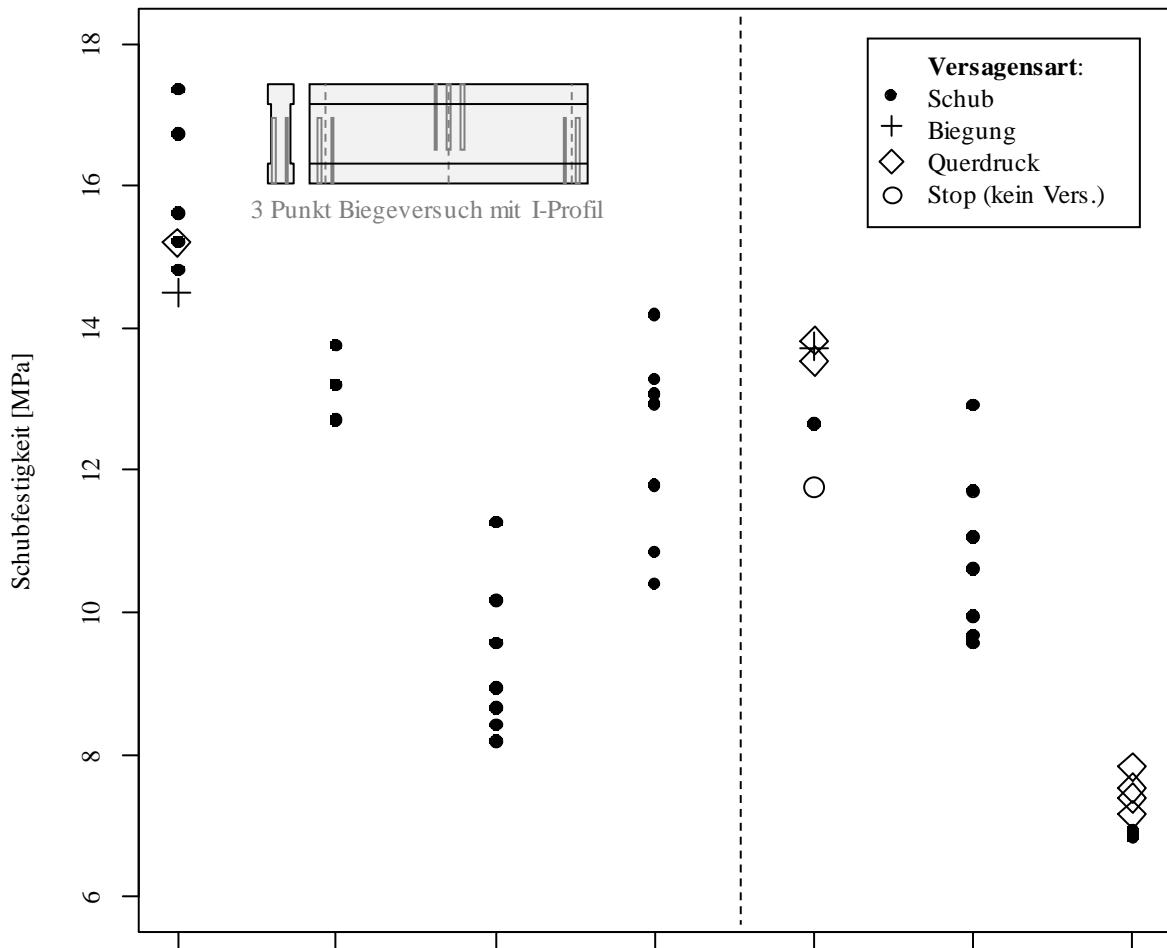
An dieser Stelle werden die Ergebnisse der drei verschiedenen Schubversuche einander gegenübergestellt. Da die ermittelten Schubfestigkeiten von der Prüfkonfiguration beeinflusst sind, werden die hier wiedergegebenen Schubfestigkeiten explizit als vorläufige Werte τ_{v*} bezeichnet. Die maximalen Schubspannungen wurden für die 3- und 4-Punkt Biegeversuche mit der Gleichung 7 berechnet. Für die Berechnung der maximalen Schubspannung in den Druckscherversuchen wurde die Gleichung 8 herangezogen. Trat bei den Prüfungen kein Schub- sondern ein Biegezug- oder ein Querdruckversagen auf, so wurde dies bei der Auswertung bzw. bei der Ermittlung der Schubspannungen berücksichtigt, indem von einem sogenannten Censored Data Set ausgegangen wurde.

$$\tau_{v,max}^* = \frac{V_{max} \cdot S_y(z)}{I_y \cdot b(z)} \quad (7)$$

$$\tau_{v,max}^* = \frac{F_{max} \cdot \cos(14)}{l \cdot b} \quad (8)$$

Die mit den drei unterschiedlichen Prüfkonfigurationen ermittelten Schubfestigkeiten sind in der Abbildung 49 einander gegenüber gestellt. Die Einflüsse der Prüfkonfiguration sowie des Prüfkörper-Volumens (Vergleich Type = 3PB, GL48c, $h = 200 / 400 / 600$ mm) sind dabei deutlich erkennbar.

Mit dem Index «cd» gekennzeichnete Werte wurden mittels einer Censored Data Analysis ermittelt und berücksichtigen eine von der Versagensform «Schub» abweichende Bruchursache wie Biegezug- oder Querdruckversagen.



Serie	1	2	3	4	5	6	7	
Typ	3P	3P	3P	3P	3P	4P	EN408	
GL	48c	48c	48c	55c	48c	48c	48c	
QS	I	I	I	I	R	I	R	
h	200	400	600	400	400	400	200	
n_{tot}	7	3	7	7	5	7	6	
n_{shear}	5	3	7	7	1	7	2	
$f_{v,\text{mean}}$	16.0	13.2	9.3	12.4	12.7	10.8	6.9	
$f_{v,\text{mean,cd}}$	16.0	-	-	-	14.7	-	7.8	
$f_{v,0.05}$	14.3	12.4	7.6	10.2	-	8.9	-	
$f_{v,0.05,\text{cd}}$	14.6	-	-	-	12.3	-	6.6	
COV	0.07	0.04	0.12	0.11	0.10	0.11	0.10	

Abbildung 49: Mit unterschiedlichen Prüfkonfigurationen (3PB, 4PB, EN408) ermittelte Schubfestigkeiten verschiedener Festigkeitsklassen (GL48, GL55), Querschnittshöhen ($h = 200 / 400 / 600 \text{ mm}$) und Profiltypen (i...I-Querschnitt, r...Rechteckquerschnitt).

10 Zugversuche an Lamellenbündeln

10.1 Prüfaufbau, Messeinrichtung und Belastungsprotokoll

Jeweils sieben Lamellenbündel der Festigkeitsklassen T33, T42 und T50 mit einem Querschnitt von $160 \times 75 \text{ mm}^2$ (drei verklebte Bretter in Dickenrichtung) wurden einer

Zugprüfung unterzogen. Die freie Prüflänge entsprach mit 3540 mm ca. der Länge des maximalbelasteten Abschnittes zwischen den Lasteinleitungspunkten der 4-Punkt Biegeprüfungen mit einer Höhe von 600 mm ($6 \times 600 = 3600$ mm).

Der Prüfaufbau und die verwendete Messeinrichtung entsprechen denjenigen der Zugprüfungen an Einzelbrettern und sind im Technischen Schlussbericht zu Modul 2 (Steiger & Ehrhart, 2016) detailliert beschrieben. In der Abbildung 50 sind der Querschnitt und der Einspannbereich (links) der Prüfkörper sowie das Messsystem zur Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls (rechts) abgebildet.

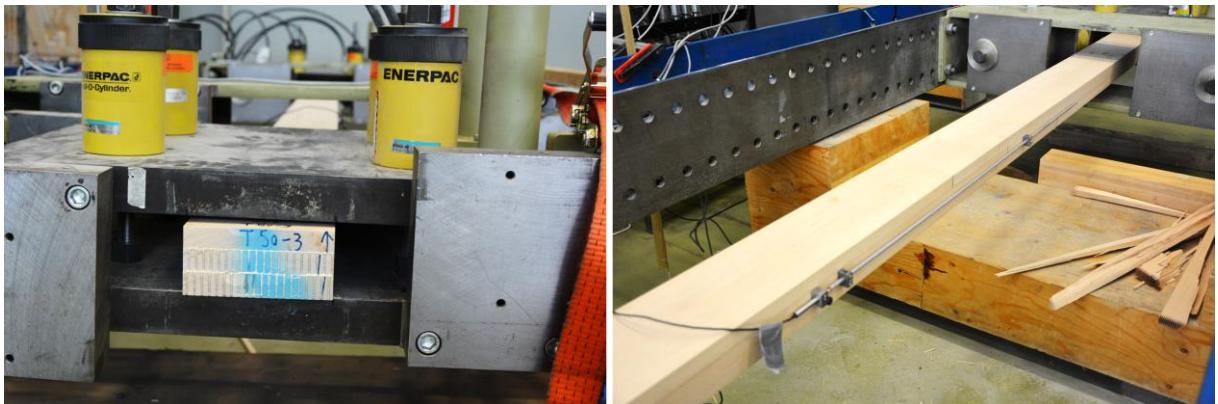


Abbildung 50: Einspannbereich der 3-schichtigen Lamellenbündel (Festigkeitsklasse T50, links) und Messeinrichtung mit LVDTs zur Bestimmung des statischen Zug-Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung (rechts).

Die Zugfestigkeit wurde mit der Gleichung 9, der Zugelastizitätsmodul mit der Gleichung 10 berechnet. In der Gleichung 10 bezeichnet der Index «1» die Kraft F bzw. die Verformung w bei ca. 10% der Bruchlast, der Index «2» bezeichnet die Kraft und Verformung bei ca. 40% der Bruchlast. Die Messlänge l_{mess} betrug $5 \times 160 = 800$ mm.

$$f_{t,0} = \frac{F_{max}}{A} \quad (9)$$

$$E_{t,0} = \frac{l_{mess} \cdot (F_2 - F_1)}{A \cdot (w_2 - w_1)} \quad (10)$$

10.2 Ergebnisse

In der Tabelle 8 sind die Mittelwerte, 5%-Fraktilwerte und Variationskoeffizienten der ermittelten Zugfestigkeit, des Elastizitätsmoduls und der Rohdichte zusammengestellt. Die charakteristischen Werte der Zugfestigkeit der Festigkeitsklassen T33, T42 und T50 übersteigen mit 36.6, 44.3 und 52.9 MPa die definierten (namensgebenden) Fraktilwerte der jeweiligen Festigkeitsklassen. Der mittlere Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung der Festigkeitsklasse T42 liegt mit 15493 MPa nur wenig höher als jener der Festigkeitsklasse T33 mit 15245 MPa. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Biegeversuche (Kapitel 7.4.2, GL48c: 15300 MPa / GL40c: 14200 MPa) ist der ermittelte Wert für die Festigkeitsklasse T33 als überdurchschnittlich hoch, jener der T42 Prüfkörper als repräsentativ zu bezeichnen. Der mittlere Elastizitätsmodul der Festigkeitsklasse T50 liegt mit 16967 MPa deutlich darüber (GL50c: 16200 MPa).

Tabelle 8: Anzahl und mechanische Eigenschaften der Zugprüfkörper.

Klasse	n	Zugfestigkeit $f_{t,0}$			Elastizitätsmodul $E_{t,0}$			Rohdichte ρ_s		
		mean	05Ind	cov	mean	05Ind	cov	mean	05Ind	cov
-	-	MPa	MPa	%	MPa	MPa	%	kg/m ³	kg/m ³	%
T33	7	43.7	36.6	10.4	15245	13867	5.7	701	669	2.7
T42	7	53.3	44.3	10.9	15493	14696	3.2	697	664	2.9
T50	7	57.7	52.9	5.1	16967	16256	2.6	715	694	1.8

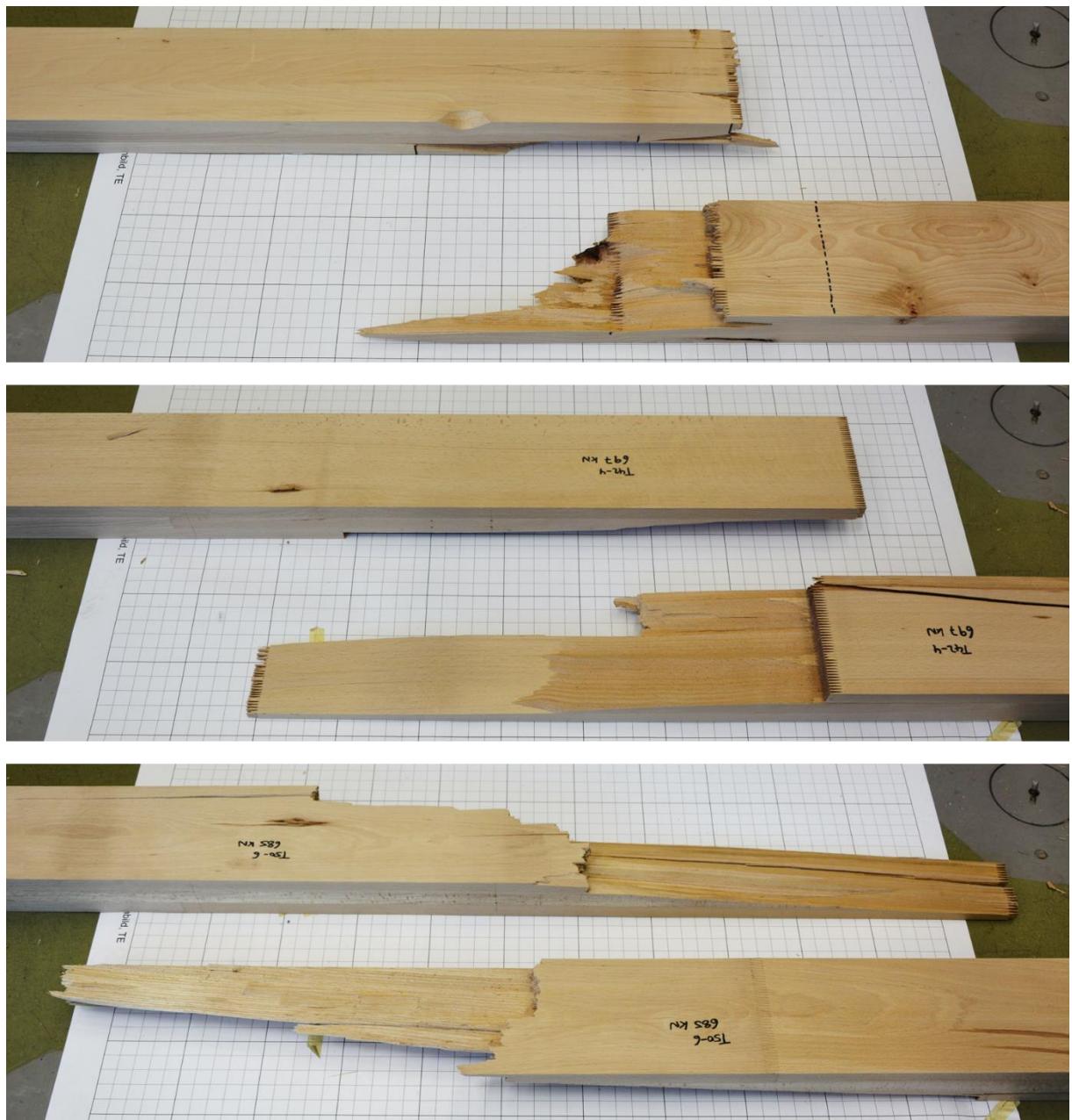


Abbildung 51: Bruchbilder der Zugprüfkörper T33-1 (42.4 MPa, oben), T42-1 (58.1 MPa, Mitte) und T50-6 (57.1 MPa, unten).

Als Bruchursache wurde in nahezu allen Fällen ein Keilzinkenversagen bzw. das Versagen mehrerer Keilzinkenverbindungen festgestellt (Abbildung 51). In der Regel traten diese Brüche in Kombination mit Schubbrüchen entlang der Fasern / Holzstrahlen auf und erstreckten sich über einige Dezimeter und bis zu ca. 1.5 m Länge, wobei gleichzeitig mehrere Keilzinkenverbindungen zum Gesamtversagen beitrugen.

Die Holzfeuchtigkeit der geprüften Lamellenbündel lag in einem Bereich von 7.0 bis 9.3% und im Mittel bei 8.2% ($n = 24$, Messung mit elektrischem Widerstands-Messgerät der Firma BES BOLLMANN). Zwischen den unterschiedlichen Serien wurden hinsichtlich Holzfeuchtigkeit keine signifikanten Unterschiede festgestellt.

11 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse aus Modul 4

In Modul 4 des AP-Holz Projektes wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften von Buchen-BSH durchgeführt. Ausführliche Informationen finden sich in diesem Bericht wie folgt: zum verwendeten Rohmaterial (Kapitel 5), zur Produktion der Buchen-BSH Prüfkörper (Kapitel 6), sowie zur Methodik und den detaillierten Ergebnissen der Biege- (Kapitel 7), Druck- und Knick- (Kapitel 8), Schub- (Kapitel 9) sowie zu den Zugversuchen (Kapitel 10).

Tabelle 9: Zusammenfassung der Resultate der experimentellen Untersuchungen.

		GL40		GL48		GL55	
		c	h	c	h	c	h
Biegefest. $f_{m,g}$	n -	7		25		7	
	mean MPa	63.1		78.3 - 58.0		66.1	
	05ln MPa	52.3		63.1 - 49.1		56.3	
Biege-MOE $E_{m,g}$	n -	7		21		7	
	mean GPa	14.2		15.4		16.2	
	05ln GPa	13.7		14.7		15.4	
Druckfest. $f_{c,0}$	n -		7		21		7
	mean MPa		60.4		60.6		65.8
	05Ind MPa		59.6		58.1		63.5
Druck-MOE $E_{c,0}$	n -		7		21		7
	mean GPa		15.1		15.7		17.0
	05ln GPa		14.4		14.9		16.7
Schubfest. $f_{v,g}$	n -			35		7	
	mean MPa			10.8 - 16.0		12.4	
	05ln MPa			8.9 - 14.3		10.2	
Schub-Modul $G_{v,g}$	n -			22			
	mean GPa			1.08			
	05ln GPa			0.82			
Zugfest. $f_{t,0}$	n -		7		7		7
	mean MPa		43.7		53.3		57.7
	05ln MPa		36.6		44.3		52.9
Zug-MOE $E_{t,0}$	n -		7		7		7
	mean GPa		15.2		15.5		17.0
	05ln GPa		13.9		14.7		16.3

In der Tabelle 9 sind die Ergebnisse der experimentellen Versuche zusammenfassend dargestellt. Es ist jeweils die Anzahl der Versuche (n), der Mittelwert (mean) sowie der 5%-Fraktilwert unter Annahme einer Lognormalverteilung (05ln) angeführt. Insbesondere die Biegefestigkeit $f_{m,g}$ (Kapitel 7) hängt stark von der Prüfkörperabmessung ab, weshalb ein Bereich der Mittel- und Fraktilwerte für Querschnittshöhen von 200 bis 800 mm angegeben wird. Aufgrund des grossen Einflusses der Prüfkonfiguration und des geprüften Volumens auf die Schubfestigkeit $f_{v,g}$, (Kapitel 9) wird auch hier ein Bereich angegeben.

12 Deliverables in Modul 4

Im Januar 2018 wurde ein Journal Paper (Ehrhart et al., 2017a) veröffentlicht, in welchem ein neu entwickeltes Verfahren zur Erkennung und Dokumentation der für die zuverlässige Festigkeitssortierung wichtigen Faserorientierung in Buchenholz vorgestellt wird.

Im Rahmen einer „Note“ wurde dieses Verfahren auch beim *4th Meeting of the International Network on Timber Engineering Research INTER* (Ehrhart et al., 2017b) präsentiert und diskutiert.

Im Januar 2018 wurden die Projektergebnisse im Rahmen des Ausbildungstages der Holzindustrie Schweiz (HIS) an der ETH Zürich zahlreichen Praktikern der Schweizerischen Holzbranche präsentiert und angeregt diskutiert.

Im Frühlingssemester 2018 wurde durch D. Werlen eine Masterarbeit mit Konnex zum BAFU-Projekt an der ETH verfasst. Diese beschäftigte sich mit der „Modellierung des Biegetragverhaltens von Brettschichtholz aus Buche“.

An der *World Conference on Timber Engineering WCTE 2018* wurden zwei aus dem Projekt resultierende Beiträge präsentiert (Ehrhart et al. 2018a und Ehrhart et al. 2018b).

Im Rahmen des *5th Meetings of the International Network on Timber Engineering Research Meeting INTER* wurden ein Grossteil der in diesem Bericht beschriebenen Ergebnisse präsentiert und diskutiert (Ehrhart et al., 2018c).

Auf Initiative von R. Steiger wurde eine Schweizerische Spiegelgruppe zur CEN/TC124/WG3/TG1 gegründet. Diese Task Group beschäftigt sich mit der Schaffung eines europäischen Produktstandards für Brettschichtholz aus Laubholz und ist für die Umsetzung der Projektergebnisse aus dem AP-Holz Projekt von grossem Interesse. Sämtliche Dokumente die von der Spiegelgruppe erarbeitet werden sind öffentlich verfügbar.

Im November 2018 fand in Graz ein Workshop zum Thema «Verbindungstechnik für Laubholz-Konstruktionen» statt. An diesem Workshop nahm auch T. Ehrhart teil und präsentierte unter dem Titel «Sortierung, Produktion und Eigenschaften von Brettschichtholz aus Buche» die bisherigen Projekt-Ergebnisse.

Im Februar 2019 wurden die Ergebnisse an der Tagung des Swiss Wood Innovation Network SWIN 2019 an der ETH Zürich präsentiert. Titel des Beitrags: «Brettschichtholz aus Buche – Erweiterung der Möglichkeiten im modernen Holzbau».

13 Meilenstein im Modul 4

In das Modul 4 fällt der folgenden Projekt-Meilenstein:

- Meilenstein 5: Ermittlung der Festigkeitseigenschaften von BSH-Trägern und Stützen
→ Werden die kennzeichnenden Werte für BSH der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55 erreicht?

Auf Grund der Versuchsergebnisse kann der Meilenstein 5 als erfüllt betrachtet werden.

14 Ausblick und weiteres Vorgehen

Die vollständige und vertiefte Auswertung und Aufbereitung der Prüfergebnisse, ergänzt mit Berechnungen an numerischen Modellen bildet die Basis für die folgenden Module des Projektes.

Auf das Modul 4 (Experimentelle Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von BSH) folgen gemäss Beitragsgesuch und Projektplan die folgenden Module und zugehörigen Arbeitspakete:

- **Modul 5:** Festlegung von kennzeichnenden Eigenschaften und Bemessungswerten für Buchen-BSH der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55 (auf Basis von Modul 4 und von weiteren Überlegungen, wie z.B. Robustheit)
- **Modul 6:** Zusätzliche wesentliche Grundlagen für die Bemessung von Bauteilen
 - 6.1: Übertragung der aus den Normversuchen gewonnenen Ergebnisse auf Bauteile; Festlegung des Verhältniswerts γ_M/η_M
 - 6.2: Festlegung weiterer für die Bemessung von Buchen-BSH-Bauteilen nötiger Angaben (z.B. Holzfeuchteeinfluss, Einfluss der Dauer der Lasteinwirkung auf Festigkeit und Verformung, Volumeneinfluss, etc.)
 - 6.3: Stabilitätsnachweise (Knick- und Kippkurven, Nachweise nach Theorie 2. Ordnung, etc.)
- **Modul 7:** Umsetzung der Projektergebnisse
 - 7.1: Vorschlag für Sortierkriterien sowie Tabellen analog zu den Tabellen 265.7 und 265/1.12 mit Bemessungsangaben zu Buchenholzbrettern und Buchen-BSH und weiterer erforderlicher Bemessungsgrundlagen
 - 7.2: Formulierung der organisatorischen Massnahmen im Rahmen der Qualitätssicherung
 - 7.3: Formulierung der technischen Massnahmen und Kriterien im Rahmen der Qualitätssicherung
 - 7.4: Information von Normierungsgremien (SIA, CEN, INTER) über die Projektergebnisse
 - 7.5: Wissensaustausch mit dem Forschungsprojekt: Wood Wisdom-Net Projekt „EU Hardwoods“
- **Modul 8:**
 - 8.1: Technischer Schlussbericht
 - 8.2: Administrative Berichte

15 Literatur

- Clerc G., Lehmann M. & Volkmer T. (2017): Brettschichtholz aus Laubholz – Technische Grundlagen zur Marktimplantierung als Bauprodukt in der Schweiz; Technischer Bericht Modul 3.
- DIN 4074-5 (2008): Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 5: Laubschnittholz. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Deutschland.
- EN 338 (2016): Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen. Europäisches Komitee für Normung CEN, Brüssel, Belgien.
- EN 384 (2016): Bauholz für tragende Zwecke – Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte. Europäisches Komitee für Normung CEN, Brüssel, Belgien.
- EN 408 (2012): Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften. Europäisches Komitee für Normung CEN, Brüssel, Belgien.
- EN 1194 (1999): Holzbauwerke – Brettschichtholz- Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte. Europäisches Komitee für Normung CEN, Brüssel, Belgien.
- EN 14080 (2013): Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen. Europäisches Komitee für Normung CEN, Brüssel, Belgien.
- EN 14358 (2016): Holzbauwerke – Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte. Europäisches Komitee für Normung CEN, Brüssel, Belgien.
- EN 26891 (1991): Holzbauwerke – Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitte: Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens. Europäisches Komitee für Normung CEN, Brüssel, Belgien.
- Ehrhart T., Fink G., Steiger R. & Frangi A. (2016a): Strength grading of European beech lamellas for the production of GLT & CLT. International Network on Timber Engineering Research INTER Meeting: Graz, Austria, August 16-19, 2016.
- Ehrhart T., Fink G., Steiger R. & Frangi A. (2016b): Experimental investigation of tensile strength and stiffness indicators regarding European beech timber. World Conference on Timber Engineering 2016 (WCTE 2016): Vienna, Austria, August 22-25, 2016.
- Ehrhart T., Steiger R. & Frangi A. (2017a): A non-contact method for the determination of fibre direction in European beech wood (*Fagus sylvatica L.*). European Journal of Wood and Wood Products. DOI: 10.1007/s00107-017-1279-3.
- Ehrhart T., Steiger R. & Frangi A. (2017b): Impact and detection of grain direction in European beech wood. International Network on Timber Engineering Research INTER Meeting: Kyoto, Japan, August 28-31, 2017.
- Ehrhart T., Palma P., Steiger R. & Frangi A. (2018a): Numerical and experimental investigations on the mechanical properties of glued laminated timber beams made from European beech wood. World Conference on Timber Engineering 2018 (WCTE 2018): Seoul, Republic of Korea, August 20-23, 2018.
- Ehrhart T., Steiger R., Palma P. & Frangi A. (2018b): Estimation of tensile strength of European beech timber boards based on the analysis of density, dynamic MOE, and local fibre direction. World Conference on Timber Engineering 2018 (WCTE 2018): Seoul, Republic of Korea, August 20-23, 2018.

Ehrhart T., Steiger R. & Frangi A. (2018c): Mechanical properties of European beech (*Fagus sylvatica* L.) glued laminated timber. International Network on Timber Engineering Research INTER Meeting: Tallinn, Estonia, August 13-16, 2018.

JCSS (2006): Probabilistic model code; Part 3.5 – Properties of timber.
http://www.jcss.byg.dtu.dk/Publications/Probabilistic_Model_Code.aspx

Steiger R. & Ehrhart T. (2016): Homogenes und kombiniertes Buchen-Brettschichtholz – Technische Grundlagen zur Marktimplementierung als Bauprodukt für Biegeträger und Stützen; Technischer Schlussbericht Modul 2 Rohmaterialverarbeitung.

Homogenes und kombiniertes Buchen-Brettschichtholz

Technische Grundlagen zur Marktimplementierung als Bauprodukt für Biegeträger und Stützen

**Bundesamt für Umwelt BAFU
Aktionsplan Holz**

Projekt REF-1011-04200

Technischer Schlussbericht

Module 5 und 6

Modul 5: Festlegung von kennzeichnenden Eigenschaften und Bemessungswerten für Buchen-BSH der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55

Modul 6: Zusätzliche wesentliche Grundlagen für die Bemessung von Bauteilen

Andrea Frangi
Thomas Ehrhart

ETH Zürich
ETH Zürich

Inhaltsverzeichnis

MODUL 5.....	133
1 INHALTE UND ZIELE VON MODUL 5.....	134
2 ZUSAMMENFASSUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE AUS MODUL 4.....	134
3 ERGÄNZENDE NUMERISCHE UND PROBABILISTISCHE ANALYSEN	136
3.1 EINLEITUNG	136
3.2 ERGEBNISSE DER SIMULATIONEN.....	137
4 VERVOLLSTÄNDIGUNG DES MECHANISCHEN PROFILS	139
4.1 FESTIGKEIT UND E-MODUL RECHTWINKLIG (\perp) ZUR FASERRICHTUNG	139
4.2 ROLLSCHUBFESTIGKEIT UND ROLLSCHUBMODUL	141
5 KENNZEICHNENDE EIGENSCHAFTEN UND BEMESSUNGSWERTE	143
MODUL 6.....	147
6 INHALTE UND ZIELE VON MODUL 6.....	148
7 KNICKVERHALTEN VON BUCHEN-BSH	148
7.1 EINLEITUNG	148
7.2 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	149
7.3 NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN	150
7.4 ANGEPASSTE KNICKKURVE FÜR BUCHEN-BSH	151
8 GRÖSSENEINFLUSS AUF DIE MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN	152
8.1 EINLEITUNG	152
8.2 GRÖSSENEINFLUSS AUF DIE BIEGEFESTIGKEIT VON BUCHEN-BSH	152
8.3 GRÖSSENEINFLUSS AUF DIE SCHUFESTIGKEIT VON BUCHEN-BSH	155
9 WEITERE WESENTLICHE GRUNDLAGEN FÜR DIE BEMESSUNG	158
9.1 VERHÄLTNISWERT Γ_M/H_M	158
9.2 EINFLUSS DER HOLZFEUCHTE	159
9.3 EINFLUSS DER DAUER DER LASTEINWIRKUNG	160
9.4 BEMESSUNGSSITUATION BRAND	161
FÜR MODUL 5 UND 6 RELEVANTE PUNKTE	162
10 DELIVERABLES IN MODUL 5 UND 6.....	163
11 AUSBLICK UND WEITERES VORGEHEN	163
12 LITERATUR.....	164

Modul 5

Festlegung von kennzeichnenden Eigenschaften und Bemessungswerten für
Buchen-BSH der Festigkeitsklassen GL40, GL48 und GL55

1 Inhalte und Ziele von Modul 5

Das Projekt-Modul 5 umfasst die Festlegung von kennzeichnenden Eigenschaften und Bemessungswerten von Buchen-BSH der Festigkeitsklassen GL40h, GL48h, GL55h (homogener Querschnittsaufbau für Stützen), GL40c, GL48c und GL55c (kombinierter Querschnittsaufbau für Biegeträger).

Als Basis für die Festlegung der kennzeichnenden Eigenschaften und Bemessungswerte dienen vorwiegend die in Modul 4 durchgeführten experimentellen Untersuchungen zu den Biege-, Zug-, Druck- und Schubfestigkeiten und Steifigkeiten von Buchen-BSH der genannten Festigkeitsklassen (Steiger & Ehrhart, 2018). Das untersuchte Buchen-BSH wurde dabei gemäss den Erkenntnissen aus Modul 2 (Steiger & Ehrhart, 2016) festigkeitssortiert und den Ergebnissen aus Modul 3 (Clerc et al., 2017) folgend keilgezinkt und flächenverklebt. Ergänzend wurden numerische und probabilistische Analysen durchgeführt.

Zur Vervollständigung des mechanischen Profils von Buchen-BSH, insbesondere hinsichtlich der Festigkeit und Steifigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung sowie der Rollschubeigenschaften, werden relevante Arbeiten analysiert und daraus ein Vorschlag für Bemessungswerte abgeleitet. Dadurch können sämtliche für die Bemessung von Buchen-BSH erforderlichen mechanischen Eigenschaften definiert und eine Tabelle in Anlehnung an die Tabelle 7 der Norm SIA 265 (2012), erstellt werden.

2 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse aus Modul 4

Im Rahmen des Moduls 4 «Experimentelle Ermittlung der mechanischen Eigenschaften des BSH» wurden umfangreiche Untersuchungen zu den Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Buchen-BSH durchgeführt. Da die Ergebnisse dieser Untersuchungen zu grossen Teilen die Basis für die Überlegungen und Festlegungen in Modul 5 bildet, werden nachfolgend die wichtigsten Ergebnisse aus dem Modul 4 in kompakter Form zusammengefasst. Für detailliertere Informationen zu den durchgeführten Versuchen sowie zu den Ergebnissen sei auf den technischen Schlussbericht von Modul 4 verwiesen (Steiger & Ehrhart, 2018).

In der Tabelle 1 sind die Versuchsergebnisse aus dem Modul 4 zusammengefasst dargestellt. Die Mittelwerte (mean) und 5%-Fraktilwerte (05) bei Annahme einer Lognormalverteilung (Festigkeit und Steifigkeit) beziehungsweise einer Normalverteilung (Dichte) werden für die Biege-, die Zug-, die Druck- und die Schubfestigkeit und -Steifigkeit angegeben. Die untersuchten Festigkeitsklassen – mit kombinierten Querschnittsaufbauten bei Biege- und Schubversuchen und homogenen Querschnittsaufbauten bei Zug- und Druckversuchen – sind ebenso ersichtlich wie die Querschnittshöhen beziehungsweise Stützenquerschnitte und die Anzahl (n) der untersuchten Prüfkörper je Serie. Die Holzfeuchte lag bei $u = 8 \pm 2\%$.

In den Biegeversuchen wurde festgestellt, dass die angestrebten charakteristischen Biegefestigkeiten von 40, 48 und 55 MPa jeweils erreicht beziehungsweise übertroffen wurden. Aufgrund der zentralen Rolle der Festigkeit der Keilzinkenverbindungen war der Unterschied zwischen den Festigkeitsklassen allerdings weniger stark ausgeprägt als erwartet. Ein signifikanter Grösseneffekt, d.h. eine Abnahme der Festigkeit mit zunehmender Querschnittshöhe, wurde festgestellt. Dieser Grösseneffekt wird in Kapitel 8.2 des vorliegenden Berichtes detailliert untersucht und quantifiziert. Hinsichtlich des E-Moduls war eine deutliche Abstufung zwischen den Festigkeitsklassen feststellbar (Tabelle 1).

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse der Biege-, Zug-, Druck- und Schubversuche aus Modul 4. Die angegebenen Werte beziehen sich auf eine Holzfeuchte von $u = 8 \pm 2\%$.

<u>Biegefestigkeit und lokaler Biege E-Modul</u>	Festigkeitsklasse	GL40c	GL48c	GL48c	GL48c	GL48c	GL55c
	Trägerhöhe [mm]	$h = 400$	$h = 200$	$h = 400$	$h = 600$	$h = 800$	$h = 400$
	Prüfkörperanzahl	$n = 7$	$n = 7$	$n = 7$	$n = 7$	$n = 4$	$n = 7$
<u>Zugfestigkeit und Zug E-Modul</u>	$f_{t,g,mean}$ MPa	63.1	78.2	63.1	59.5	58.1	66.1
	$f_{t,g,05}$ MPa	52.7	64.4	57.9	49.2	50.4	56.5
	$E_{t,g,mean}$ MPa	14'200	14'900	15'800	15'200	15'600	16'200
	$E_{t,g,05}$ MPa	13'700	14'100	15'300	14'300	15'400	15'400
	ρ_{mean} kg/m ³	679	696	689	693	706	689
	ρ_{05} kg/m ³	667	685	669	683	689	674
	Festigkeitsklasse	GL40h		GL48h			GL55h
<u>Druckfestigkeit und Druck E-Modul</u>	Anzahl an Lamellen	3 Lagen		3 Lagen			3 Lagen
	Prüfkörperanzahl	$n = 7$		$n = 7$			$n = 7$
	$f_{c,0,g,mean}$ MPa	43.7		53.3			57.7
	$f_{c,0,g,05}$ MPa	36.6		44.3			52.9
	$E_{c,0,g,mean}$ MPa	15'200		15'500			17'000
	$E_{c,0,g,05}$ MPa	13'900		14'700			16'300
	ρ_{mean} kg/m ³	701		697			715
<u>Schubfestigkeit und Schubmodul</u>	ρ_{05} kg/m ³	669		664			693
	Festigkeitsklasse	GL40h	GL48h	GL48c	GL48h		GL55h
	Stützenquerschnitt [mm]	$w = 200$	$w = 150$	$w = 200$	$w = 280$		$w = 200$
	Prüfkörperanzahl	$n = 7$	$n = 7$	$n = 7$	$n = 7$		$n = 7$
	$f_{c,0,g,mean}$ MPa	60.4	59.9	63.8	58.2		65.8
	$f_{c,0,g,05}$ MPa	59.7	56.4	62.5	55.9		63.7
	$E_{c,0,g,mean}$ MPa	15'100	15'600	16'000	15'500		17'000
<u>Zugfestigkeit und Zug E-Modul</u>	$E_{c,0,g,05}$ MPa	14'400	14'600	15'400	14'800		16'700
	ρ_{mean} kg/m ³	693	690	712	690		708
	ρ_{05} kg/m ³	682	664	706	674		697
	Festigkeitsklasse		GL48c	GL48c	GL48c	GL48c	GL55c
	Trägerhöhe [mm]		$h = 200$	$h = 400$	$h = 600$	$h = 400$	$h = 400$
	Prüfkonfiguration		3PB	3PB	3PB	4PB	3PB
	Prüfkörperanzahl		$n = 7$	$n = 3$	$n = 7$	$n = 7$	$n = 7$
<u>Schubfestigkeit und Schubmodul</u>	$f_{v,mean}$ MPa		16.0	13.2	9.4	10.8	12.4
	$f_{v,05}$ MPa		14.5	-	7.7	9.0	10.2
	G_{mean} MPa		-	1'280	1'270	1'210	1'180
	G_{05} MPa		-	1'190	1'140	1'130	1'100

Die charakteristischen Werte der Zugfestigkeit parallel zur Faserrichtung der Festigkeitsklassen T33 (\rightarrow GL40h), T42 (\rightarrow GL48h) und T50 (\rightarrow GL55h) übersteigen mit 36.6, 44.3 und 52.9 MPa die definierten Fraktile der jeweiligen Festigkeitsklassen. Der ermittelte Zug E-Modul der Festigkeitsklasse T33 ist als überdurchschnittlich hoch, jener der T42 Prüfkörper als repräsentativ zu bezeichnen. Der mittlere E-Modul der Festigkeitsklasse T50 liegt mit 17'000 MPa deutlich darüber.

Hinsichtlich der Ergebnisse aus den Druckversuchen parallel zur Faserrichtung ist insbesondere das generell hohe Niveau der Festigkeiten – etwa im Bereich von im Mittel

60 bis 65 MPa in allen Serien – und die geringe Streuung der Festigkeiten erwähnenswert (Variationskoeffizient $\text{cov} < 0.05$ in allen Serien). Wie bei den Biege- und Zugversuchen wurde eine deutliche Abstufung zwischen den Festigkeitsklassen hinsichtlich des E-Moduls beobachtet, was auf die Verwendung des dynamischen E-Moduls in der Festigkeitssortierung zurückgeführt werden kann. Sowohl hinsichtlich Druckfestigkeit als auch E-Modul war kein Grösseneffekt feststellbar.

In den umfangreichen Schubversuchen wurden unterschiedliche Festigkeitsklassen, Querschnittshöhen und -Geometrien sowie verschiedene Prüfkonfigurationen untersucht. Dabei wurden ein signifikanter Grösseneffekt sowie ein massgeblicher Einfluss der Prüfkonfiguration auf die ermittelte Schubfestigkeit festgestellt. In Abhängigkeit von der Querschnittshöhe wurden charakteristische Schubfestigkeiten zwischen 7.7 MPa ($h = 600$ mm) und 14.5 MPa ($h = 200$ mm) ermittelt. In Kapitel 8.3 des vorliegenden Berichtes wird der Grössen- und Systemeffekt bei Schubbeanspruchung untersucht und quantifiziert. Der mittlere Schubmodul lag bei Berücksichtigung aller 71 Schubfeldmessungen bei $G_{\text{mean}} = 1'170$ MPa, der 5%-Fraktilwert bei $G_{05} = 970$ MPa.

3 Ergänzende numerische und probabilistische Analysen

3.1 Einleitung

Experimentell-zerstörende Materialprüfungen sind in der Regel mit einem grösseren Aufwand hinsichtlich Material, Zeit und letztlich Kosten verbunden. Zwar lassen sich solche experimentellen Prüfungen bei der Untersuchung von Materialeigenschaften, in diesem Falle von Buchen-BSH, nicht vermeiden, allerdings kann deren Umfang reduziert werden, wenn die experimentellen Untersuchungen durch probabilistische, beziehungsweise numerische Simulationen ergänzt werden.

Numerische Traglastsimulationen von Biegeträgern aus Nadelholz-BSH unter der Berücksichtigung von lokalen probabilistischen Eigenschaften wurden unter anderem mithilfe des «Karlsruher Rechenmodels» (u.a. Ehlbeck et al., 1985a, 1985b, 1985c und Blaß et al., 2008) sowie von Fink (2014) durchgeführt. Im Rahmen der Masterarbeit von D. Werlen (Werlen, 2018) wurde ein ähnliches Modell für Buchen-BSH entwickelt. In der Abbildung 1 ist der generelle Ablauf der Traglastsimulationen dargestellt.

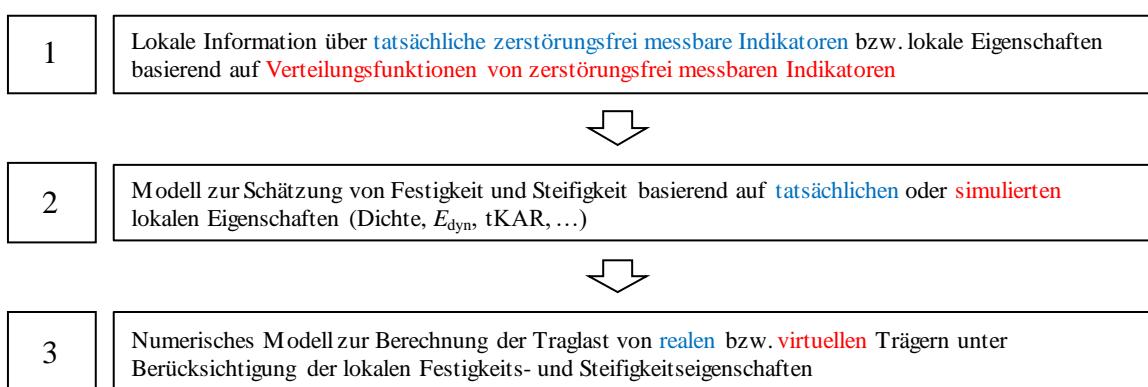


Abbildung 1: Notwendige Schritte bei der Durchführung von Traglastsimulationen an realen bzw. virtuellen Trägern.

Zunächst (Schritt 1) werden die tatsächlichen, zerstörungsfrei gemessenen Indikatoren von realen Biegeträgern bzw. die anhand der bekannten Verteilungsfunktion generierten virtuellen Eigenschaften erfasst. Mit diesen erfassten bzw. generierten Eigenschaften werden die lokalen mechanischen Eigenschaften, insbesondere die Zugfestigkeit und der E-Modul, mithilfe eines im Rahmen von Modul 2 entwickelten Modells basierend auf den Indikatoren geschätzt (Schritt 2). Abschliessend (Schritt 3) wird die Traglast und der E-Modul der realen oder virtuellen Träger mithilfe eines numerischen Modells ermittelt. Für detailliertere Informationen zum probabilistischen und numerischen Modell wird auf Werlen (2018) verwiesen.

3.2 Ergebnisse der Simulationen

Um das numerische Modell und die damit geschätzten Biegefestigkeiten und E-Moduln verifizieren zu können, wurden zunächst die tatsächlich experimentell geprüften Biegeträger simuliert. Wie im technischen Schlussbericht zum Modul 4 beschrieben (Steiger & Ehrhart, 2018, Kapitel 5.3), wurden die lokalen Eigenschaften der Biegeträger detailliert dokumentiert. Basierend darauf konnten die lokalen Festigkeiten und Steifigkeiten geschätzt und die Traglastsimulationen durchgeführt werden.

In der Abbildung 2 sind die simulierten (Abszisse) und experimentell ermittelten (Ordinate) Biegefestigkeiten und E-Moduln einander gegenübergestellt. Anhand der Symbole lässt sich auf die Festigkeitsklasse (GL40c, GL48c oder GL55c) sowie die Querschnittshöhe ($h = 200, 400, 600$ oder 800 mm) schliessen. Es ist erkennbar, dass die simulierten Biegefestigkeiten tendenziell zu niedrig sind und die experimentell ermittelten Werte um rund 10% unterschätzt werden (Abbildung 2a). Diese Modellgenauigkeit (auf der konservativen Seite) lässt sich auf eine unvollständige Abbildung des Laminierungseffektes, sowie auf das verwendete ideal elastische Materialverhalten mit sprödem Bruchverhalten zurückführen. Der E-Modul lässt sich hingegen sehr gut simulieren (Abbildung 2b). Der Unterschied zwischen Simulation und Experiment beträgt im Mittel 2%, das Bestimmtheitsmass liegt bei $r^2 = 0.85$. Grössere Abweichungen lassen sich lediglich bei den Träger mit $h = 200$ mm feststellen, bei denen auch die experimentelle Messung des E-Moduls mit den grössten Unsicherheiten behaftet ist.

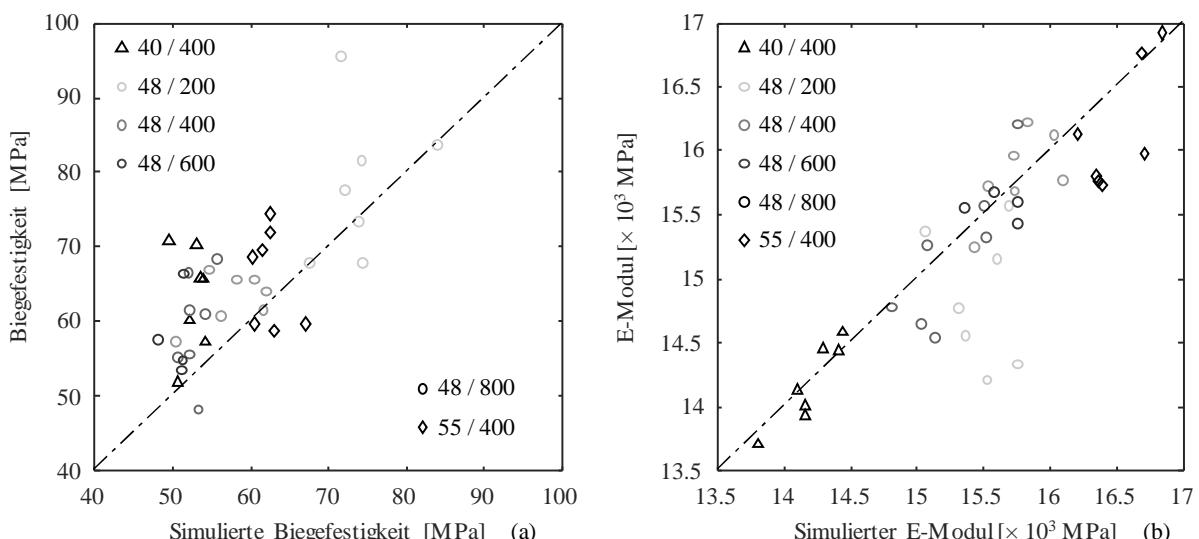


Abbildung 2: Gegenüberstellung von simulierten (Abszisse) und experimentell ermittelten (Ordinate) Biegefestigkeiten (a) und lokalen Biegeelastizitätsmodulen (b).

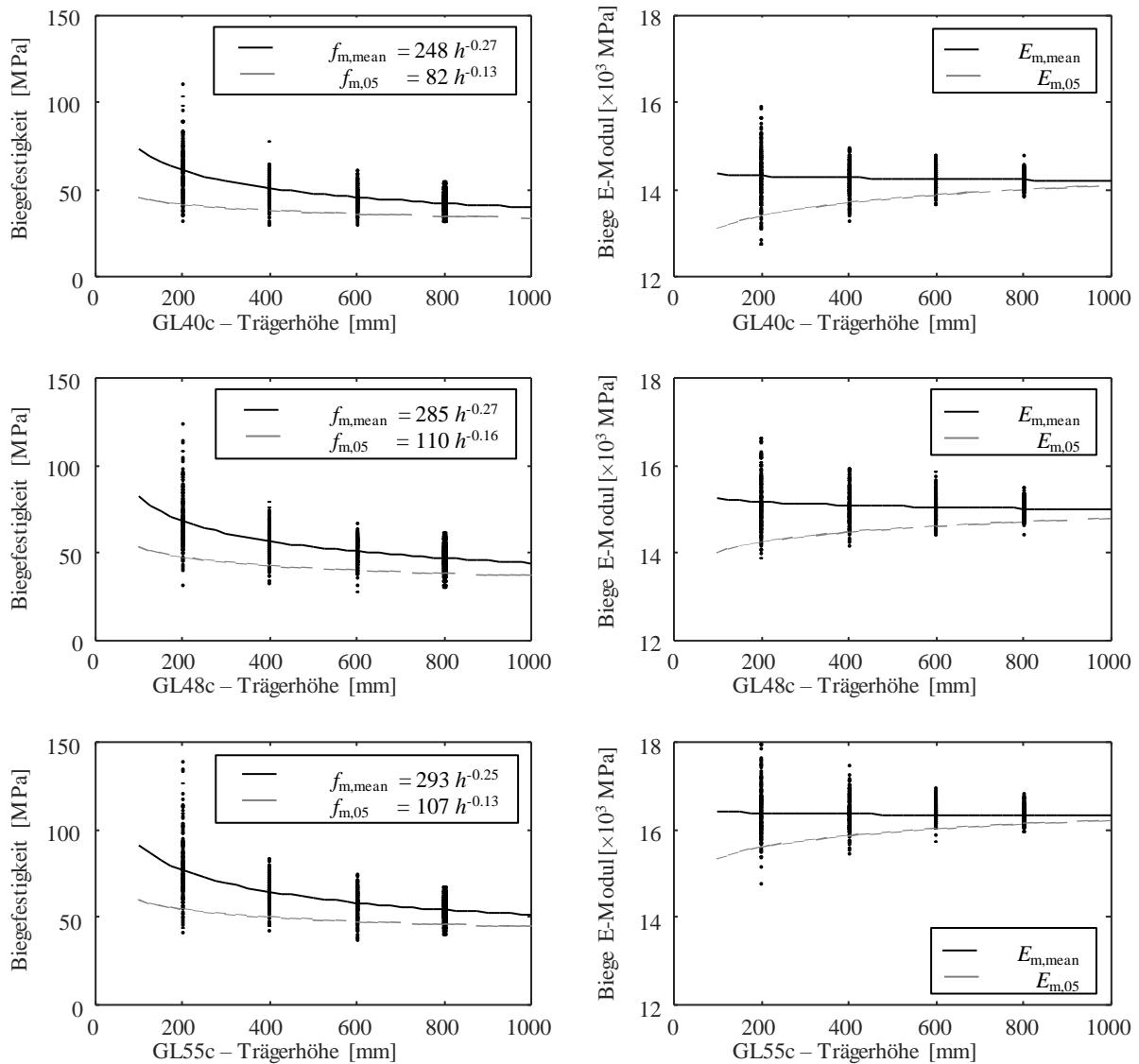


Abbildung 3: Simulierte Biegefestigkeit (links) und Biege E-Modul (rechts) der Festigkeitsklassen GL40c (oben), GL48c (Mitte) und GL55c (unten) in Abhängigkeit der Trägerhöhe.

Um die experimentellen Untersuchungen virtuell zu erweitern, wurden jeweils 200 Simulationen für die Festigkeitsklassen GL40c, GL48c und GL55c und die Höhen 200, 400, 600 und 800 mm (total: $3 \times 4 \times 200 = 2400$ Simulationen) durchgeführt. Dabei wurden probabilistische Materialeigenschaften unter Berücksichtigung der in Modul 2 und Modul 4 festgestellten Verteilungsfunktionen verwendet. In der Abbildung 3 sind die Biegefestigkeiten (links) und die E-Moduln (rechts) für die drei Festigkeitsklassen in Abhängigkeit der Trägerhöhe dargestellt. In der Tabelle 2 sind zudem die Simulationsergebnisse den experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt. Während die Biegefestigkeit sowohl auf Mittelwert- als auch auf 5%-Fraktilwert Niveau mit zunehmender Trägerhöhe abnimmt, ist der mittlere E-Modul weitestgehend unabhängig von der Trägerhöhe und der 5%-Fraktilwert nimmt mit zunehmender Trägerhöhe moderat zu. Auch wenn der Absolutwert der Festigkeiten aufgrund der genannten Modellunschärfen nur eine begrenzte Aussagekraft besitzt, so lassen sich aus den Ergebnissen Rückschlüsse auf das Niveau des E-Moduls sowie den Größeneffekt hinsichtlich Festigkeit und E-Modul ziehen (Kapitel 8.2).

Tabelle 2: Vergleich der experimentell ermittelten («exp») und numerisch simulierten («sim») Biegefestigkeiten (in MPa) und E-Moduln (in $\times 10^3$ MPa) Träger mit Höhen 200, 400, 600 und 800 mm in den Festigkeitsklassen GL40c, GL48c und GL55c.

h mm	GL40c				GL48c				GL55c			
	$f_{m,mean}$		$f_{m,05}$		$f_{m,mean}$		$f_{m,05}$		$f_{m,mean}$		$f_{m,05}$	
	exp	sim	exp	sim	exp	sim	exp	sim	exp	sim	exp	sim
200	-	61.3	-	41.4	78.2	69.0	64.4	47.3	-	77.5	-	53.5
400	63.1	50.2	52.7	37.5	63.1	55.4	57.9	41.6	66.1	64.4	56.5	51.2
600	-	45.1	-	35.5	59.5	50.3	49.2	39.5	-	57.7	-	45.8
800	-	42.6	-	34.6	58.1	47.6	50.4	37.8	-	55.1	-	45.5
h mm	$E_{m,mean}$		$E_{m,05}$		$E_{m,mean}$		$E_{m,05}$		$E_{m,mean}$		$E_{m,05}$	
	exp	sim	exp	sim	exp	sim	exp	sim	exp	sim	exp	sim
	-	14.3	-	13.4	14.9	15.2	14.1	14.2	-	16.4	-	15.6
200	14.2	14.2	13.7	13.7	15.8	15.1	15.3	14.5	16.2	16.4	15.4	15.8
400	-	14.3	-	13.9	15.2	15.0	14.3	14.5	-	16.4	-	16.1
600	-	14.2	-	14.0	15.6	15.0	15.4	14.7	-	16.4	-	16.1

4 Vervollständigung des mechanischen Profils

Die Tabelle 7 der SIA 265 (2012) kann mit den Untersuchungsergebnissen aus dem Projekt alleine nicht gefüllt werden. Zur Vervollständigung des mechanischen Profils von Buchen-BSH ist ergänzend die Angabe der folgenden mechanischen Eigenschaften erforderlich:

- Zugfestigkeit rechtwinklig (\perp) zur Faserrichtung: $f_{t,90,k}$
- Druckfestigkeit rechtwinklig (\perp) zur Faserrichtung: $f_{c,90,k}$
- Rollschubfestigkeit: $f_{r,k}$
- Elastizitätsmodul rechtwinklig (\perp) zur Faserrichtung: $E_{90,mean}$
- Rollschubmodul: G_{mean}

4.1 Festigkeit und E-Modul rechtwinklig (\perp) zur Faserrichtung

Holz weist bei Beanspruchungen rechtwinklig (\perp) zur Faserrichtung generell deutlich niedrigere Festigkeiten und Steifigkeiten auf, als bei Beanspruchungen parallel (\parallel) zur Faserrichtung. Querdruck- und Querzugspannungen lassen sich in Konstruktionen nicht gänzlich vermeiden, weshalb abgesicherte Werte für die Querdruckfestigkeit ($f_{c,90}$), die Querzugfestigkeit ($f_{t,90}$) sowie den E-Modul rechtwinklig zur Faserrichtung (E_{90}) benötigt werden.

In der Produktnorm EN 14080 (2013) für BSH aus Nadelholz und Pappel wird, unabhängig von der Festigkeitsklasse, ein charakteristischer Wert für die Querdruckfestigkeit von $f_{c,90,g,k} = 2.5$ MPa, ein charakteristischer Wert der Querzugfestigkeit von $f_{t,90,g,k} = 0.5$ MPa und ein Mittel- und 5%-Fraktilwert des E-Moduls rechtwinklig zur Faserrichtung ($E_{90,g,mean}$ bzw. $E_{90,g,05}$) von 300 bzw. 250 MPa angegeben.

Umfangreiche Untersuchungen zu den Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Buchen-BSH rechtwinklig zur Faserrichtung wurden von Hübner (2013) durchgeführt. Im Rahmen seiner Dissertation ermittelte Hübner (2013) unter anderem Kenngrößen für die Querdruckeigenschaften ohne- (Abbildung 4a), mit einseitigem- und beidseitigem Vorholz (Abbildung 4b) sowie Querzugeigenschaften von BSH aus Buche, Esche und Robinie.

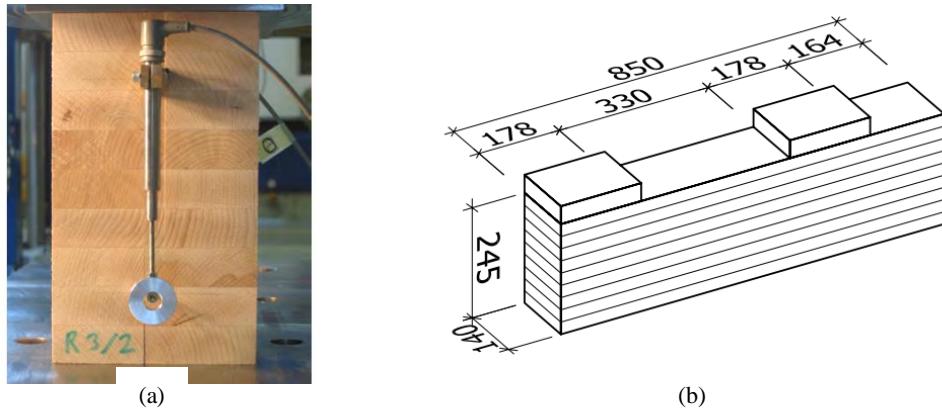


Abbildung 4: Prüfkonfiguration zur Ermittlung von Querdruckfestigkeit und E-Modul (a) sowie Masse (in mm) der Schwellenprüfkörper mit ein- und beidseitigem Vorholz (b). Grafik adaptiert aus Hübner (2013).

Basierend auf 55 Querdruckprüfungen an Buchen-BSH Quadern ohne Vorholz sowie jeweils 24 Prüfkörpern mit einseitigem und beidseitigem Vorholz wurden von Hübner (2013) eine charakteristische Querdruckfestigkeit von $f_{c,90,k} = 7.2$ MPa, Querdruckbeiwerte von $k_{c,90} = 1.2$ (einseitiges Vorholz) bzw. $k_{c,90} = 1.5$ (beidseitiges Vorholz), sowie ein mittlerer Druck E-Modul rechtwinklig zur Faserrichtung von 1'050 MPa ermittelt (Abbildung 5, Tabelle 3). Die Prüfkörper wiesen eine Holzfeuchte von 8.9 bis 10.0% auf und Hübner korrigierte (reduzierte) die Ergebnisse um 2.5% je Feuchteprozent (Querdruckfestigkeit) bzw. 1.9% je Feuchteprozent (Druck E-Modul quer zur Faser) auf die Referenz-Holzfeuchte von 12%.

Neben dem Einfluss von ein- und beidseitigem Vorholz, stellte Hübner (2013) einen signifikanten Einfluss des Einschnittes sowohl auf die Querdruckfestigkeit (Abbildung 5a) als auch auf den Druck E-Modul rechtwinklig zur Faserrichtung (Abbildung 5b) fest. Die höchsten Festigkeiten und E-Modulen liessen sich demnach mit Seitenbrettern («S») erreichen.

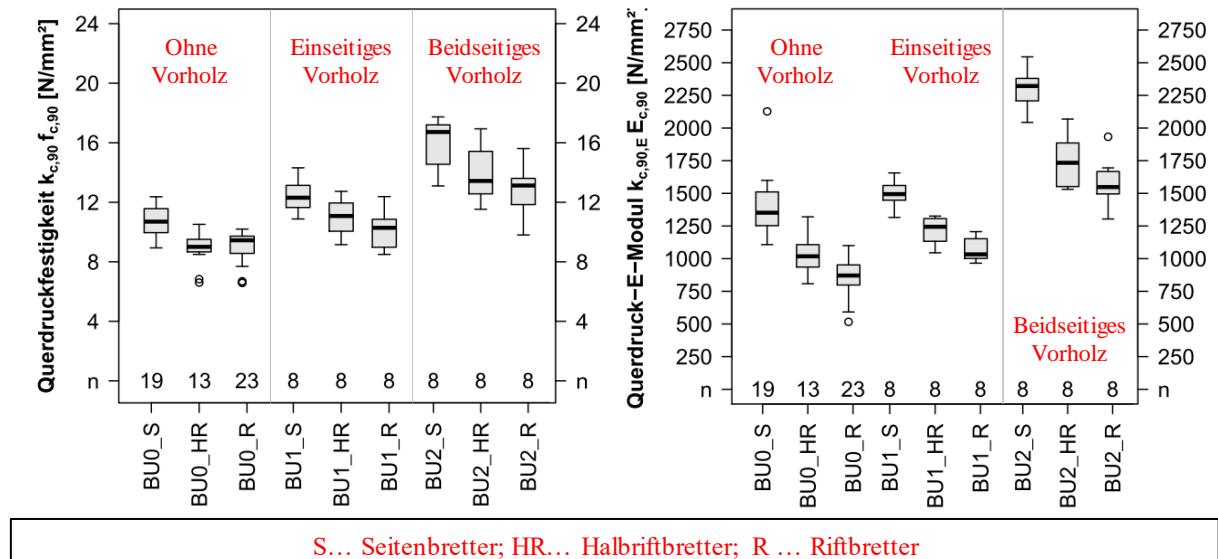


Abbildung 5: Querdruckfestigkeit (links) und Druck E-Modul rechtwinklig zur Faserrichtung (rechts) von Buchen-BSH in Abhängigkeit von Einschnitt und Vorholz. Grafik adaptiert aus Hübner (2013).

Basierend auf 81 Querzugprüfungen an Buchen-BSH wurden von Hübner (2013) ein charakteristischer Wert der Querzugfestigkeit von $f_{t,90,k} = 2.2$ MPa, sowie ein mittlerer Zug E-Modul rechtwinklig zur Faserrichtung von 1'240 MPa ermittelt (Tabelle 3). Die Prüfkörper wiesen eine Holzfeuchte von im Mittel rund 10.9% auf und Hübner korrigierte (reduzierte) die Ergebnisse wiederum um 2.5% je Feuchteprozent (Querzugfestigkeit) bzw. 1.9% je Feuchteprozent (Zug E-Modul quer zur Faser) auf die Referenzholzfeuchte von 12%.

Tabelle 3: Querdruck- und Querzugeigenschaften von Buchen-BSH gemäss Hübner (2013). Die Festigkeiten, Steifigkeiten und Dichten sind auf eine Holzfeuchte von 12% bezogen.

Querdruckeigenschaften von Buchen-BSH			
Prüfkörperanzahl	n	-	55
Druckfestigkeit \perp zur Faser	$f_{c,90,k}$	MPa	7.2
Druck E-Modul \perp zur Faser	$E_{c,90,mean}$	MPa	1'050
	$E_{c,90,k}$	MPa	630
Dichtebereich	$\rho_{u=12}$	kg/m ³	627...724...798
Holzfeuchte	u	%	8.9...9.5...10.0
Querdruckbeiwert	$k_{c,90,1-seitig}$	-	1.2
	$k_{c,90,2-seitig}$	-	1.5
Querzugeigenschaften von Buchen-BSH			
Prüfkörperanzahl	n	-	81
Zugfestigkeit \perp zur Faser	$f_{t,90,k}$	MPa	2.2
Zug E-Modul \perp zur Faser	$E_{t,90,mean}$	MPa	1'240
	$E_{t,90,k}$	MPa	1'080
Dichtebereich	$\rho_{u=12}$	kg/m ³	712...735...753
Holzfeuchte	u	%	≈ 10.9

4.2 Rollschubfestigkeit und Rollschubmodul

Rollschubspannungen können in Holzkonstruktionen unter anderem in Queranschlüssen (Abbildung 6a), im Bereich von Verstärkungen (Abbildung 6b-e) sowie produktimmanent in Brettsperrholz (BSP) (Abbildung 6f) vorkommen und für die Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit massgebend werden. Darüber hinaus können Verformungen zufolge Rollschub auch zur Gesamtverformung beitragen. Deshalb sind die Rollschubfestigkeit sowie der Rollschubmodul von BSH und BSP Materialeigenschaften, die zur Beschreibung des mechanischen Profils von Buchen-BSH benötigt werden.

In der Produktnorm EN 14080 (2013) für BSH aus Nadelholz und Pappel wird, unabhängig von der Festigkeitsklasse, ein charakteristischer Wert für die Rollschubfestigkeit ($f_{r,g,k}$) von 1.2 MPa und ein Mittel- und 5%-Fraktilwert des Rollschubmoduls ($G_{r,g,mean}$ bzw. $G_{r,g,05}$) von 65 bzw. 54 MPa angegeben.

Untersuchungen zu den Rollschubeigenschaften von Buchenholz wurden von Ehrhart et al. (2015, 2018) und Aicher et al. (2016) durchgeführt. Dabei wurde jeweils eine Prüfkonfiguration in Anlehnung an EN 408 (2012) verwendet und einzelne Brettabschnitte mithilfe von aufgeklebten Stahllaschen getestet (Abbildung 7a, Prüfkörper grau schraffiert). Der Rollschubmodul wurde basierend auf der Messung der relativen Verschiebung beider Lastlaschen sowie der zugehörigen Prüfkraft ermittelt. Bruchbilder von Buchenprüfkörpern (aus: Ehrhart et al., 2015) sind in Abbildung 7b und c ersichtlich.

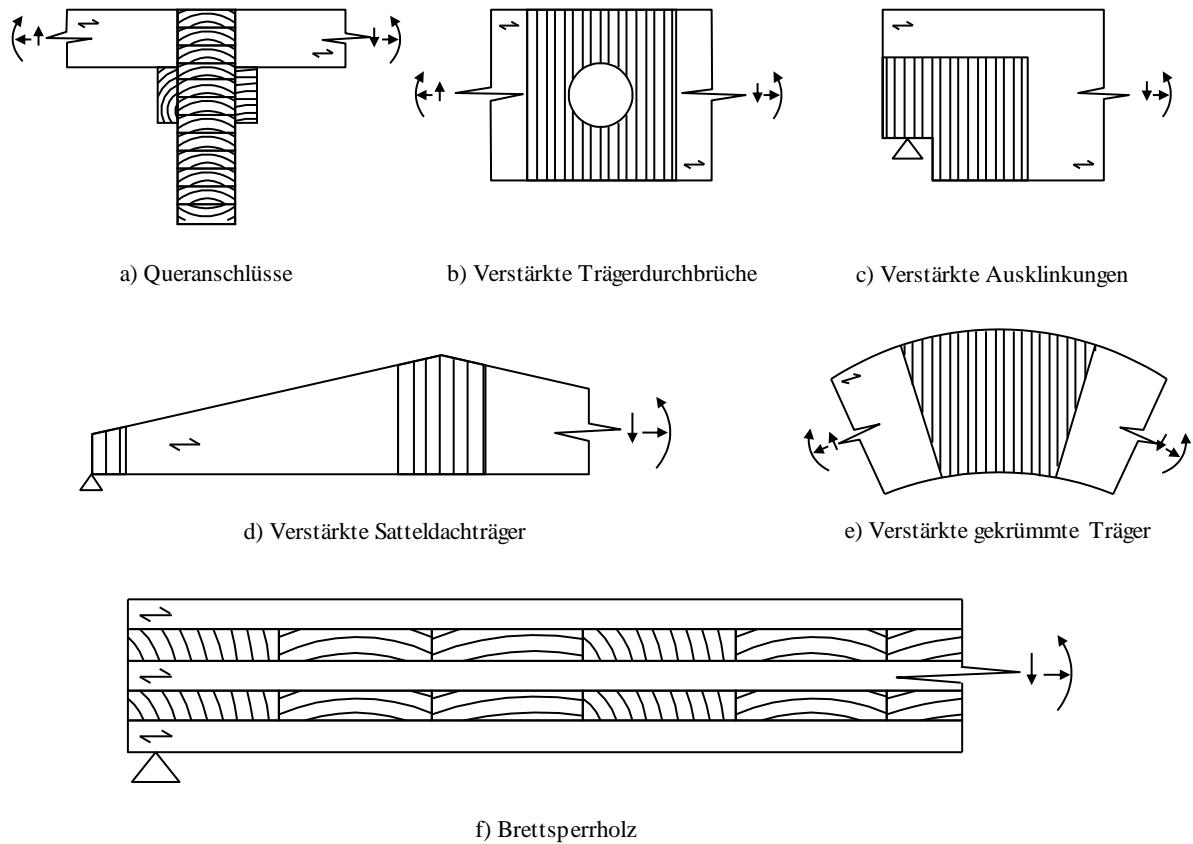


Abbildung 6: Exemplarische Situationen und Produkte, in denen Rollschubspannungen auftreten. Grafik adaptiert aus Ehrhart & Brandner (2018).

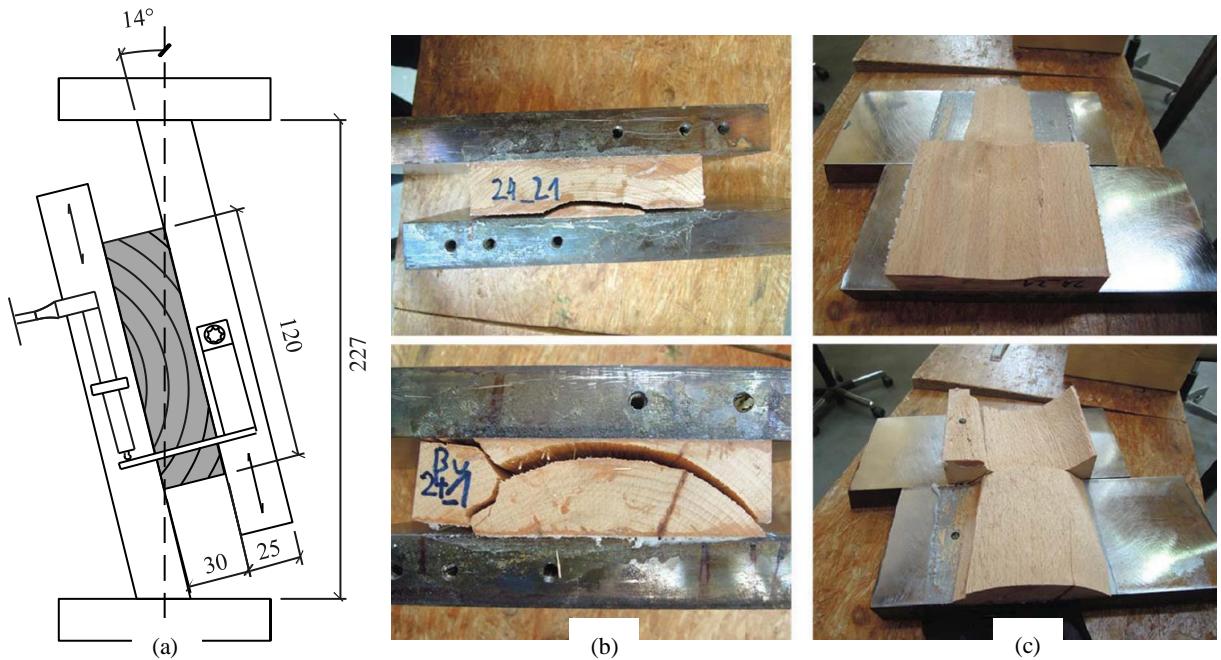


Abbildung 7: Prüfkonfiguration in Anlehnung an EN 408 (2012) zur Ermittlung von Rollschubfestigkeit und -modul (a) sowie Bruchbilder von Buchenprüfkörpern (b, c). Grafik adaptiert aus Ehrhart et al. (2015).

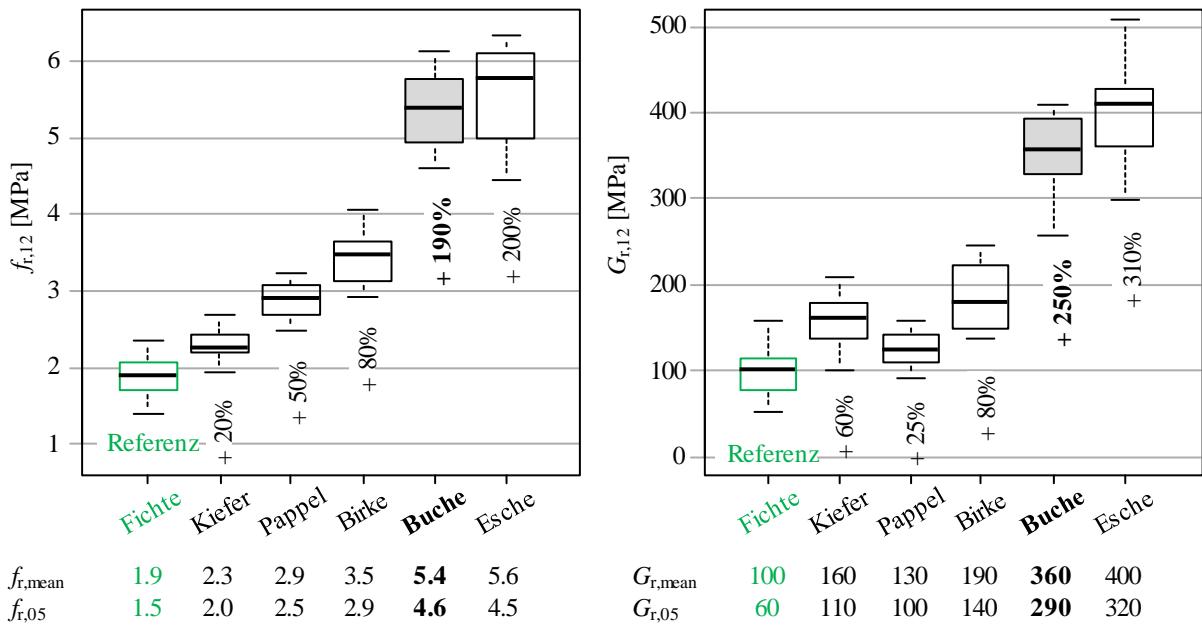


Abbildung 8: Mittelwerte und 5%-Fraktilwerte der Rollschubfestigkeit (links) und des Rollschubmoduls (rechts) von sechs Holzarten. Grafik adaptiert aus Ehrhart et al. (2015).

In sehr guter Übereinstimmung wurden Rollschubfestigkeiten zwischen 4.6 und 6.1 MPa (Ehrhart et al., 2015; $n = 16$, $\text{cov} = 0.09$, Abbildung 8a) bzw. zwischen 4.5 und 8.2 MPa (Aicher et al., 2016; $n = 31$, $\text{cov} = 0.16$) von den Autoren angegeben. Als Mittel- und 5%-Fraktilwerte wurden $f_{r,\text{mean}} = 5.4$ MPa / $f_{r,k} = 4.6$ MPa (Ehrhart et al., 2015) bzw. $f_{r,\text{mean}} = 6.0$ MPa / $f_{r,k} = 4.5$ MPa (Aicher et al., 2016) berichtet.

Auch hinsichtlich der ermittelten Rollschubmodulen stimmen die Ergebnisse beider Studien sehr gut überein. Während von Ehrhart et al. (2015) ein Mittelwert von $G_{r,\text{mean}} = 360$ MPa und ein 5%-Fraktilwert von $G_{r,05} = 290$ MPa gefunden wurde (Abbildung 8b, $\text{cov} = 0.12$), liegt der von Aicher et al. (2016) angegebene Wert nur wenig darüber ($G_{r,\text{mean}} = 370$ MPa, $\text{cov} = 0.20$). Die in beiden Studien angegebenen Werte hinsichtlich der Rollschubfestigkeit und des Rollschubmoduls wurden von den Autoren auf eine Holzfeuchte von 12% korrigiert.

5 Kennzeichnende Eigenschaften und Bemessungswerte

Basierend auf den experimentellen Untersuchungen im Modul 4, den numerischen Simulationen von virtuellen Biegeträgern sowie in der Literatur verfügbaren Angaben zu einigen mechanischen Eigenschaften lässt sich ein vollständiges mechanisches Profil von Buchen-BSH – in Anlehnung an die Tabelle 7 der SIA 265 (2012) bzw. Tabelle 4 und 5 der EN 14080 (2013) – erstellen (Tabelle 4).

Die angestrebten charakteristischen Werte der Biegefestigkeit von 40, 48 und 55 MPa konnten jeweils erreicht bzw. deutlich überschritten werden. Auch wenn in den experimentellen Untersuchungen nur ein sehr gering ausgeprägter Unterschied zwischen den Festigkeitsklassen festgestellt wurde, werden die genannten Biegefestigkeiten, sowohl für kombinierte als auch für homogene Querschnittsaufbauten, vorgeschlagen. Die numerischen Untersuchungen deuten ebenso darauf hin, dass der Unterschied zwischen den Festigkeitsklassen bei gröserer Prüfkörperanzahl und zunehmender Anzahl an Schwachstellen ausgeprägter ausfallen würde. Es wird darauf hingewiesen, dass die

erforderliche Biegefestigkeit für die Festigkeitsklasse GL55c zwar knapp erreicht werden konnte, allerdings sollte kritisch überprüft werden, ob die Implementierung dieser Festigkeitsklasse tatsächlich sinnvoll ist, solange die Keilzinkenfestigkeit das Gesamttragverhalten dominiert und noch nicht ausreichend optimiert ist.

Die experimentell ermittelten Biege E-Moduln der Festigkeitsklassen GL40c, GL48c und GL55c werden durch die Ergebnisse der Simulationen an virtuellen Trägern sehr gut bestätigt. Unter Berücksichtigung beider Untersuchungen werden mittlere und 5%-Fraktilen der Biege E-Moduln von 14'000 / 13'000 MPa (GL40c), 15'200 / 14'200 MPa (GL48c) und 16'400 / 15'400 MPa (GL55c) vorgeschlagen. In den experimentellen Druck- und Zugversuchen wurden E-Moduln für die Festigkeitsklassen GL40h, GL48h und GL55h ermittelt, die im Vergleich zu Simulationen von Ehrhart (2019) etwas höher als erwartet sind. Unter Berücksichtigung der experimentellen und numerischen Untersuchungen werden mittlere und 5%-Fraktilen der E-Moduln von 14'200 / 13'200 MPa (GL40h), 15'400 / 14'400 MPa (GL48h) und 16'600 / 15'600 MPa (GL55h) vorgeschlagen. In der Norm SIA 265 (2012) sowie in der EN 14080 (2013) wird generell nicht zwischen Biege-, Zug- und Druck E-Modul unterschieden, sondern lediglich ein Wert für den E-Modul parallel zur Faserrichtung angegeben. Aufgrund fehlender, dieser Festlegung entgegensprechenden, Untersuchungen mit Buchen-BSH und im Sinne einer einfachen Anwendung wird vorgeschlagen, für Buchen-BSH ebenso vorzugehen.

Tabelle 4: Vorgeschlagene mechanische Eigenschaften und Dichte von Buchen-BSH. Die angegebenen Werte beziehen sich auf eine Holzfeuchte von $u = 8 \pm 2\%$.

Festigkeitsklassen			Buchen-BSH					
	GL40c	GL40h	GL48c	GL48h	GL55c	GL55h		
Kennzeichnende Eigenschaften								
- Biegefestigkeit	$f_{m,k}$	MPa	40.0	40.0	48.0	48.0	55.0	55.0
- mittl. Biege-Elast.-modul	$E_{m,mean}$	MPa	14'000	14'200	15'200	15'400	16'400	16'600
Charakteristische Werte								
Festigkeit	Biegung	$f_{m,k}$	MPa	40.0	40.0	48.0	48.0	55.0
	Zug \parallel zur Faser	$f_{t,0,k}$	MPa	26.0	32.0	30.0	38.4	36.5
	Druck \parallel zur Faser	$f_{c,0,k}$	MPa	40.0	45.0	45.0	50.0	50.0
	Zug \perp zur Faser	$f_{t,90,k}$	MPa	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	Druck \perp zur Faser	$f_{c,90,k}$	MPa	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
	- generell			9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
	- beidseitiges Vorholz			7.2	7.2	7.2	7.2	7.2
	- einseitiges Vorholz			6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
Steifigkeit	Schub	$f_{v,k}$	MPa	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	Rollschub	$f_{r,k}$	MPa	1'100	1'100	1'100	1'100	1'100
	E-Modul \parallel zur Faser	$E_{0,mean}$	MPa	13'000	13'200	14'200	14'400	15'400
		$E_{0,05}$	MPa	14'000	14'200	15'200	15'400	16'400
	E-Modul \perp zur Faser	$E_{90,mean}$	MPa	650	650	650	650	650
		$E_{90,05}$	MPa	900	900	900	900	900
	Schubmodul	G_{mean}	MPa	300	300	300	300	300
		G_{05}	MPa	250	250	250	250	250
Rohdichte			ρ_{mean}	690	690	690	690	690
			ρ_k	660	660	660	660	660

Die charakteristische Zugfestigkeit parallel zur Faser von Nadelholz-BSH mit homogenem Querschnittsaufbau beträgt gemäss EN 14080 (2013) 80% der Biegef Festigkeit ($f_{t,0,g,k} = 0.80 \times f_{m,g,k}$). Die in den experimentellen Versuchen ermittelten 5%-Fraktilwerte der Zugfestigkeit liegen mit $f_{t,0,05} = 36.6$ MPa (GL40h), $f_{t,0,05} = 44.3$ MPa (GL48h) und $f_{t,0,05} = 52.9$ MPa (GL55h) über den entsprechenden Werten von $(0.80 \times 40$ MPa $) = 32.0$ MPa (GL40h), 38.4 MPa (GL48h) und 44.0 MPa (GL55h). Aufgrund der geringen Anzahl an Versuchen je Festigkeitsklasse ($n = 7$) wird vorgeschlagen, das von Nadelholz-BSH bekannte Verhältnis von Zug- zu Biegef Festigkeit von 0.80 zu übernehmen, was zu charakteristischen Zugfestigkeiten von 32.0 MPa (GL40h), 38.4 MPa (GL48h) und 44.0 MPa (GL55h) führt.

Die charakteristische Druckfestigkeit parallel zur Faser von Nadelholz-BSH mit homogenem Querschnittsaufbau entspricht gemäss EN 14080:2013 der charakteristischen Biegef Festigkeit ($f_{c,0,g,k} = 1.00 \times f_{m,g,k}$). Die in den experimentellen Versuchen ermittelten 5%-Fraktilwerte der Zugfestigkeit liegen mit $f_{c,0,05} = 59.7$ MPa (GL40h), $f_{c,0,05} = 62.5 / 55.9$ MPa (GL48h: $a = 150 / 200 / 280$ mm) und $f_{c,0,05} = 63.7$ MPa (GL55h) insbesondere für die niedrigeren beiden Festigkeitsklassen deutlich über den entsprechenden Werten von $(1.00 \times 40$ MPa $) = 40.0$ MPa (GL40h), 48.0 MPa (GL48h) und 55.0 MPa (GL55h). Wegen der geringen Anzahl an Prüfkörpern je Serie ($n = 7$) werden für Buchen-BSH mit homogenem Querschnittsaufbau im Vergleich zu den Versuchsergebnissen konservative charakteristische Druckfestigkeiten von 45.0 MPa (GL40h), 50.0 MPa (GL48h) und 55.0 MPa (GL55h) vorgeschlagen.

Hübner (2013) ermittelte in seinen Untersuchungen zur Querzugfestigkeit von Buchen-BSH einen 5%-Fraktilwert der Querzugfestigkeit von $f_{t,90,05} = 2.2$ MPa. Um bei Konstruktionen mit Buchen-BSH möglichst keine planmässigen Querzugbeanspruchungen zu fördern, wird die Festlegung eines sehr konservativen Wertes empfohlen. Entsprechend den Werten in der EN 14080 (2013) wird eine charakteristische Querzugfestigkeit von $f_{t,90,k} = 0.5$ MPa unabhängig von der Festigkeitsklasse vorgeschlagen.

Für die Querdruckfestigkeit wird von Hübner (2013) ein 5%-Fraktilwert von $f_{c,90,05} = 7.2$ MPa bei einer Holzfeuchte von 12% festgestellt. Da das Querdruckversagen im Gegensatz zum Querzugversagen sehr duktil ist, muss hier kein stark konservativer Wert vorgesehen werden. Den Ausführungen Hübners folgend, kann mit einer Erhöhung der Querdruckfestigkeit um 2.5% je abnehmendem Feuchteprozent gerechnet werden. Da sich die mechanischen Eigenschaften im gesamten Projekt auf eine Holzfeuchte von $u = 8 \pm 2\%$ beziehen, wäre also eine Erhöhung des von Hübner ermittelten Wertes um rund 10% auf etwa 8.0 MPa angezeigt. Wegen fehlender Erfahrungen mit dem Langzeitverhalten von querdruckbeanspruchtem Buchen-BSH auf der einen Seite, aber einem duktilen Versagensverhalten auf der anderen Seite, wird eine charakteristische Querdruckfestigkeit von $f_{c,90,k} = 6.0$ MPa vorgeschlagen. Basierend auf den von Hübner ermittelten Querdruckbeiwerten von $k_{c,90} = 1.2$ bzw. $k_{c,90} = 1.5$ wird vorgeschlagen, bei einseitigem bzw. beidseitigem Vorholz die Querdruckfestigkeit mit $f_{c,90,k} = 7.2$ MPa ($= 1.2 \times 6.0$) bzw. $f_{c,90,k} = 9.0$ MPa ($= 1.5 \times 6.0$) anzugeben.

Hübner (2013) gibt für die mittleren Druck und Zug E-Moduln rechtwinklig zur Faserrichtung von Buchen-BSH Werte von $E_{c,90,mean} = 1'050$ MPa bzw. $E_{t,90,mean} = 1'240$ MPa an. Die berichteten 5%-Fraktilwerte liegen bei $E_{c,90,05} = 630$ MPa bzw. $E_{t,90,05} = 1'080$ MPa. Den Ausführungen Hübners folgend, kann mit einer Erhöhung der Querdruckfestigkeit um 1.9% je abnehmendem Feuchteprozent gerechnet werden. Da sich die mechanischen Eigenschaften im gesamten Projekt auf eine Holzfeuchte von $u = 8 \pm 2\%$ beziehen, wäre also eine Erhöhung der von Hübner ermittelten Werte um rund 8% auf $E_{c,90,mean} = 1'130$ MPa bzw.

$E_{t,90,mean} = 1'340 \text{ MPa}$ angezeigt. Es wird vorgeschlagen, einen einheitlichen E-Modul rechtwinklig zur Faserrichtung von $E_{90,mean} = 1'100 \text{ MPa}$ bzw. $E_{90,05} = 650 \text{ MPa}$ vorzusehen.

In den experimentellen Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Schubfestigkeit von Buchen-BSH stark von der Prüfkonfiguration (Systemeffekt) und dem beanspruchten Volumen (Grösseneffekt) abhängt. Schubfestigkeiten zwischen 8.2 und 17.4 MPa wurden ermittelt. Als Basiswert für die charakteristische Schubfestigkeit wird ein Wert von $f_{v,k} = 6.0 \text{ MPa}$ vorgeschlagen. In Abhängigkeit der Trägerhöhe sollte dieser Wert gegebenenfalls gemäss der im Kapitel 8.3 vorgeschlagenen Gleichung reduziert werden, um dem Grösseneffekt Rechnung zu tragen.

Basierend auf den 71 experimentellen Schubfeldmessungen wird ein mittlerer Schubmodul von $G_{mean} = 1'100 \text{ MPa}$ (Versuchsergebnis: 1'170 MPa) und ein 5%-Fraktilwert von $G_{05} = 900 \text{ MPa}$ (Versuchsergebnis: 970 MPa) vorgeschlagen.

In Ehrhart et al. (2015, 2018) und Aicher et al. (2016) wird mit guter Übereinstimmung von mittleren Rollschubfestigkeiten von Buchenholz von 5.4 bzw. 6.0 MPa berichtet und ein 5%-Fraktilwert von 4.6 bzw. 4.5 MPa angegeben. Wegen des spröden Bruchverhaltens, einem naheliegenden Grösseneffekt und fehlenden Untersuchungen betreffend des Langzeitverhaltens wird ein charakteristischer Wert der Rollschubfestigkeit von $f_{r,k} = 2.5 \text{ MPa}$ für Buchen-BSH zur Diskussion gestellt.

Auch hinsichtlich des Rollschubmoduls sind die von Ehrhart et al. (2015, 2018) und Aicher et al. (2016) ermittelten Ergebnisse sehr ähnlich. Mittlere Rollschubmoduln von 360 bzw. 370 MPa bei einer Holzfeuchte von 12% werden berichtet; in Ehrhart et al. (2015, 2018) wird ein 5%-Fraktilwert von 290 MPa angegeben. Aus Sicht der Autoren konservative Werte für den Rollschubmodul von Buchen-BSH von $G_{r,mean} = 300 \text{ MPa}$ und $G_{r,05} = 250 \text{ MPa}$ werden zur Diskussion gestellt.

Die Rohdichte wird in der Festigkeitssortierung nicht berücksichtigt, da im Modul 2 (Steiger & Ehrhart, 2016) kein signifikanter Einfluss der Rohdichte auf die Zugfestigkeit festgestellt wurde. Ebenso wurden bei den Buchen-BSH Prüfkörpern verschiedener Festigkeitsklassen keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Dichte festgestellt. Basierend auf Untersuchungen am Rohmaterial und Buchen-BSH wird unabhängig von der Festigkeitsklasse bei einer Holzfeuchte von $u = 8 \pm 2\%$ eine mittlere Rohdichte von $\rho_{8,mean} = 690 \text{ kg/m}^3$ und ein 5%-Fraktilwert von $\rho_{8,k} = 660 \text{ kg/m}^3$ vorgeschlagen.

Modul 6

Zusätzliche wesentliche Grundlagen für die Bemessung von Bauteilen aus
Buchen-BSH

6 Inhalte und Ziele von Modul 6

Neben den im Modul 5 definierten mechanischen Eigenschaften, sind ergänzende Festlegung für die Bemessung von Bauteilen aus Buchen-BSH erforderlich. Das Projekt-Modul 6 umfasst die Definition bzw. den Vorschlag zusätzlicher wesentlicher Grundlagen für die Bemessung von Bauteilen aus Buchen-BSH.

Das Knickverhalten von Stützen aus Buchen-BSH wird experimentell und numerisch untersucht. Basierend auf den Ergebnissen werden die derzeit für BSH gültigen und in nationalen (SIA 265, 2012) und europäischen Normen (Eurocode 5, 2010) enthaltenen Knickkurven auf ihre Anwendbarkeit und Gültigkeit für Buchen-BSH überprüft.

Der Einfluss des beanspruchten Volumens auf die Biege- und Schubfestigkeit wird basierend auf den Versuchsergebnissen aus Modul 4 und ergänzenden numerischen Analysen untersucht und quantifiziert. Bemessungsregeln in Anlehnung an bestehende Konzepte für Nadelholz BSH, enthalten in nationalen (SIA 265, 2012) und europäischen Normen (EN 1995-1-1, 2010) werden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Gültigkeit für Buchen-BSH überprüft.

Weitere wesentliche Grundlagen für die Bemessung von Buchen-BSH sind der Verhältniswert γ_M/η_M , der Einfluss der Holzfeuchte, der Einfluss der Dauer der Lasteinwirkung sowie das Brandverhalten.

7 Knickverhalten von Buchen-BSH

7.1 Einleitung

Die Stabilität von Druckstäben wird gemäss Norm SIA 265 (2012) und Eurocode 5 (2010) mit dem Ersatzstabverfahren (englisch: Effective Length Method, ELM) überprüft. Voraussetzung dafür ist eine planmässig zentrische Belastung und die Einhaltung der Begrenzung bezüglich Geradheit. In der Norm SIA 265 (2012) wird gemäss Ziffer 8.2.5 eine zulässige maximale Abweichung von der Geraden bezogen auf die Länge von $L/500$ für BSH definiert. Darüberhinausgehende Vorverformungen, die zu einer Erhöhung des Biegemoments und zu einer Reduktion der Traglast führen, sind im Knicknachweis zu berücksichtigen.

Im Stabilitätsnachweis wird dabei die Druckspannung mit der um den Knickbeiwert k_c reduzierten Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung verglichen (Gleichung 1). Für die Bestimmung des Knickbeiwertes wird zunächst die relative Schlankheit λ_{rel} bestimmt (Gleichung 4), welche von der Schlankheit λ und dem Verhältnis zwischen Druckfestigkeit ($f_{c,0}$) und Elastizitätsmodul ($E_{c,0}$) abhängt. Für die nachfolgende Berechnung des Hilfsbeiwerts k werden der Imperfektionsbeiwert β_c und die kritische relative Schlankheit $\lambda_{rel,0}$ herangezogen (Gleichung 3).

$$\sigma_{c,0,d} \leq k_c \cdot f_{c,0,d} \quad (1)$$

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} \quad (2)$$

$$k = 0.5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - \lambda_{rel,0}) + \lambda_{rel}^2] \quad (3)$$

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (4)$$

In der Norm SIA 265 (2012) und im Eurocode 5 (2010) sind hierbei Werte von 0.10 ($= \beta_c$) bzw. 0.30 ($= \lambda_{rel,0}$) für BSH definiert. Beide Werte wurden anhand von Untersuchungen an Nadelholz BSH, und damit für Festigkeit-zu-Steifigkeit Verhältnisse von etwa $f_{c,0}/E_{c,0} = 1/370$ – $1/420$, kalibriert (Blaß, 1987). Da im Vergleich zu Nadelholz die Druckfestigkeit von Buchen-BSH deutlich stärker zunimmt (etwa + 70%) als der E-Modul (etwa + 20%), ergibt sich für Buchen-BSH ein signifikant geändertes Festigkeit-zu-Steifigkeit Verhältnis von rund 1/250. Es stellt sich daher die Frage, ob die in der Norm SIA 265 (2012) und im Eurocode 5 (2010) angegebenen Werte für β_c und $\lambda_{rel,0}$ eine korrekte Bemessung von knickgefährdeten Druckstäben aus Buchen-BSH erlauben.

7.2 Experimentelle Untersuchungen

Zur Überprüfung des Knickverhaltens von Buchen-BSH und der normativ vorgeschriebenen Knickkurven wurden experimentelle Versuche an gedrungenen (Abbildung 9a) und schlanken Stützen mit Knicklängen von 2'400 mm und 3'600 mm (Abbildung 9b-d) durchgeführt. Die Versuchsaufbauten und -Abläufe sind im technischen Schlussbericht zum Modul 4 (Steiger & Ehrhart, 2018) detailliert beschrieben.

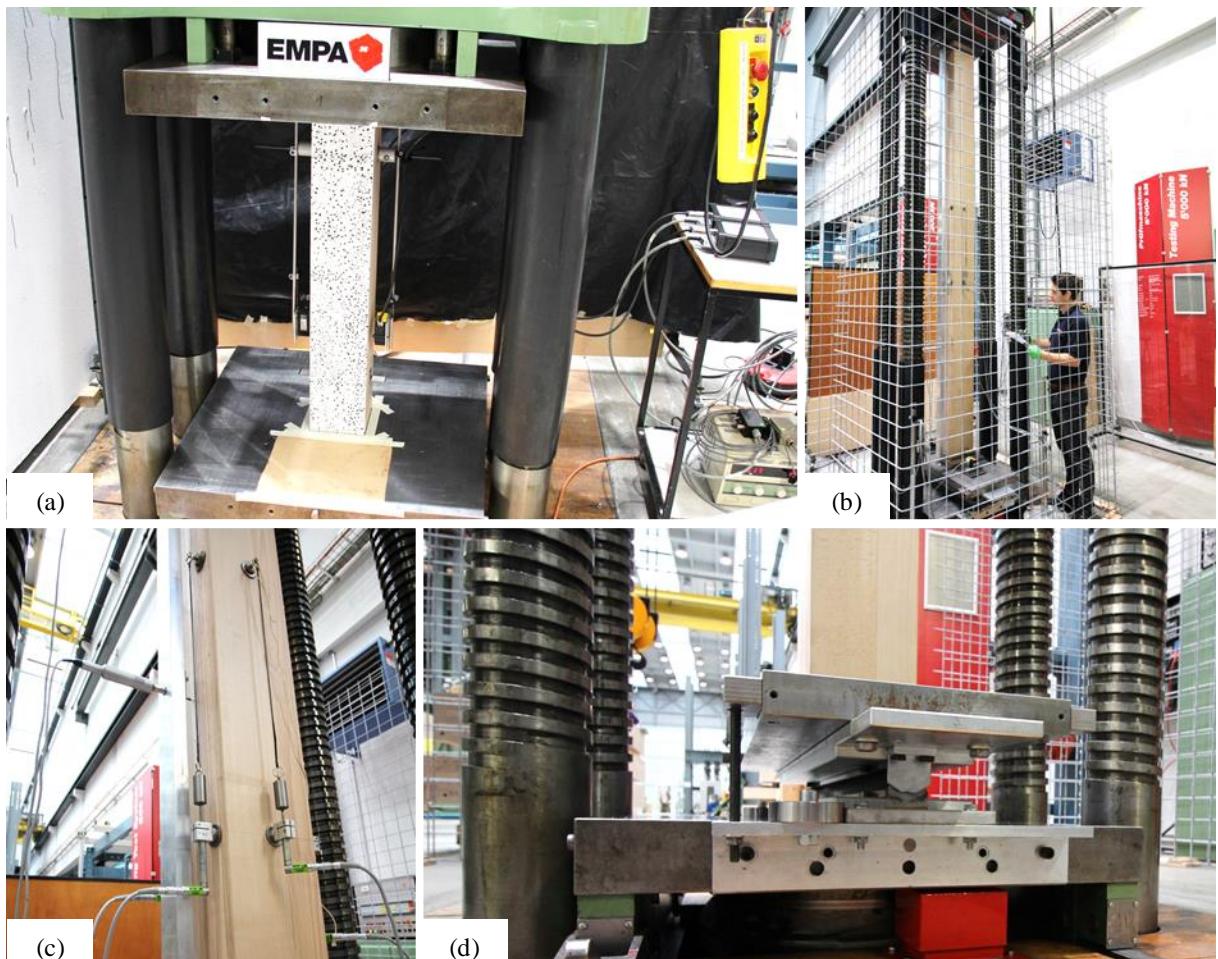


Abbildung 9: Druckversuch nach EN 408 (2012) einer gedrungenen Stütze (a), Knickversuch einer Stütze mit einer Länge von 3'600 mm (b), Messsysteme zur Bestimmung der Längsdehnung und der horizontalen Verformung (c) und gelenkige Lagerung der Stütze (d).

7.3 Numerische Untersuchungen

Ergänzend zu den experimentellen Untersuchungen an knickgefährdeten Stützen, wurden numerische Simulationen zur Stabilität von axial auf Druck beanspruchten Stützen aus Buchen-BSH durchgeführt. Dazu wurde der von Theiler (2014) entwickelte Programmcode adaptiert. Das von Theiler (2014) verwendete Materialgesetz zur Beschreibung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung unter Druckbeanspruchungen nach Glos (1978) wurde durch die von Glos (2004) für Buchenholz vorgeschlagenen Formeln (Gleichungen 5-9) ersetzt. Des Weiteren wurde anstelle der von Theiler (2014) verwendeten konstanten Exzentrizität von $e = 15$ mm eine längenabhängige Exzentrizität von $e = L/500$ implementiert, was den Vorgaben der Normen SIA 265 (2012) und Eurocode 5 (2010) entspricht.

$$\sigma = \frac{\varepsilon + k_1 \cdot \varepsilon^4}{k_2 + k_3 \cdot \varepsilon + k_4 \cdot \varepsilon^4} \quad (5)$$

$$k_1 = \frac{f_{c,m,u,0}}{3 \cdot E_{c,0} \cdot \varepsilon_{c,0}^4 \cdot \left(1 - \frac{f_{c,m,u,0}}{f_{c,m,0}}\right)} \quad (6) \quad k_2 = \frac{1}{E_{c,0}} \quad (7)$$

$$k_3 = \frac{1}{f_{c,m,0}} - \frac{4}{3 \cdot E_{c,0} \cdot \varepsilon_{c,0}} \quad (8) \quad k_4 = \frac{1}{3 \cdot E_{c,0} \cdot \varepsilon_{c,0}^4 \cdot \left(1 - \frac{f_{c,m,u,0}}{f_{c,m,0}}\right)} \quad (9)$$

Der Parameter β_ε , der als Faktor zwischen Gesamtdehnung bei Erreichen der Druckfestigkeit $f_{c,m,0}$ und der elastischen Dehnung bei dieser Spannung ($=f_{c,m,0}/E_{c,0}$) verstanden werden kann, wurde O'Halloran (1973) folgend, zu $\beta_\varepsilon = 1.25$ festgelegt (Gleichung 10). Zur Ermittlung der Restfestigkeit $f_{c,m,u,0}$ (Gleichung 11) wurde Hartnack (2004) folgend, der Parameter β_f mit 0.85 festgelegt.

$$\varepsilon_{c,0} = \beta_\varepsilon \cdot \frac{f_{c,m,0}}{E_{c,0}} = 1.25 \cdot \frac{f_{c,m,0}}{E_{c,0}} \quad (10) \quad f_{c,m,u,0} = \beta_f \cdot f_{c,m,0} = 0.85 \cdot f_{c,m,0} \quad (11)$$

In Monte-Carlo Simulationen wurden jeweils 100 Stützen der Festigkeitsklasse GL48h mit Längen von 720, 1'200, 1'800, 2'400, ..., 6'600, 7'200 mm und einem Querschnitt von 200×200 mm² untersucht (8 Lamellen je Stütze, keine Längsstösse). Die Druckfestigkeit und der E-Modul der Bretter der Stützen wurden dabei anhand der von Ehrhart (2019) angegebenen Formeln (Gleichung 12 und 13) mit zugehörigen Fehlertermen simuliert.

$$f_{c,m,0} = \exp(2.61 + 1.45 \cdot 10^{-3} \cdot \rho + 2.90 \cdot 10^{-5} \cdot E_{dyn} + \varepsilon_{f_{c,0}}) \quad (12)$$

$$E_{c,0} = E_{t,0} = E_m = \exp(8.67 + 5.80 \cdot 10^{-5} \cdot E_{dyn} + \varepsilon_{E_{c,0}}) \quad (13)$$

In der Abbildung 10 sind die experimentell ermittelten Druckfestigkeiten bzw. Knickspannungen für die Prüfkörper der Festigkeitsklasse GL48h (schwarze Dreiecke) und die Simulationsergebnisse (graue Kreuze) in Abhängigkeit der Schlankheit dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Ergebnisse aus den Versuchen und Simulationen sowohl für die gedrungenen Stützen (Schlankheit $\lambda = 12.5$, $\Delta = -1.7\%$) als auch für die Schlankheiten $\lambda = 41.5$ ($\Delta = +3.1\%$) und $\lambda = 62.3$ ($\Delta = +2.4\%$) im Mittel sehr gut übereinstimmen.

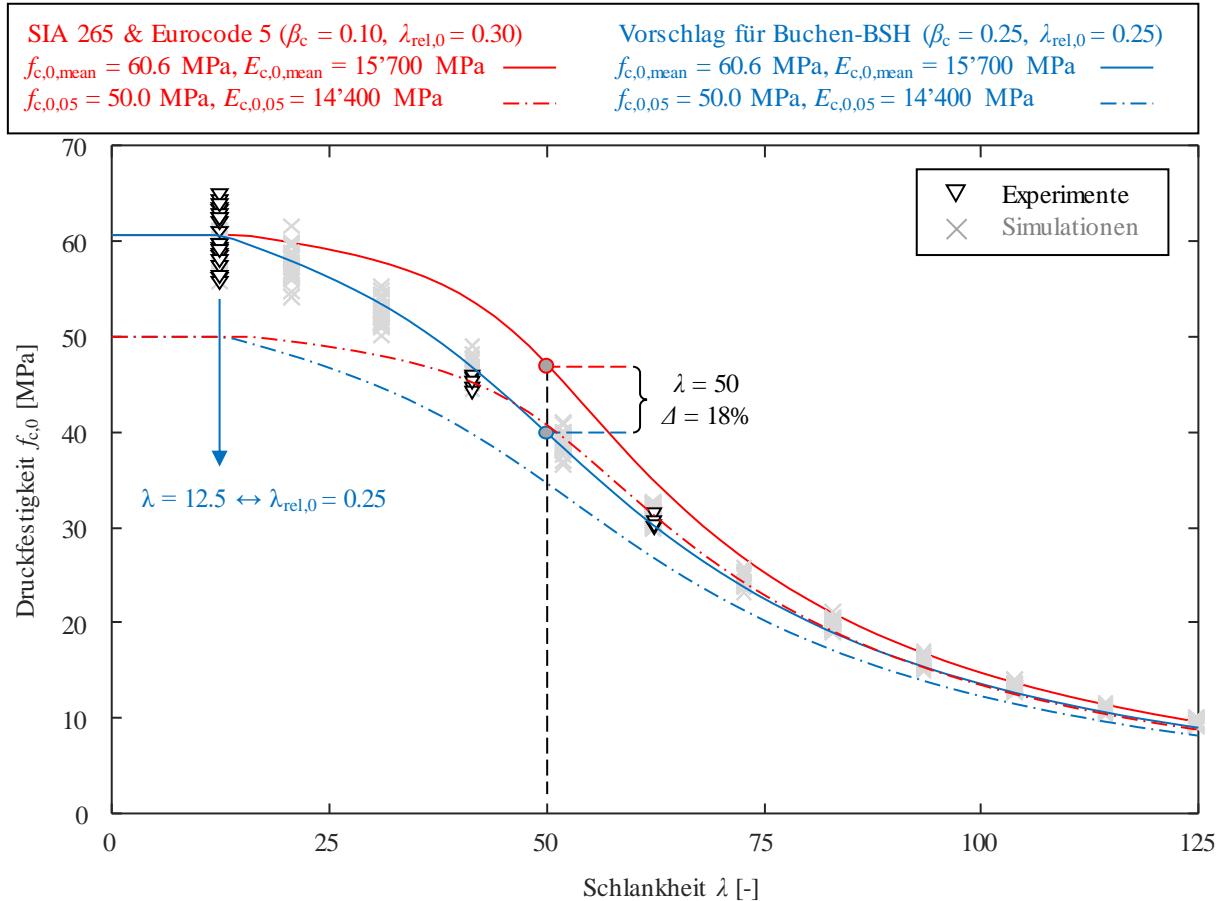


Abbildung 10: Experimentell (Dreiecke) und numerisch (Kreuze) ermittelte Druckfestigkeiten für verschiedene Schlankheiten λ . Eine Bemessung nach Eurocode 5 (2010) bzw. SIA 265 (2012) (rote Kurven) führt zu einer Überschätzung der Traglast um bis zu 18%. Für Buchen-BSH wird eine angepasste Kurve (blau) vorgeschlagen.

7.4 Angepasste Knickkurve für Buchen-BSH

Wird das Ersatzstabverfahren gemäss Norm SIA 265 (2012) bzw. Eurocode 5 (2010) (Gleichungen 1-4) mit den für BSH vorgesehenen Parametern $\beta_c = 0.10$ und $\lambda_{rel,0} = 0.30$ auf Mittelwert-Niveau ($f_{c,0,mean} = 60.6$ MPa, $E_{c,0,mean} = 15'700$ MPa) angewendet, so ergibt sich eine deutliche Überschätzung der tatsächlichen Traglasten, die in den experimentellen Versuchen und den Simulationen festgestellt wurden (Abbildung 10, rote durchgezogene Kurve). Insbesondere in dem baupraktisch relevanten Bereich von $30 \leq \lambda \leq 80$ beträgt die Differenz bis zu (nicht konservative) 18%. Selbst wenn die in der Tabelle 4 für Buchen-BSH der Festigkeitsklasse GL48h vorgeschlagene charakteristische Festigkeit von $f_{c,0,k} = 50.0$ MPa und der 5%-Fraktilwert des E-Moduls von $E_{c,0,05} = 14'400$ MPa angesetzt werden, liegen die nach den Normen SIA 265 (2012) und Eurocode 5 (2010) geschätzten Fraktilwerte der Tragfähigkeiten (Abbildung 10, rote strichlierte Kurve) für Schlankheiten über 45 über den in den Versuchen und Simulationen festgestellten mittleren (!) Festigkeiten.

Um eine korrekte Bemessung von stabilitätsgefährdeten Druckstäben aus Buchen-BSH sicherzustellen, wird daher eine Anpassung der Parameter β_c und $\lambda_{rel,0}$ empfohlen. Basierend auf den experimentellen und numerischen Untersuchungen werden die Parameter $\beta_c = 0.25$ und $\lambda_{rel,0} = 0.25$ vorgeschlagen (Abbildung 10, blaue Kurven).

8 Grösseneinfluss auf die mechanischen Eigenschaften

8.1 Einleitung

Aufgrund der natürlich variierenden Materialeigenschaften unterliegt die Festigkeit von Holz generellem einem Grösseneffekt. Mit der von Weibull (1939) aufgestellten «Weakest Link Theory» lässt sich der Grösseneinfluss auf die Festigkeitseigenschaften erklären.

In der Schweizerischen Norm zur Bemessung von Holzbauten SIA 265 (2012) und im europäischen Normenwerk Eurocode 5 (2010) wird dem Einfluss der Bauteilgrösse auf die Festigkeiten zumindest teilweise Rechnung getragen. Gemäss Norm SIA 265 (2012), Abschnitt 3.4.2.3 «[...] dürfen die Bemessungswerte der Biegefestigkeit $f_{m,d}$ [...] bei einer Bauteilgrösse von weniger als 600 mm mit dem Beiwert k_h vergrössert werden.» Gemäss Eurocode 5 (2010), Abschnitt 3.3 (3) ist dies darüber hinaus auch für die Zugfestigkeit zulässig. Dadurch ergibt sich im Vergleich zur Referenzhöhe von 600 mm eine Erhöhung der Biegefestigkeit (und Zugfestigkeit) um bis zu (begrenzt) 10%. Hingegen ist für Bauteile mit grösseren Querschnittshöhen gemäss Norm SIA 265 (2012) und Eurocode 5 (2010) keine Abminderung der Biegefestigkeit erforderlich.

Das experimentelle Prüfprogramm in Modul 4 wurde derart gestaltet, dass Rückschlüsse auf den Grösseneffekt bei Biegebeanspruchung von Buchen-BSH möglich sind. Im Kapitel 8.2 wird basierend darauf, und unter Einbindung der Ergebnisse der numerischen Simulationen, ein Vorschlag zur Berücksichtigung des Grösseneinflusses bei Biegung präsentiert.

Trotz zahlreicher Untersuchungen, die einen signifikanten Einfluss des Grösseneffektes auch auf die Schubfestigkeit von Nadelholz-BSH und Vollholz bestätigt haben (u.a. Keenan, 1974; Longworth, 1977; Foschi & Barrett, 1980; Colling, 1986; Soltis & Rammer, 1994; Rammer et al., 1996; Gehri, 2010; Brandner et al., 2012), berücksichtigen derzeit weder die Norm SIA 265 (2012) noch der Eurocode 5 (2010) die Bauteilabmessungen in den Schubnachweisen.

Das experimentelle Prüfprogramm in Modul 4 wurde derart gestaltet, dass Rückschlüsse auf den Grösseneffekt bei Schubbeanspruchung von Buchen-BSH möglich sind. Im Kapitel 8.3 wird ein Vorschlag zur Berücksichtigung des Grösseneinflusses bei Schub präsentiert.

8.2 Grösseneinfluss auf die Biegefestigkeit von Buchen-BSH

Im Rahmen der Untersuchungen im Modul 4 wurden Biegeträger der Festigkeitsklasse GL48c mit Querschnittshöhen von $h = 200, 400, 600$ und 800 mm experimentell geprüft. Die Spannweite in den 4-Punkt Biegeprüfungen betrug jeweils $18 \times h$ und damit 3'600, 7'200, 10'800 und 14'400 mm. In den Versuchen wurde eine Abnahme der Biegefestigkeit mit zunehmender Trägerhöhe beobachtet (Abbildung 11 bzw. Tabelle 1). Die markant höheren Biegefestigkeiten, die für Träger der Querschnittshöhe $h = 200$ mm festgestellt wurden, wurden bereits im technischen Schlussbericht zum Modul 4 damit begründet, dass in diesen Trägern nur sehr wenige oder gar keine Keilzinkenverbindungen in der maximal beanspruchten Biegezone vorhanden waren.

Der Verlauf der mittleren Biegefestigkeit $f_{m,mean}$ lässt sich mit einer Exponentialfunktion und einem Exponenten von -0.22 beschreiben. Werden die Ergebnisse für die Trägerhöhe $h = 200$ mm nicht berücksichtigt, so ergibt sich ein Exponent von -0.12 (Abbildung 11).

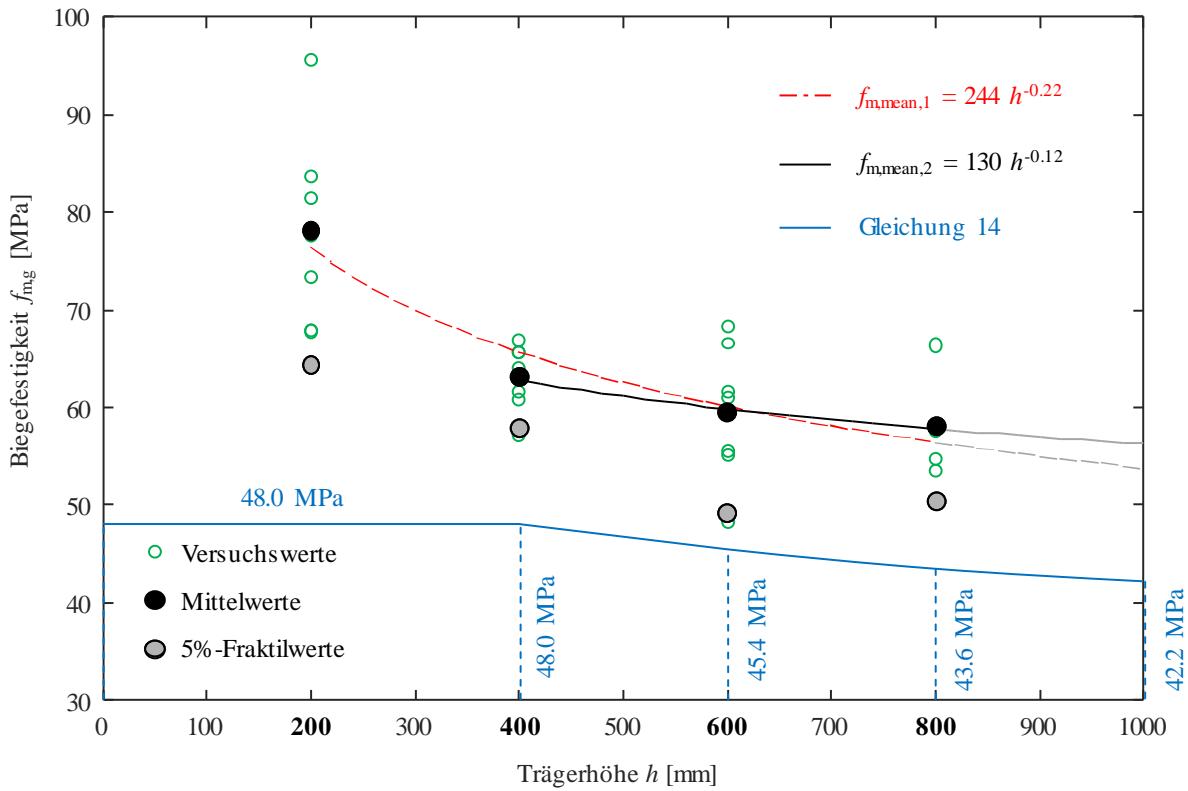


Abbildung 11: Experimentell ermittelte Biegefestigkeiten für Träger der Festigkeitsklasse GL48c und Trägerhöhen von 200, 400, 600 und 800 mm. Der Verlauf der Regressionskurven ändert sich bei Nichtberücksichtigung der Ergebnisse für $h = 200$ mm deutlich ($f_{m,mean,1} \rightarrow f_{m,mean,2}$). Blau dargestellt ist der Verlauf der vorgeschlagenen charakteristischen Biegefestigkeit in Abhängigkeit der Trägerhöhe.

Aufgrund der geringen Prüfkörperanzahl ($n = 7$ je Querschnittshöhe bzw. $n = 4$ für $h = 800$ mm) kann auf 5%-Fraktilwert Niveau keine plausible Funktion basierend auf den experimentellen Versuchen alleine definiert werden. Es werden deshalb die Ergebnisse aus den numerischen Simulationen herangezogen. Wie in der Abbildung 3 ersichtlich, wurde auch in den Simulationen eine Abnahme der Biegefestigkeiten mit zunehmender Trägerhöhe festgestellt. Für sämtliche Festigkeitsklassen GL40c, GL48c und GL55c nahm dabei der Mittelwert mit zunehmender Trägerhöhe deutlich stärker ab (Exponenten: -0.27/-0.27/-0.25) als der 5%-Fraktilwert (Exponenten: -0.13/-0.16/-0.13). Auch wenn der Absolutwert der in den Traglastsimulationen ermittelten Biegefestigkeiten rund 10% unter den experimentell ermittelten Werten liegt, so wird der Verlauf in Abhängigkeit der Trägerhöhe als plausibel erachtet.

Basierend auf den experimentellen und numerischen Untersuchungen wird Gleichung 14 zur Berücksichtigung des Größeneinflusses auf die Biegefestigkeit von Buchen-BSH zur Diskussion gestellt. Der Exponent «0.14» stimmt dabei mit jenem überein, der in der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-9.1-679 (2009) für Buchen-BSH verwendet wird.

$$f_{m,g,k} = \min \left\{ f_{m,g,k,ref} \cdot \left(\frac{400}{h} \right)^{0.14}; f_{m,g,k,ref} \right\} \quad (14)$$

Dabei wird die Referenzbiegefesteitigkeit $f_{m,g,k,ref}$ auf eine Referenzhöhe von $h = 400$ mm bezogen. Im Gegensatz zu den Vorgaben der Norm SIA 265 (2012) und des Eurocode 5 (2010) wird vorgeschlagen, die Biegefesteitigkeit für Trägerhöhen die die Referenzhöhe überschreiten, zu reduzieren und für niedrigere Trägerhöhen die Referenzbiegefesteitigkeit ohne Erhöhung anzusetzen.

Die vorgeschlagene Referenzhöhe von 400 mm weicht von der für Nadelholz-BSH definierten Referenzhöhe von 600 mm ab. Hauptgründe für diesen Vorschlag sind:

- Die mechanischen Eigenschaften von Buchen-BSH sind deutlich höher als jene von Nadelholz-BSH. Um im Vergleich zu einem Nadelholz-BSH Träger der Festigkeitsklasse GL24c mit einer Höhe von 600 mm denselben Biegewiderstand mit Buchen-BSH der Festigkeitsklasse GL48c zu erreichen, ist eine Trägerhöhe von rund 420 mm erforderlich. Um den gleichen Schubwiderstand zu erreichen, sind rund 350 mm, und um den gleichen Druckwiderstand parallel zur Faser zu erreichen, rund 300 mm erforderlich (bei konstanter Trägerbreite).
- Da die Festigkeitseigenschaften von Buchen-BSH im Vergleich zu Nadelholz-BSH deutlich stärker zunehmen als der E-Modul, wird der Einsatz von sehr hohen Biegeträgern aus Buchen-BSH im Vergleich zu Fachwerklösungen früher unwirtschaftlich. Es wird deshalb erwartet, dass Trägerhöhen von deutlich über 1'200 mm, wie sie für Nadelholz-BSH sehr häufig sind, mit Buchen-BSH nur selten realisiert werden.
- Wird die Referenzhöhe (bei gleicher Querschnittsbreite) von 600 auf 400 mm reduziert, so ergibt sich für Versuche gemäss Prüfnorm EN 408 (2012) eine Materialeinsparung von rund 60%. Um für Buchen-BSH auf einen annähernd gleichen Kenntnisstand wie er derzeit für Nadelholz-BSH gegeben ist zu kommen, werden zahlreiche weitere experimentelle Untersuchungen notwendig sein. Diese könnten durch eine Reduktion der Referenzhöhe deutlich vereinfacht bzw. beschleunigt werden.
- In der Task Group CEN/TC124/WG3/TG1, die sich mit der Erarbeitung einer Norm für BSH aus Laubholz beschäftigt, steht derzeit ausser Frage, dass für Laubholz-BSH eine geringere Referenzhöhe vorgesehen werden wird. In diesem Rahmen wird vielmehr diskutiert, ob diese Höhe für alle Laubholzarten identisch sein sollte. Auch sind deutlich geringere Referenzhöhen im Bereich von unter 300 mm in Diskussion. Die vorgeschlagene Höhe von 400 mm stellt hier einen Kompromiss zwischen den 600 mm für Nadelholz-BSH und den – aus Sicht der Autoren – zu niedrigen diskutierten Referenzhöhen von unter 300 mm dar und sollte für alle Laubholzarten gültig sein.

Auf der anderen Seite führt eine Reduktion der Referenzhöhe von 600 mm für Nadelholz-BSH auf 400 mm für Buchen-BSH zu einer schwierigeren Vergleichbarkeit der beiden Produkte. Ebenso könnte dies in den Bemessungsnormen SIA 265 und Eurocode 5 zu Situationen führen, die dem angestrebten «ease of use» – einer Vereinfachung der Anwendung – entgegenspricht.

Unter Berücksichtigung der genannten Pro und Contra Punkte zu einer Anpassung der Referenzhöhe sollte hier, international abgestimmt, eine Lösung angestrebt werden. Die vorhandenen Untersuchungen und Ergebnisse liessen jedenfalls auch eine Umformulierung der Gleichung 14 auf eine Referenzhöhe von 600 mm, oder jede andere beliebige Höhe, zu.

8.3 Grösseneinfluss auf die Schubfestigkeit von Buchen-BSH

Im Rahmen der Untersuchungen im Modul 4 wurden Schubprüfungen an Trägern der Festigkeitsklassen GL48c und GL55c mit Querschnittshöhen von $h = 200, 400$ und 600 mm durchgeführt. Dabei wurde ein ausgeprägter Einfluss der Prüfkörpergrösse bei Beibehaltung der Prüfkonfiguration festgestellt. Für Querschnittshöhen von 200 mm wurden Schubfestigkeiten zwischen 14.8 und 17.4 MPa ermittelt, für 400 mm zwischen 10.4 und 14.2 MPa und für 600 mm zwischen 8.2 und 11.3 MPa (Abbildung 12).

In der Literatur wird auch für Nadelholz-BSH und Vollholz ein signifikanter Grösseneinfluss auf die Schubfestigkeit beschrieben. Zur Quantifizierung des Grösseneffektes wurden dabei verschiedene Ansätze gewählt. In Brandner et al. (2012) wird eine Berücksichtigung basierend auf der Querschnittshöhe vorgeschlagen. Dabei werden eine Referenzhöhe von 150 mm und ein Exponent von 0.2 angegeben. Keenan (1974), Soltis & Rammer (1994), Rammer et al. (1996) und Gehri (2010) schlagen vor, die Schubfläche, d.h. das Produkt aus Querschnittsbreite und (hochbeanspruchter) Trägerlänge, zur Beschreibung des Grösseneffektes heranzuziehen. Longworth (1977), Foschi & Barrett (1980) sowie Colling (1986) schliesslich empfehlen, das schubbeanspruchte Volumen sowie die tatsächliche Spannungsverteilung zu berücksichtigen.

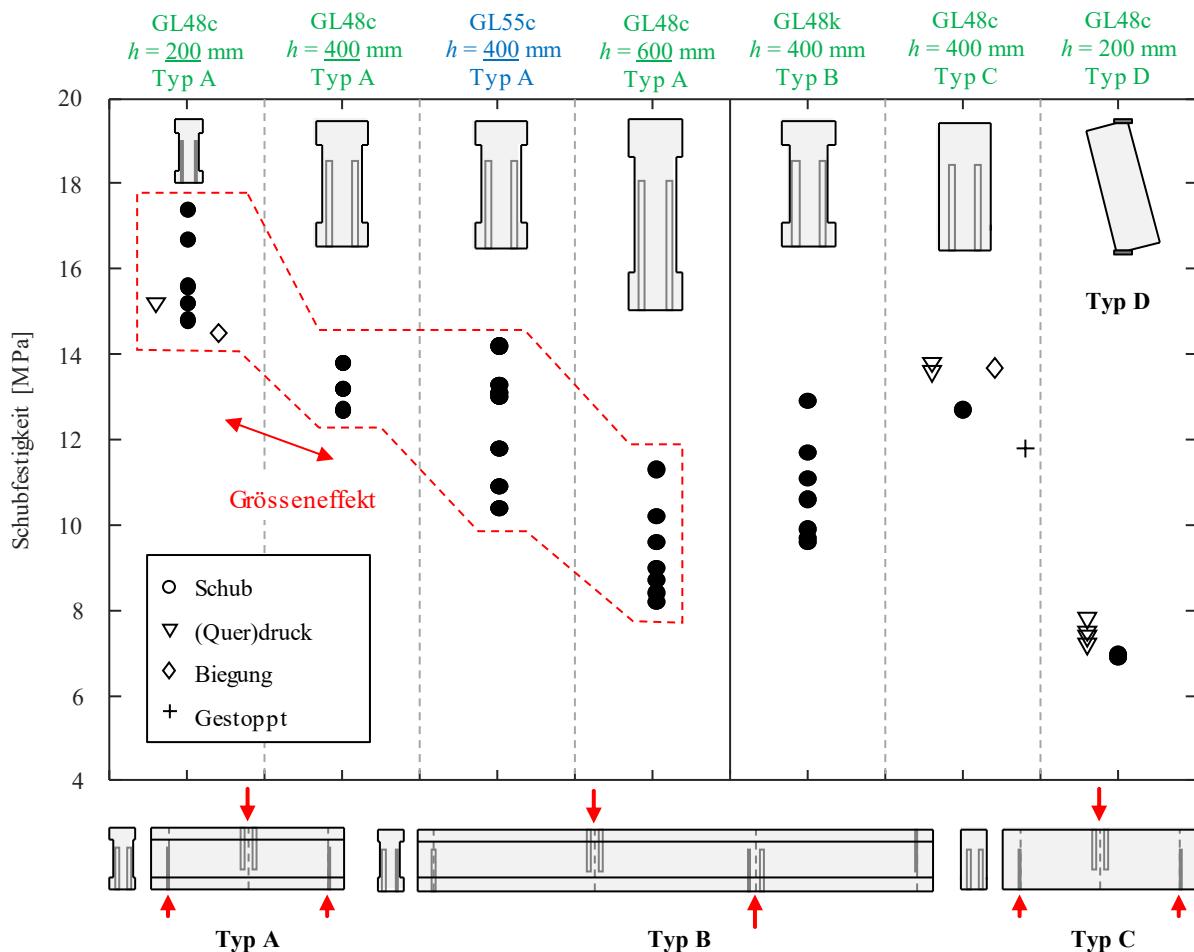


Abbildung 12: Schubfestigkeiten in Abhängigkeit der Festigkeitsklasse, Querschnittshöhe und Prüfkonfiguration (Typ). Die Ergebnisse der Prüfungen des Typs A mit Querschnittshöhen von $200, 400$ und 600 mm lassen auf einen ausgeprägten Grösseneffekt schliessen.

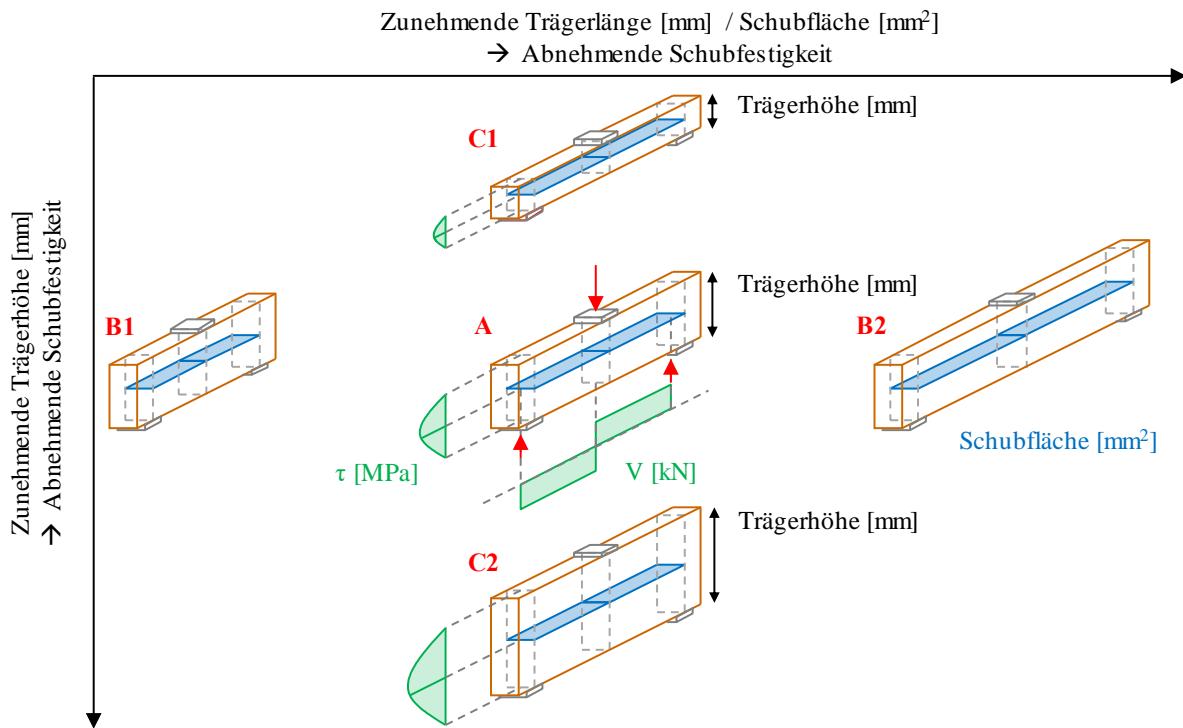


Abbildung 13: Schubfläche und schubbeanspruchtes Volumen in Abhängigkeit der Trägerhöhe und Trägerlänge. Zur Abbildung des Grösseneinflusses auf die Schubfestigkeit ist ein Ansatz basierend auf dem Volumen erforderlich.

Dass letzterer Ansatz basierend auf dem hochbeanspruchten Volumen für eine vollständige Abbildung des Grösseneinflusses am zielführendsten ist, soll anhand von Abbildung 13 verdeutlicht werden. Ausgehend von Träger A in Abbildung 13, nimmt die Schubfläche im Träger B1 bei gleicher Trägerhöhe ab, bei Träger B2 nimmt die Schubfläche zu. Der «Weakest Link Theory» (Weibull, 1939) folgend, nimmt die Schubfestigkeit von Träger B1 zu A und B2 kontinuierlich ab. Dieser Effekt lässt sich, wie von Keenan (1974), Soltis & Rammer (1994), Rammer et al. (1996) und Gehri (2010) vorgeschlagen, mit der Schubfläche berücksichtigen, nicht aber mit Modellen für einen höhenabhängigen Grösseneffekt. Wird umgekehrt ausgehend von Träger A die Trägerhöhe reduziert (Träger C1) bzw. erhöht (Träger C2), so ist eine Zu- bzw. Abnahme der Schubfestigkeit zu erwarten. Dieser Effekt lässt sich, wie von Brandner (2012) vorgeschlagen, mit der Trägerhöhe berücksichtigen, nicht aber mit Modellen für einen Schubflächen abhängigen Grösseneffekt.

In Ehrhart (2019) wurden die experimentellen Ergebnisse zur Schubfestigkeit in Abhängigkeit des hochbeanspruchten Volumens, d.h. jenes Volumens, in dem die Schubspannungen $2/3$ der maximalen Schubspannungen überschreiten, analysiert. Anschliessend wurden verschiedene statische Systeme untersucht und solche identifiziert, in denen unter Annahme eines Verhältnisses zwischen Biege- und Schubfestigkeit von 10:1 das Volumen maximal ist. Unter Annahme einer konservativ gewählten Trägerbreite von 180 mm lässt sich der Grösseneffekt basierend auf dem Volumen zur Gleichung 15, basierend auf der Trägerhöhe, umformulieren.

$$f_{v,g,k} = \min \left\{ 6.0 \cdot \left(\frac{400}{h} \right)^{0.40}; 6.0 \right\} \quad (15)$$

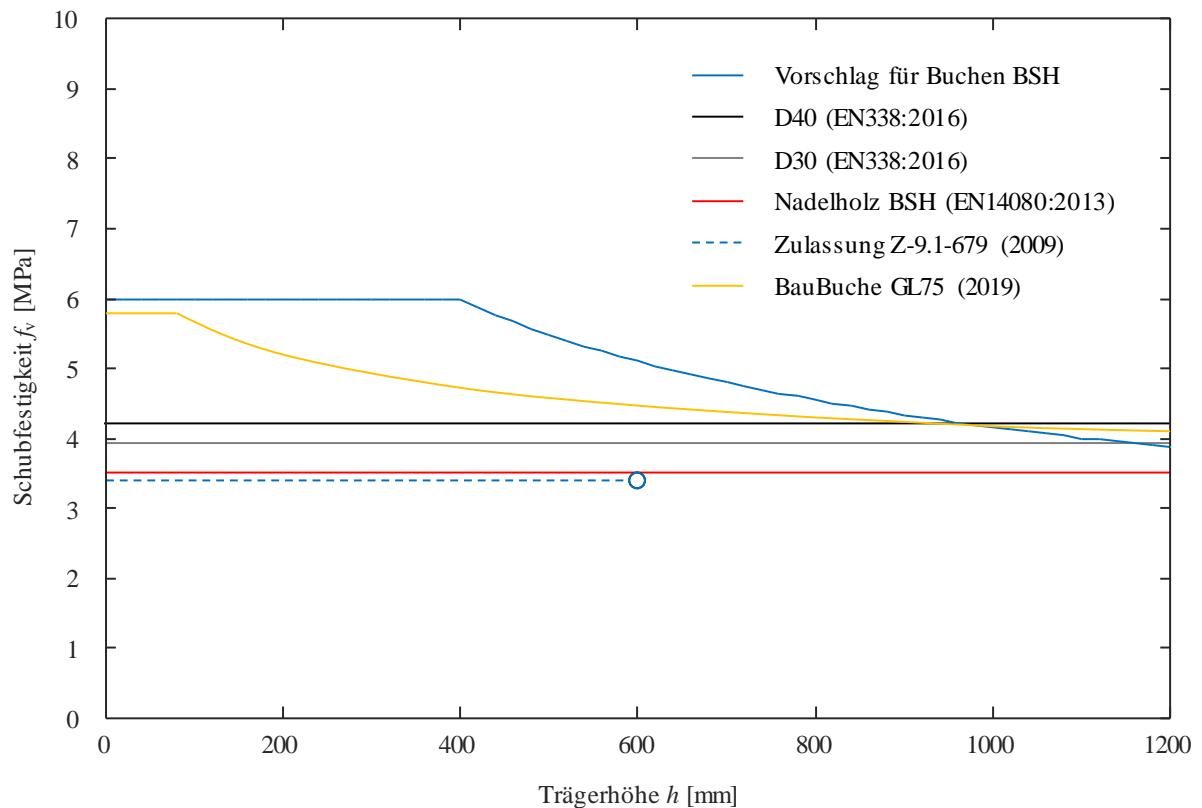


Abbildung 14: Für Buchen-BSH vorgeschlagene Schubfestigkeit f_v in Abhängigkeit der Trägerhöhe im Vergleich zur Schubfestigkeit von Nadelholz BSH gemäss EN 14080 (2013), Buchen Vollholz gemäss EN 338 (2016) und Zulassung Z-9.1-679 (2009).

In der Gleichung 15 wird, analog zum Vorschlag für die Biegefestigkeit, eine Referenzhöhe von 400 mm berücksichtigt. Als Referenzschubfestigkeit wird, unabhängig von der Festigkeitsklasse, ein Wert von $f_{v,k} = 6.0$ MPa zur Diskussion gestellt. Der vorgeschlagenen Gleichung folgend, ist für Trägerhöhen unter 400 mm die Referenzschubfestigkeit anzuwenden, bei grösseren Trägerhöhen erfolgt eine Reduktion der Schubfestigkeit (Abbildung 14).

In der Abbildung 14 ist der Verlauf der Schubfestigkeit in Abhängigkeit der Trägerhöhe gemäss Gleichung 15 grafisch dargestellt. Zum Vergleich sind die charakteristischen Werte der Schubfestigkeit für Nadelholz-BSH gemäss EN 14080 (2013) ($f_{v,k} = 3.5$ MPa), für Buchen-Vollholz der Festigkeitsklassen D30 und D40 gemäss EN 338 (2016) ($f_{v,k} = 3.9$ MPa bzw. $f_{v,k} = 4.2$ MPa), für BauBuche GL75 (Blaß & Streib, 2019) sowie der in der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-9.1-679 (2009) für Buchen-BSH vorgeschlagene Wert ($f_{v,k} = 3.4$ MPa) dargestellt.

9 Weitere wesentliche Grundlagen für die Bemessung

Neben den bisher beschriebenen charakteristischen Materialeigenschaften (Kapitel 5), den adaptierten Knickkurven (Kapitel 7) sowie den vorgeschlagenen Ansätzen zur Berücksichtigung des Grösseneinflusses auf die Biege- (Kapitel 8.2) und Schubfestigkeit (Kapitel 8.3), ist die Definition weiterer Parameter und Beiwerte zur Bemessung von Konstruktionen aus Buchen-BSH erforderlich. Nachfolgend werden diese Punkte diskutiert und jeweils ein Vorgehen bzw. Parameter vorgeschlagen. Da zu einigen Aspekten keine vertieften experimentellen oder theoretischen Untersuchungen für Buchen-BSH vorliegen, wird von den Autoren jeweils ein tendenziell konservatives Vorgehen vorgeschlagen, um zunächst (Langzeit-) Erfahrungen mit dem Produkt Buchen-BSH sammeln und sich der vollen Ausnutzung des Potentials von der sicheren Seite nähern zu können.

9.1 Verhältniswert γ_M/η_M

Im Bauwesen wird zur Bemessung von Tragkonstruktionen das semi-probabilistische Teilsicherheitskonzept verwendet. Dabei werden die statistischen Verteilungen und die zugehörigen Teilsicherheiten auf der Einwirkungs- und der Widerstandsseite getrennt erfasst. Während die einwirkungsbezogenen Teilsicherheitswerte materialunabhängig sind, hängt der Teilsicherheitsbeiwert auf der Widerstandsseite von den Materialeigenschaften und deren statistischen Verteilungen ab.

In der Norm SIA 265 (2012) wird der Widerstandsbeiwert γ_M zur Berücksichtigung von Unschärfen im Widerstandsmodell und ungünstiger Abweichungen des Tragwiderstands vom charakteristischen Wert verwendet (Steiger, 2003). In Kombination mit dem Umrechnungsfaktor für den Tragwiderstand (η_M), mit welchem die Umrechnung auf für Bauteile und Verbindungen geltende Bedingungen erfolgt, werden in der Norm SIA 265 (2012) Verhältniswerte γ_M/η_M für verschiedene Bauteile und Verbindungen definiert (Tabelle 5). Für Bauteile aus qualitätsgesichertem Brettschichtholz und maschinell sortiertem Vollholz wird dabei in der Norm SIA 265 (2012) ein Verhältnis von $\gamma_M/\eta_M = 1.5$ angegeben.

Da es sich bei dem im vorliegenden Projekt beforschten Produkt bei Einhaltung der in Modul 2 (Verarbeitung des Rohmaterials und Festigkeitssortierung) und Modul 3 (Keilzinkenverbindungen und Delaminierungsverhalten) definierten Vorgaben, sowie bei Erfüllung der auch für Nadelholz-BSH geltenden Anforderungen hinsichtlich Qualitätskontrolle und Überwachung, jedenfalls um «qualitätsgesichertes Brettschichtholz» handelt, ist aus Sicht der Autoren ein Verhältniswert von $\gamma_M/\eta_M = 1.5$ auch für Buchen-BSH anzusetzen.

Tabelle 5: Verhältniswerte γ_M/η_M gemäss SIA 265 (2012), Tabelle 1.

Bauteile und Verbindungen	γ_M/η_M
Bauteile aus	
– Rund- und Vollholz, vollholzähnliche Produkte generell	1.7
– qualitätsgesichertem Brettschichtholz, maschinell sortiertem Vollholz	1.5
– Holzwerkstoffen	siehe Norm SIA 265/1
Verbindungen mit	
– Vollholz, Brettschichtholz	
– generell	1.7
– falls Duktilitätsmaß $D_s \geq 3$ (gemäss Ziffer 6.1.2.3)	1.5
– Holzwerkstoffen	siehe Norm SIA 265/1

9.2 Einfluss der Holzfeuchte

Die Holzfeuchte hat einen Einfluss auf die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Holz und muss deshalb bei der Bemessung berücksichtigt werden. In der Norm SIA 265 (2012), Abschnitt 3.2.1.2 sind die Feuchteklassen 1, 2 und 3 und zugehörige mittlere (Ausgleichs-) Holzfeuchten definiert (Tabelle 6). Im Rahmen des Projektes wurde vereinbart, dass für Buchen-BSH zunächst nur die Nutzung in Feuchtekasse 1 angestrebt und damit verbunden, mittlere Holzfeuchten von $u \leq 12\%$ untersucht werden sollen.

Tabelle 6: Zuordnung der Bauteile zu Feuchteklassen gemäss SIA 265 (2012), Tabelle 3.

Feuchtekasse	Mittlere Holzfeuchte ¹⁾	Zuordnung der Bauteile
1	$\leq 12\%$	vor der Witterung geschützt
2	12% bis 20%	teilweise vor der Witterung geschützt oder direkt bewittert
3	$> 20\%$	feucht oder unter Wasser

¹⁾ Die Werte dürfen während einiger Wochen im Jahr überschritten werden.

In der Norm SIA 265 (2012), Abschnitt 8.2.1 ist hinsichtlich der Holzfeuchte darüber hinaus folgende Vorgabe definiert:

«Vor der Verarbeitung ist das Holz in der Regel auf diejenige Ausgleichsfeuchte zu trocknen [...], die den Bedingungen im fertiggestellten und vereinbarungsgemäss genutzten Bauwerk entspricht.»

In einer Studie der Baudirektion Zürich (2007) wurden in jeweils 10 Wohnungen (i) ohne Lüftung, (ii) mit Lüftung sowie (iii) mit Lüftung und Befeuchter die Temperatur, die relative Feuchte und die Kohlendioxidkonzentration über einen Messzeitraum von 8 Wochen (Februar bis April 2017) aufgezeichnet. Dabei wurden mittlere relative Luftfeuchten von 42% (ohne Lüftung), 35% (mit Lüftung) bzw. 39% (mit Lüftung und Befeuchter) festgestellt (Abbildung 15). Drewes (1985) folgend, würde dies für Buche zu einer Ausgleichsfeuchte von $u = 9.0\%$, 8.2% bzw. 8.7% führen.

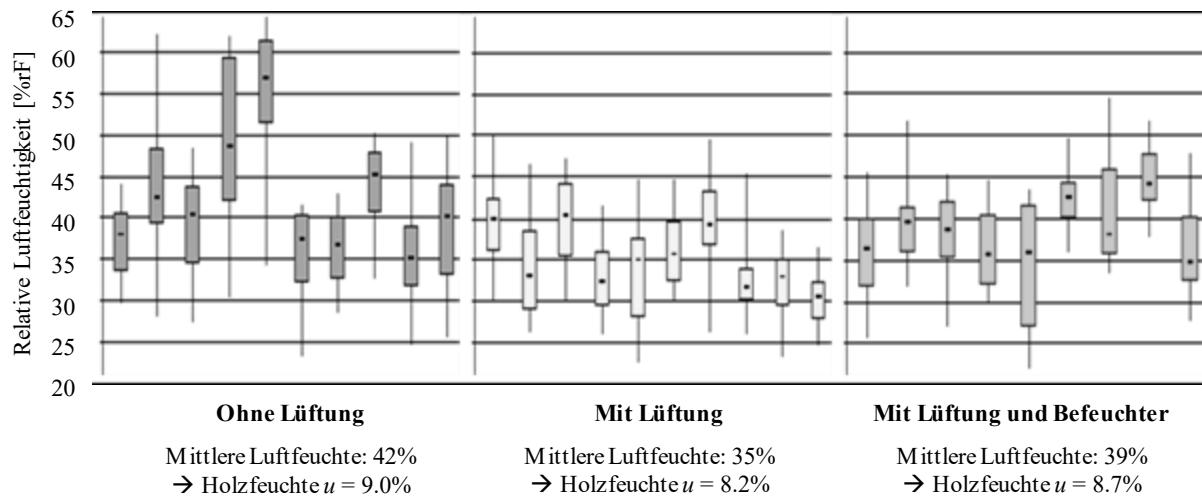


Abbildung 15: Gemessene relative Raumluftfeuchten, mittlere Luftfeuchte je Wohnungsklasse und resultierende Holzfeuchte. Grafik adaptiert aus Baudirektion Zürich (2007).

Generell ist in (beheizten) Wohn- und Büroneubauten regelmässig eine niedrige relative Luftfeuchte in einem Bereich von rund 30 bis 50% zu erwarten (Baudirektion Zürich, 2007). Die Herabtrocknung von BSH mit einer (Start-) Holzfeuchte von 12% oder mehr auf eine Ausgleichsfeuchte von unter 8% führt – unabhängig von der Holzart – zu einer Rissbildung. Für BSH aus Buche ist ob des ausgeprägten Quell- und Schwindverhalten dem Verhältnis zwischen Einbaufeuchte und Ausgleichsfeuchte bei vereinbarungsgemässer Nutzung besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Aufgrund der in der Norm SIA 265 (2012), Abschnitt 8.2.1 beschriebenen Vorgaben, wurde im Rahmen des Projektes deshalb eine Holzfeuchte in sämtlichen Untersuchungen und Prozessschritten von $u = 8 \pm 2\%$ vereinbart.

Gemäss Norm SIA 265 (2012), Abschnitt 3.2.1.1 ist in vor der Witterung geschützten Bauteilen, die sich in gut belüfteten, im Winter gut beheizten Räumen befinden, eine mittlere Holzfeuchte von $u = 9 \pm 3\%$ zu erwarten. Die in der Tabelle 1 für eine Holzfeuchte von $u = 8 \pm 2\%$ angegebenen charakteristischen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften haben aus Sicht der Autoren für diese Umgebungsbedingungen Gültigkeit.

Für höhere Umgebungs- und Holzfeuchten sollten die in der Tabelle 1 angegebenen Werte angepasst werden. In der EN 384 (2019) sind zur Korrektur der Druckfestigkeit ($f_{c,0}$), des E-Moduls parallel zur Faser (E_0) sowie der Rohdichte (ρ) die Gleichungen 16, 17 und 18 angegeben. Zwar ist Anwendung dieser Gleichungen nicht auf Nadelholz beschränkt, eine explizite Überprüfung für Buchen-BSH ist allerdings ausständig. Für die Biege- und Zugfestigkeit wäre demnach keine Korrektur erforderlich.

$$f_{c,0} = f_{c,0}(u) \cdot (1 + 0.03 \cdot (u - u_{\text{ref}})) \quad (16)$$

$$E_0 = E_0(u) \cdot (1 + 0.01 \cdot (u - u_{\text{ref}})) \quad (17)$$

$$\rho = \rho(u) \cdot (1 - 0.005 \cdot (u - u_{\text{ref}})) \quad (17)$$

Die in der Tabelle 1 angegebenen Eigenschaften rechtwinklig zur Faserrichtung und die Rollschubeigenschaften basieren bereits auf Untersuchungen bei einer Holzfeuchte von 12%, weshalb bei diesen Werten für Feuchteklaasse 1 keine Anpassungen erforderlich sind.

Wegen der im Vergleich zu Nadelholz-BSH erhöhten Empfindlichkeit gegenüber Feuchteänderungen sollte bei Buchen-BSH dem Transport und Bauprozess besondere Aufmerksamkeit zukommen. Eine, auch nur kurzfristige, direkte Bewitterung von Buchen-BSH kann zu einer nachhaltigen Schädigung durch Rissbildung und damit zu einer Reduktion von Steifigkeit und Festigkeit führen.

9.3 Einfluss der Dauer der Lasteinwirkung

In der Norm SIA 265 (2012), Abschnitt 3.2.2.2 wird für Vollholz und Brettschichtholz, das auf die Gebrauchsfeuchte vorkonditioniert wurde und in der Feuchteklaasse 1 eingesetzt wird, eine Kriechzahl von $\varphi = 0.6$ definiert. Die Gültigkeit dieses Wertes ist nicht auf Nadelholz beschränkt. In der ETA-14/0354 (2018) für Buchen Furnierschichtholz (BauBuche) werden k_{mod} und k_{def} Werte zur Berücksichtigung des Kriechverhaltens und der Dauer der Lasteinwirkung definiert, die mit den Werten von Nadelholz-BSH übereinstimmen. Es wird deshalb für Buchen-BSH ebenfalls eine Kriechzahl von $\varphi = 0.6$ vorgeschlagen.

Eine experimentelle Untersuchung des Langzeitverhaltens, insbesondere des Kriechverhaltens von hochbeanspruchten Stützen und Biegeträgern, ist anzustreben. Um die Festigkeitsvorteile von Buchen-BSH nutzen zu können, sollten Tragwerke aus Buchen-BSH vorzugsweise so ausgelegt werden, dass der Verformungsnachweis nicht massgebend wird, was die Bedeutung der Kriechzahl relativiert.

9.4 Bemessungssituation Brand

Im Projekt wurden keine experimentellen Untersuchungen zum Abbrandverhalten von Buchen-BSH durchgeführt. Zur Bemessung von Buchen-BSH in der Bemessungssituation Brand wird deshalb vorgeschlagen, die in Tabelle 7 gemäss Norm SIA 265 (2012) definierten Werte für die ideelle Abbrandrate β_n beizubehalten. Für BSH aus Buche ist dabei eine – im Vergleich zu anderen Laubholzarten höhere (ungünstigere) – Abbrandrate von $\beta_n = 0.7$ angegeben. Dieser Wert ist identisch mit der Abbrandrate für BSH aus Nadelholz.

Eine Überprüfung des Abbrandverhaltens von Buchen-BSH, insbesondere in Hinblick auf die Brandbeständigkeit der verwendeten Klebstofftypen, ist anzustreben.

Tabelle 7: Ideelle Abbrandrate β_n gemäss Norm SIA 265 (2012), Tabelle 9.

Baustoff	β_n in mm/Min.
Nadelholz oder Buche	0.8
	Brettschichtholz ¹⁾ 0.7
Eiche oder Robinie	0.5
Massivholzschalung	0.9
Holzwerkstoffe	Lignum-Dokumentation

¹⁾ Bei Einsatz von im Brandfall beständigen Klebstofftypen.

Für Modul 5 und 6 relevante Punkte

10 Deliverables in Modul 5 und 6

Im Frühlingssemester 2018 wurde durch D. Werlen (Werlen, 2018) eine Masterarbeit mit Konnex zum BAFU-Projekt und den Modulen 5 und 6 an der ETH verfasst. Diese beschäftigte sich mit der «Modellierung des Biegetragverhaltens von Brettschichtholz aus Buche».

Am dritten Treffen der Arbeitsgruppe *CEN/TC124/WG3/TG1 «EN Standard for Hardwood Glulam»* wurden die in der Tabelle 4 dieses Berichtes zusammengefassten mechanischen Eigenschaften von Buchen-BSH präsentiert und zur Diskussion gestellt.

Im Juli 2019 wurde die Dissertation «European beech glued laminated timber» erfolgreich von Th. Ehrhart verteidigt (Ehrhart, 2019). Die finale Version der Dissertation wird voraussichtlich im Oktober 2019 vorliegen.

Im Rahmen der Konferenz *6th Meeting of the International Network on Timber Engineering Research Meeting INTER* sind die Untersuchungen zum Thema Knickverhalten von Buchen-BSH präsentiert und diskutiert worden (Ehrhart et al., 2019a). Ziel in diesem Bereich ist die Berücksichtigung angepasster Knickkurven für Buchen-BSH bzw. BSH aus Laubholz allgemein in künftigen Versionen des Eurocode 5 (2010).

Im Rahmen der Konferenz *International Scientific Conference on Hardwood Processing ISCHP2019* wurde in einem gemeinsamen Beitrag mit M. Lehmann (BFH/AHB Biel) das gesamte Buchen-BSH Projekt im Überblick vorgestellt (Ehrhart et al. 2019b). Dieser Beitrag wird auch in einer Spezialausgabe im Journal *European Journal of Wood and Wood Products* publiziert werden (Ehrhart et al. 2019c).

11 Ausblick und weiteres Vorgehen

Im Oktober 2019 werden die Ergebnisse aus Modul 5 und 6, neben zahlreichen weiteren Beiträgen aus dem AP-Holz Projekt zu Buchen-BSH und Verbindungen in Buchen-BSH, am SWIN Fortbildungskurs 2019 zum Thema «Hochleistungswerkstoffe im Holzbau» in Weinfelden präsentiert. Geplanter Titel des Beitrags: «Mechanische Eigenschaften von Trägern und Stützen aus Buchen-BSH».

Eine Journal-Publikation zum Thema Knickverhalten von Buchen-BSH-Stützen ist in Planung. Darin sollen, unter Berücksichtigung der Diskussion und möglicher Kritikpunkte bei der Konferenz *6th Meeting of the International Network on Timber Engineering Research Meeting INTER*, die Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen aufbereitet und die Bemessungsvorschläge präsentiert werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen im Rahmen des AP-Holz Projektes zum Thema Buchen-BSH sollen in einer Lignatec Publikation aufbereitet werden. Die Vorbereitungen zu dieser Publikation laufen bereits. Neben Buchen-BSH sollen auch Buchen-Stabschichtholz, Kastanien-BSH, Eschen-BSH und Verbindungsmitte in Buche in der Lignatec Publikation behandelt werden. Eine Veröffentlichung der Publikation Ende 2020 wird angestrebt.

Im Herbst 2019 findet in München ein von der *Cluster-Initiative Forst und Holz in Bayern gGmbH* organisierter Workshop zum Thema «Eigenschaftsprofil von Buche für tragende Zwecke» statt. Eine Teilnahme und Präsentation der Projektergebnisse ist geplant.

Die Mitarbeit in der Arbeitsgruppe *CEN/TC124/WG3/TG1 «EN Standard for Hardwood Glulam»* wird fortgesetzt. Dadurch sollen die im Projekt gefundenen Ergebnisse auch Eingang in europäische Normenwerke finden und die Schweizerischen Interessen vertreten werden.

12 Literatur

- Aicher S, Zachary C & Hirsch M (2016): Rolling shear modulus and strength of beech wood laminations, Holzforschung, 70(8), pp. 773–781. doi: 10.1515/hf-2015-0229.
- Blaß HJ, Streib J (2019): BauBuche Buchen-Furnierschichtholz – Bemessungshilfe für Entwurf und Berechnung nach Eurocode 5. 3. Auflage.
- Baudirektion Zürich (2007): Raumluftfeuchte in Wohnbauten - Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit auf Hygiene, Wohlbefinden und Baumaterialien. Zürich, Switzerland.
- Blaß HJ (1987): Tragfähigkeit von Druckstäben aus Brettschichtholz unter Berücksichtigung streuender Einflussgrößen. Dissertation, Universität Fridericiana Karlsruhe, Karlsruhe, Deutschland.
- Blaß HJ, Frese M, Glos P, Denzler J, Lisenmann P & Ranta-Maunus A (2008): Zuverlässigkeit von Fichten-Brettschichtholz mit modifiziertem Aufbau. Vol. 11. KIT Scientific Publishing
- Brandner R, Gatternig W & Schickhofer G (2012): Determination of Shear Strength of Structural and Glued Laminated Timber. Paper 45-12-2. CIB - Meeting Fourty-Five. Växjö, Sweden, pp. 237–254.
- Clerc G, Lehmann M & Volkmer T (2017): Brettschichtholz aus Laubholz – Technische Grundlagen zur Marktimplementierung als Bauprodukt in der Schweiz; Technischer Bericht Modul 3.
- Colling F (1986): Influence of volume and stress distribution on the shear strength and tensile strength perpendicular to grain. Paper 19-12-3. CIB - Meeting Nineteen, Volume 2. Florence, Italy, pp. 254–276.
- Drewes H (1985): Ausgleichsfeuchten von Holzwerkstoffen für das Bauwesen. Holz als Roh- und Werkstoff, 43, pp. 97–103.
- Ehlbeck J, Colling F & Görlacher R (1985a): Einfluss keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern. Holz als Roh - und Werkstoff, 43, pp. 333–337.
- Ehlbeck J, Colling F & Görlacher R (1985b): Einfluss keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern. Holz als Roh - und Werkstoff, 43, pp. 369–373.
- Ehlbeck J, Colling F & Görlacher R (1985c): Einfluss keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern. 43, pp. 439–442.
- Ehrhart T, Brandner R, Schickhofer G & Frangi A (2015): Rolling Shear Properties of some European Timber Species with Focus on Cross Laminated Timber (CLT): Test Configuration and Parameter Study. Paper 48-6-1. International Network on Timber Engineering Research - Meeting Forty-Eight. Sibenik, Croatia.

Ehrhart T & Brandner R (2018): Rolling Shear: Test Configuration and Properties of some European Soft- and Hardwood Species. *Engineering Structures*, 172, pp. 554–572. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.05.118.

Ehrhart T (2019): European beech glued laminated timber. Dissertation, ETH Zürich, Zürich, Schweiz.

Ehrhart T, Steiger R, Palma P, Gehri E & Frangi A (2019a): Compressive strength and buckling resistance of GLT columns made of European beech (*Fagus sylvatica* L.). International Network on Timber Engineering Research INTER Meeting: Tacoma, US, August 26-29, 2019. Paper 52-12-1.

Ehrhart T, Steiger R, Lehmann M & Frangi A (2019b): European beech (*Fagus sylvatica* L.) glued laminated timber: Lamination strength grading, production and mechanical properties. International Scientific Conference on Hardwood Processing (ISCHP2019): Delft, Niederlande, August 28-30, 2019. pp. 252–267.

Ehrhart T, Steiger R, Lehmann M & Frangi A (2019c): European beech (*Fagus sylvatica* L.) glued laminated timber: Lamination strength grading, production and mechanical properties. *European Journal of Wood and Wood Products*.

EN 338 (2016): Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen. Europäisches Komitee für Normung CEN, Brüssel, Belgien.

EN 384 (2019): Bauholz für tragende Zwecke – Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte. Europäisches Komitee für Normung CEN, Brüssel, Belgien.

EN 408 (2012): Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften. Europäisches Komitee für Normung CEN, Brüssel, Belgien.

EN 1995-1-1 (2010): Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Europäisches Komitee für Normung CEN, Brüssel, Belgien.

EN 14080 (2013): Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen. Europäisches Komitee für Normung CEN, Brüssel, Belgien.

ETA-14/0354 (2018): European Technical Assessment – Glued laminated timber made of hardwood – Structural laminated veneer lumber made of beech. Österreichisches Institut für Bautechnik OIB.

Fink G (2014): Influence of varying material properties on the load-bearing capacity of glued laminated timber. Dissertation. ETH Zürich.

Foschi RO & Barrett JD (1980): Consideration of Size Effects and Longitudinal Shear Strength for Uncracked Beams. Paper 13-6-2. CIB - Meeting Thirteen. Otaniemi, Finland.

Gehri E (2010): Shear problems in timber engineering - analysis and solutions. World Conference on Timber Engineering (WCTE 2010). Riva del Garda, Italy.

Glos P (1978): Zur Bestimmung des Festigkeitsverhaltens von Brettschichtholz bei Druckbeanspruchung aus Werkstoff- und Einwirkungsgrößen. Dissertation, TU München, München, Deutschland.

Glos P, Denzler JK, Linsenmann P (2004): Strength and stiffness behaviour of beech laminations for high strength glulam. Paper 37-6-3. CIB - Meeting Thirty-Seven. Edinburgh, Schottland.

Hartnack R (2004): Langzeitverhalten von druckbeanspruchten Bauteilen aus Holz. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Deutschland.

Hübner U (2013): Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile. Dissertation. Graz University of Technology.

Keenan FJ (1974): Shear strength of wood beams. Forest Products Journal, 24(9), pp. 63–70.

Longworth J (1977): Longitudinal shear strength of timber beams. Forest Products Journal, 27(8), pp. 19–23.

Rammer D, Soltis L & Lebow P. (1996) Experimental shear strength of unchecked solid-sawn Douglas-fir, Forest Service - Research Paper FPL-RP-553.

Soltis, L. and Rammer, D. (1994) 'Shear strength of unchecked glued-laminated timber beams', Forest Products Journal, 44(1), pp. 51–77.

O'Halloran MR (1973): Curvilinear stress-strain relationship for wood in compression. Dissertation, Colorado State University, Fort Collins, US.

SIA 265 (2012): Holzbau. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.

Steiger R (2003): Holzbau: Einführung in die Norm SIA 265, Tragsicherheit – Bemessungskonzept und Bau-stoffe. In: sia-Dokumentation D 0185-d „Holzbau“. 31 – 50. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein sia, Zürich.

Steiger R & Ehrhart T (2016): Homogenes und kombiniertes Buchen-Brettschichtholz: Technische Grundlagen zur Marktimplementierung als Bauprodukt für Biegeträger und Stützen; Technischer Schlussbericht zu Modul 2. Dübendorf, Schweiz.

Steiger R & Ehrhart T (2018): Homogenes und kombiniertes Buchen-Brettschichtholz: Technische Grundlagen zur Marktimplementierung als Bauprodukt für Biegeträger und Stützen; Technischer Schlussbericht zu Modul 4. Dübendorf, Schweiz.

Theiler M (2014): Stabilität von axial auf Druck beanspruchten Bauteilen aus Vollholz und Brettschichtholz. Dissertation, ETH Zürich, Zürich, Schweiz.

Weibull W (1939): A statistical theory of the strength of materials. Stockholm, Sweden.

Werlen D (2018): Modellierung des Biegetragverhaltens von Brettschichtholz aus Buche. Masterarbeit, ETH Zürich, Zürich, Schweiz.

Z-9.1-679 (2009): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für BS-Holz aus Buche und BS-Holz Buche-Hybridträger. Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V.

Homogenes und kombiniertes Buchen-Brettschichtholz

Technische Grundlagen zur Marktimplementierung als Bauprodukt für Biegeträger und Stützen

**Bundesamt für Umwelt BAFU
Aktionsplan Holz**

Projekt REF-1011-04200

Schlussbericht

Modul 7

Umsetzung der Projektergebnisse

Thomas Ehrhart
René Steiger

ETH Zürich
Empa, Abt. Ingenieur-Strukturen

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG	171
1.1 STELLENWERT DER PUBLIKATION VON PROJEKTERGEBNISSEN	171
1.2 GEFÄSSE UND ZIELPUBLIKUM DER PUBLIKATIONEN	171
1.3 ÜBERBLICK ZU DEN PUBLIKATIONEN IM RAHMEN DES PROJEKTES	171
2 NATIONALE VERÖFFENTLICHUNG UND PRÄSENTATION DER PROJEKTERGEBNISSE.....	174
2.1 FORTBILDUNGSKURS WEINFELDEN, SWISS WOOD INNOVATION NETWORK SWIN ...	174
2.2 ETH TAGUNG VON DER FORSCHUNG IN DIE PRAXIS, SWISS WOOD INNOVATION NETWORK SWIN	174
2.3 AUSBILDUNGSTAG DER HOLZINDUSTRIE SCHWEIZ HIS	175
2.4 TECHNIKERTAG DES VERBANDES FÜR GEPRÜFTE QUALITÄTSHÄUSER VGQ.....	175
3 INTERNATIONALE VERÖFFENTLICHUNG UND PRÄSENTATION DER PROJEKTERGEBNISSE.....	176
3.1 WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING WCTE	176
3.2 INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON HARDWOOD PROCESSING ISCHP	177
3.3 PHD-KOLLOQUIEN UND EMPA PHD-SYMPOSIEN	177
3.4 EASTERN EUROPE CONFERENCE ON TIMBER CONSTRUCTIONS	178
3.5 LAUBHOLZ WORKSHOP IN GRAZ.....	178
3.6 WISSENSAUSTAUSCH MIT DEM FORSCHUNGSPROJEKT WOODWISDOM-NET PROJEKT «EU HARDWOODS»	179
3.7 PUBLIKATIONEN IN JOURNALS	180
3.8 DISSERTATION THOMAS EHRHART.....	180
4 BEITRAG ZUR NATIONALEN NORMIERUNG.....	181
4.1 INFORMATION DER NORMENKOMMISSION SIA NK 265.....	181
4.2 BEMESSUNGSHANDBUCH LIGNATEC LAUBHOLZ	181
4.3 HERSELLERRICHTLINIEN	182
5 BEITRAG ZUR INTERNATIONALEN NORMIERUNG	183
5.1 PREN 14080-2: BRETSCHICHTHOLZ AUS LAUBHOLZ	183
5.2 INTERNATIONAL NETWORK ON TIMBER ENGINEERING RESEARCH INTER.....	183

1 Einleitung

1.1 Stellenwert der Publikation von Projektergebnissen

Im Rahmen des Projektes wurden umfangreiche Untersuchungen an Buchen Brettschichtholz und zu Prozessen, die zu dessen Herstellung erforderlich sind, durchgeführt. Neben der wissenschaftlich korrekten Durchführung dieser Untersuchungen wurde der Kommunikation der Ergebnisse und damit der Information des jeweiligen Zielpublikums ein hoher Stellenwert beigemessen. Im Rahmen des Projektes sind deshalb zahlreiche Veröffentlichungen entstanden, die dem Modul 7 «Umsetzung der Projektergebnisse» zuzuordnen sind.

1.2 Gefäße und Zielpublikum der Publikationen

Gemäss Projekttitel wird eine Marktimplementierung des Produktes Buchen Brettschichtholz angestrebt. Dazu ist, neben den Untersuchungen selbst, eine Information verschiedener Gruppen über die Ergebnisse und erlangten Erkenntnisse essentiell. Je nach Zielpublikum stehen dazu geeignete Gefäße zur Verfügung.

In Kapitel 2 werden jene Veröffentlichungen angeführt und kurz beschrieben, mit denen potentielle Produzenten und Nutzer von Buchen Brettschichtholz auf nationaler Ebene über die Ergebnisse informiert wurden. In Kapitel 3 werden jene Veröffentlichungen angeführt und kurz beschrieben, mit denen das internationale Fachpublikum informiert wurde, insbesondere andere Forschungseinrichtungen, die sich mit dem Thema Buchen- oder Laubholz Brettschichtholz beschäftigen. Durch diese Veröffentlichungen soll auch ein Austausch von Wissen sowie eine kritische Diskussion der eigenen Ergebnisse gefördert werden.

In Kapitel 4 werden jene Veröffentlichungen angeführt und kurz beschrieben, mit denen nationale Normengremien über die Ergebnisse informiert wurden. In Kapitel 5 werden Veröffentlichungen angeführt und kurz beschrieben, mit denen internationale Normengremien über die Ergebnisse informiert wurden.

1.3 Überblick zu den Publikationen im Rahmen des Projektes

In der Tabelle 1 (Zeitraum: 2015 - 2018) und der Tabelle 2 (Zeitraum: 2019 - 2020) sind die im Rahmen des Projektes erfolgten Veröffentlichungen zusammengefasst. In der Darstellung wird zwischen *Konferenzen*, *Vorträgen*, *Journal Papers*, *Handbüchern* und *Thesis* unterschieden. Die Autoren werden in der Tabelle 1 und der Tabelle 2 mit folgenden Kurzzeichen benannt:

MA: Martin Arnold (Empa)	AF: Andrea Frangi (ETH)	PP: Pedro Palma (Empa)
GC: Gaspard Clerc (ex. BFH/AHB)	EG: Ernst Gehri (externer Experte)	RS: René Steiger (Empa)
TE: Thomas Ehrhart (ETH, ex. Empa)	RJ: Robert Jockwer (ex. ETH)	TS: Thomas Strahm (nH)
GF: Gerhard Fink (ex. Empa)	ML: Martin Lehmann (BFH/AHB)	TV: Thomas Volkmer (BFH/AHB)

Veröffentlichungen, die gegenwärtig (Stand: 26.03.2020) im Review Prozess sind, sind mit dem Index ¹⁾ versehen. Veröffentlichungen, an denen gegenwärtig gearbeitet wird und die noch nicht eingereicht wurden, sind mit dem Index ²⁾ versehen. Die Umsetzungsarbeiten werden im Rahmen der noch verfügbaren Projektmittel bis zum Projektende (31.12.2020) weitergeführt.

Tabelle 1: Übersicht der Veröffentlichungen im Rahmen des AP-Holz Projektes Buchen BSH in den Jahren 2015 - 2018.

Jahr	Typ	Veranstaltung / Journal	Titel	Autoren
2015	Vortrag	PhD Kolloquium, München/Deutschland	Beech glulam	TE
2015	Poster-Präsentation	Empa PhD Symposium, Dübendorf/Schweiz	Strength grading of European beech lamellas	TE, GF, RS, AF
2016	Vortrag und Paper	INTER, Graz/Österreich	Strength grading of European beech lamellas for the production of GLT and CLT	TE, GF, RS, AF
2016	Vortrag und Paper	WCTE, Wien/Österreich	Experimental investigation of tensile strength and stiffness indicators regarding European beech timber	TE, GF, RS, AF
2016	Vortrag	Empa PhD Symposium, Dübendorf/Schweiz	Strength grading of European beech timber	TE, RS, AF
2017	Vortrag und Paper	INTER, Kyoto/Japan	Impact and detection of grain direction in European beech wood	TE, RS, AF
2017	Vortrag	PhD Kolloquium, Shanghai/China	Glued laminated timber made from European beech wood	TE
2017	Vortrag	VGQ-Technikertag, Dübendorf/Schweiz	Buchen Brettschichtholz: Festigkeiten von Brett, Keilzinkung und Flächenverklebung	TE, TV
2018	Vortrag und Paper	INTER, Tallin/Estland	Mechanical properties of European beech glued laminated timber	TE, RS, PP, AF
2018	Vortrag und Paper	WCTE, Seoul/Südkorea	Estimation of the tensile strength of European beech timber boards based on density, dynamic modulus of elasticity and local fibre orientation	TE, RS, PP, AF
2018	Vortrag und Paper	WCTE, Seoul/Südkorea	Numerical and experimental studies on mechanical properties of glued laminated timber beams made from European beech wood	TE, PP, RS, AF
2018	Vortrag und Paper	WCTE, Seoul/Südkorea	Investigation of the Bond Quality and the Finger Joint Strength of Beech Glulam	ML, GC, CL, TS, TV
2018	Vortrag	HIS-Ausbildungstag, Zürich/Schweiz	Brettschichtholz aus Buche - Technische Grundlagen zur Marktimplementierung als Bauprodukt für Biegeträger und Stützen	TE
2018	Vortrag und Paper	EECTC, Kharkiv/Ukraine	Beech glulam - Experimental studies on the mechanical properties and on the performance of screw connections	RJ, TE
2018	Vortrag	Laubholz Workshop, Graz/Österreich	Brettschichtholz aus Buche: Sortierung, Produktion und Eigenschaften	TE
2018	Poster-Präsentation	Empa PhD Symposium, Dübendorf/Schweiz	A non-contact method for the determination of fibre direction in European beech wood	TE, RS, AF
2018	SCIE-Paper	European Journal of Wood and Wood Products	A non-contact method for the determination of fibre direction of European beech wood (<i>Fagus sylvatica L.</i>)	TE, RS, AF
		Vortrag		
		Vortrag und schriftlicher Beitrag		
		Peer reviewed paper (in SCI oder SCIE Journal)		

Tabelle 2: Übersicht der erfolgten und geplanten Veröffentlichungen im Rahmen des AP-Holz Projektes Buchen BSH in den Jahren 2019 und 2020.

Jahr	Typ	Veranstaltung / Journal	Titel	Autoren
2019	Vortrag	SIA NK 265, Zürich/Schweiz	Brettschichtholz aus Buche – Normenrelevante Fragestellungen und Aspekte	TE
2019	Vortrag	SWIN ETH Tagung, Zürich/Schweiz	Brettschichtholz aus Buche - Erweiterung der Möglichkeiten im modernen Holzbau	TE
2019	Vortrag	PhD Kolloquium, Vancouver/Kanada	European beech glued laminated timber	TE
2019	Vortrag und Paper	INTER, Tacoma/USA	Compressive strength and buckling resistance of glued laminated timber columns made of beech	TE, RS, PP, EG, AF
2019	Vortrag und Paper	ISCHP, Delft/Niederlande	European beech (<i>Fagus sylvatica</i> L.) glued laminated timber: Lamination strength grading, production and mechanical properties	TE, RS, ML, AF
2019	Vortrag und Paper	SWIN Fortbildungskurs, Weinfelden/Schweiz	Forschungsprojekt BSH aus Buche: Motivation zum Projekt, Projektziele, Projektteam und Ergebnisse	RS
2019	Vortrag und Paper	SWIN Fortbildungskurs, Weinfelden/Schweiz	Festigkeitssortierung von Buchenbrettern für die Produktion von BSH	TE, RS, AF
2019	Vortrag und Paper	SWIN Fortbildungskurs, Weinfelden/Schweiz	Keilzinkung und Flächenverklebung von Buchenlamellen	ML
2019	Vortrag und Paper	SWIN Fortbildungskurs, Weinfelden/Schweiz	Mechanische Eigenschaften von Trägern und Stützen aus Buchen BSH	TE, RS, AF
2019	PhD Thesis	ETH Zürich	European beech glued laminated timber	TE
2020	SCIE-Paper	European Journal of Wood and Wood Products	European beech (<i>Fagus sylvatica</i> L.) glued laminated timber: Lamination strength grading, production and mechanical properties	TE, RS, ML, AF
2020 ¹⁾	SCIE-Paper	Materials and Structures	Compressive strength and buckling resistance of glued laminated timber columns made of beech	TE, RS, PP, EG, AF
2020 ²⁾	SCIE-Paper	Bautechnik	Brettschichtholz aus Buche	TE, RS, AF
2020 ²⁾	Handbuch	Lignitec	Bemessungsregeln für Buchen-BSH	TE, TS
2020 ²⁾	Handbuch	Lignitec	Herstellerrichtlinien für Buchen-BSH	TS, ML, TE, MA
2020 ²⁾	SCIE-Paper	Construction and Building Materials	Image-based strength grading of European beech boards and optimisation potential using machine learning	TE, MS, PP, RS, AF
2021 ³⁾	SCIE-Paper	Construction and Building Materials	Influence of the moisture content on the compressive strength and MOE of beech glulam	TE, PP, RS, AF
2021 ³⁾	SCIE-Paper	Construction and Building Materials	Mechanical properties of beech glulam after 30 years in a service class 2 environment	TE, PP, RS, AF, EG (?)
	Vortrag			
	Vortrag und schriftlicher Beitrag			
	Dissertation			
	Peer reviewed paper (in SCI oder SCIE Journal)			
	Handbuch			

¹⁾ Derzeit im Review Prozess; ²⁾ Derzeit in Erstellung / Bearbeitung (Stand 30.06.2020); ³⁾ Geplant

2 Nationale Veröffentlichung und Präsentation der Projektergebnisse

Um die gemäss Projektbeschreibung angestrebte Marktimplementierung des Produktes Buchen Brettschichtholz zu fördern, wurde das Projekt, dessen Umfang, Ziele und insbesondere die Ergebnisse bei zahlreichen Veranstaltungen in der Schweiz präsentiert. Durch diese Vorträge und schriftlichen Beiträge konnten auf nationaler Ebene Holzbauer, Architekten, Ingenieure und andere Entscheidungsträger in der Baubranche auf das Produkt Buchen Brettschichtholz aufmerksam gemacht und informiert werden. Darüber hinaus ermöglichen die im Rahmen der Veranstaltungen geführten Gespräche, Rückmeldungen, Bedenken und Anregungen späterer potentieller Anwender einzuholen und zu diskutieren.

2.1 Fortbildungskurs Weinfelden, Swiss Wood Innovation Network SWIN

Der seit 1970 jährlich stattfindende Fortbildungskurs in Weinfelden, organisiert vom [Swiss Wood Innovation Network SWIN](#), ist eine von Schweizerischen Holzbauern, Architekten, Ingenieuren und sonstigen Interessierten sehr gut angenommene Veranstaltung mit wechselnden Themenschwerpunkten im Bereich des Holzbau.

Themenschwerpunkt bei dem am 22. und 23. Oktober 2019 durchgeführten Fortbildungskurs mit etwa 180 Teilnehmern waren «Hochleistungswerkstoffe im Holzbau». In diesem Rahmen wurden auch die Ergebnisse des Buchen Brettschichtholz Projektes mit insgesamt vier Vorträgen vorgestellt. In der Tabelle 3 sind die Titel der von René Steiger, Thomas Ehrhart und Martin Lehmann gehaltenen Vorträge zusammengefasst.

Weitere Vorträge wurden bei dieser Veranstaltung zum Teilprojekt 2 (Verbindungen in Buchen Brettschichtholz) gehalten. Zu allen Vorträgen wurden schriftliche Beiträge verfasst, die in einem Tagungsband gesammelt gedruckt wurden.

Tabelle 3: Veröffentlichungen beim SWIN Fortbildungskurs in Weinfelden (22.-23.10.2019).

2019	Vortrag und Paper	SWIN Fortbildungskurs, Weinfelden/Schweiz	Forschungsprojekt BSH aus Buche: Motivation zum Projekt, Projektziele, Projektteam und Ergebnisse	RS
2019	Vortrag und Paper	SWIN Fortbildungskurs, Weinfelden/Schweiz	Festigkeitssortierung von Buchenbrettern für die Produktion von BSH	TE, RS, AF
2019	Vortrag und Paper	SWIN Fortbildungskurs, Weinfelden/Schweiz	Keilzinkung und Flächenverklebung von Buchenlamellen	ML
2019	Vortrag und Paper	SWIN Fortbildungskurs, Weinfelden/Schweiz	Mechanische Eigenschaften von Trägern und Stützen aus Buchen BSH	TE, RS, AF

2.2 ETH Tagung Von der Forschung in die Praxis, Swiss Wood Innovation Network SWIN

Bei der Tagung «Von der Forschung in die Praxis» werden jährlich die neuesten Ergebnisse der Forschung im Bereich Holzbau für die Praxis aufbereitet und präsentiert. Die Veranstaltung findet abwechselnd an der ETH Zürich und an der BFH in Biel statt. Das Zielpublikum besteht in der Regel vorwiegend aus Ingenieuren. Aber auch zahlreiche Holzbauer und Architekten nehmen an diesen Veranstaltungen teil.

Tabelle 4: Veröffentlichung beim der SWIN ETH Tagung «Von der Forschung in die Praxis» am 07.02.2019.

2019	Vortrag und Paper	SWIN ETH Tagung, Zürich/Schweiz	Brettschichtholz aus Buche - Erweiterung der Möglichkeiten im modernen Holzbau	TE
------	----------------------	------------------------------------	--	----

An der Veranstaltung vom 7. Februar 2019 wurden die Ergebnisse aus dem AP-Holz Projekt den rund 90 Tagungsteilnehmern präsentiert. Zusätzlich zum Vortrag wurde ein schriftlicher Beitrag verfasst, der in der SIA Dokumentation D 0265 gedruckt worden ist. Der Titel des Beitrages sowie ein Link zur SIA Dokumentation ist in der Tabelle 4 enthalten.

2.3 Ausbildungstag der Holzindustrie Schweiz HIS

Am 18. Januar 2018 fand an der ETH Zürich eine Ausbildungsveranstaltung der [Holzindustrie Schweiz](#) (HIS) statt. Der Einladung zur Veranstaltung, welche an die Mitglieder der Fachgruppe Leimholz ging, folgten rund 25 Personen aus der Schweizerischen Holzwirtschaft. Darunter vorwiegend Vertreter von Sägereien und holzverarbeitenden Betrieben. Fokus der Veranstaltung war die Qualität des Rohmaterials und der Verklebung. Neben den Referaten von Christoph Fuhrmann (Qualität des Rohmaterials, Schwerpunkt Nadelholz) und Dario Salzgeber (Qualität der Verklebung, Nadel- und Laubholz) wurde von Thomas Ehrhart auch der Stand der Forschung an Brettschichtholz aus Buche präsentiert (Tabelle 5) und einige Demonstrationszugestest von sortierten Fichtenbrettern in der Bauhalle der ETH Zürich durchgeführt.

Tabelle 5: Vorstellung von Projektergebnissen beim HIS-Ausbildungstag am 18.01.2018.

2018	Vortrag	HIS-Ausbildungstag, Zürich/Schweiz	Brettschichtolz aus Buche - Technische Grundlagen zur Marktimplementierung als Bauprodukt für Biegeträger und Stützen	TE
------	---------	---------------------------------------	---	----

2.4 Technikertag des Verbandes für geprüfte Qualitätshäuser VGQ

Der [Schweizerische Verband für geprüfte Qualitätshäuser](#) (VGQ) wurde 1999 gegründet. Er fördert innovative ökologische Baustandards sowie die Verwendung erneuerbarer, natürlicher Baumaterialien. Dabei verfolgt er die technische und strategische Förderung des System- und Fertighausbaus in der Baupraxis, die Stärkung der Position des Systembaus in Gesellschaft, Wissenschaft, Politik und öffentlicher Verwaltung, den Ausbau der Marktposition der Branche, die Weiterentwicklung der technischen Grundlagen des System- und Fertighausbaus und die Sicherung eines hohen Standards der Qualität von Produktion, Montage und Endprodukt.

Der Technik-Tag VGQ, ein Weiterbildungstag für VGQ-Mitglieder und -Partner sowie für Interessenten aus der Branche, findet jährlich im März an der Empa in Dübendorf statt. Im Rahmen des 15. VGQ-Technikertages am 9. März 2017 wurden von Thomas Ehrhart und Thomas Volkmer die aktuellsten Ergebnisse aus dem Projekt zur Festigkeitssortierung und Verklebung von Buchen Brettern den rund 120 Tagungsteilnehmern vorgestellt (Tabelle 6).

Tabelle 6: Vorstellung von Projektergebnissen beim VGQ-Technikertag am 09.03.2017.

2017	Vortrag	VGQ-Technikertag, Dübendorf/Schweiz	Buchen Brettschichtholz: Festigkeiten von Brett, Keilzinkung und Flächenverklebung	TE, TV
------	---------	--	---	--------

3 Internationale Veröffentlichung und Präsentation der Projektergebnisse

Forschung zum Thema Brettschichtholz aus Buche bzw. Laubholz wird nicht nur in der Schweiz betrieben. Zahlreiche europäische Forschungseinrichtungen haben in den letzten Jahren verstärkt einen Fokus auf die Nutzung von Laubholz für Bauzwecke gesetzt. In der DACH-Region lag dieser Fokus insbesondere auf der Nutzung von Buchenholz.

Durch den regelmässigen Austausch mit Fachkollegen anderer Universitäten und sonstiger Forschungseinrichtungen sollte einerseits das Projekt, dessen Umfang, Ziele und Ergebnisse der internationalen Fachgemeinschaft vorgestellt und sichtbar gemacht werden. Dadurch konnte laufend das Feedback und die Expertise von internationalen Fachexperten eingeholt werden und im weiteren Verlauf des Projektes berücksichtigt werden.

Andererseits konnte bei diesen Treffen auch ein Einblick zu anderen laufenden Projekten mit ähnlichem Schwerpunkt gewonnen werden und so Übereinstimmungen und insbesondere Disparitäten diskutiert werden. Nicht zuletzt dienten diese Treffen aber auch der Bildung und Pflege von Netzwerken, die insbesondere betreffend die Normierung von Buchen Brettschichtholz von grossem Wert sind.

3.1 World Conference on Timber Engineering WCTE

Die [World Conference on Timber Engineering](#) (WCTE) ist das Forum für die Präsentation und Diskussion der neuesten technischen und architektonischen Innovationen im Holzbau. Die Konferenz ist die prestigeträchtigste internationale Veranstaltung in den Bereichen Holzgenieurbau, Holzwerkstoffe und Design von Holztragwerken im Hoch- und Brückenbau. Die Konferenz findet alle zwei Jahre statt. Zu den in der Regel zwischen 1'000 und 1'500 Teilnehmern zählen Forscher, Ingenieure und Architekten, Mitglieder von Normengremien, Produzenten der Holzindustrie sowie Bauunternehmer und Projektmanager von allen Kontinenten.

Insgesamt vier Vorträge und zugehörige schriftlichen Beiträge wurden zur Präsentation und Diskussion der Projektergebnisse bei den WCTE Konferenzen in den Jahren 2016 (in Wien, Österreich) und 2018 (in Seoul, Südkorea) erstellt. Die Titel und Autoren der jeweiligen Beiträge sind in der Tabelle 7 zusammengestellt.

Tabelle 7: Veröffentlichungen bei der World Conference on Timber Engineering WCTE in den Jahren 2016 und 2018.

2016	Vortrag und Paper	WCTE, Wien/Österreich	Experimental investigation of tensile strength and stiffness indicators regarding European beech timber	TE, GF, RS, AF
2018	Vortrag und Paper	WCTE, Seoul/Südkorea	Estimation of the tensile strength of European beech timber boards based on density, dynamic modulus of elasticity and local fibre orientation	TE, RS, PP, AF
2018	Vortrag und Paper	WCTE, Seoul/Südkorea	Numerical and experimental studies on mechanical properties of glued laminated timber beams made from European beech wood	TE, PP, RS, AF
2018	Vortrag und Paper	WCTE, Seoul/Südkorea	Investigation of the Bond Quality and the Finger Joint Strength of Beech Glulam	ML, GC, CL, TS, TV

3.2 International Scientific Conference on Hardwood Processing ISCHP

Die siebte Ausgabe der [International Scientific Conference on Hardwood Processing](#) (ISCHP) fand zwischen dem 28. und 30. August 2019 in Delft, Niederlande statt. Das Hauptziel dieser Konferenz ist es, die Wissenschafts- und Forschungsgemeinschaft, die an Laubholz arbeitet, von der Quelle bis zum Kunden zusammenzubringen, um Wissen und Ideen auszutauschen. Rund 80 internationale Experten, Wissenschaftler, Vertreter der Laubholzindustrie, Lieferanten und Kunden nahmen an der Konferenz teil, um die aktuellsten Fortschritte und innovativen Arbeiten in diesem Bereich zu diskutieren. Die Themenschwerpunkte der Konferenz waren (i) Laubholzarten, deren mechanische Eigenschaften und Qualitätssicherung, (ii) die Verarbeitung von Laubholz sowie (iii) die Anwendung von Laubholz in der Baupraxis. Um das Buchen Brettschichtholz Projekt zu präsentieren wurde von Thomas Ehrhart, René Steiger, Martin Lehmann und Andrea Frangi ein schriftlicher Beitrag zum Gesamtprojekt verfasst (Tabelle 8). Der Vortrag wurde von René Steiger gehalten.

Tabelle 8: Veröffentlichung bei der International Scientific Conference on Hardwood Processing ISCHP (28.-30.08.2019).

2019	Vortrag und Paper	ISCHP, Delft/Niederlande	European beech (<i>Fagus sylvatica</i> L.) glued laminated timber: Lamination strength grading, production and mechanical properties	TE, RS, ML, AF
------	-------------------	--------------------------	---	----------------

3.3 PhD-Kolloquien und Empa PhD-Symposien

Im Rahmen seines PhD-Studiums (Doktorats) wurden von Thomas Ehrhart zahlreiche Vorträge bei PhD-Kolloquien und PhD-Symposien gehalten (Tabelle 9). Teilnehmer bei den PhD-Kolloquien waren die Holzbau Professoren und Doktoranden der University of British Columbia (Kanada), der TU München (Deutschland), der Tongji University (China), der TU Wien und der TU Graz (beide Österreich), der Aalto University (Finnland) und der ETH Zürich. An den Empa PhD-Symposien nahmen Doktoranden sämtlicher Fachdisziplinen der Empa teil.

Durch die Teilnahme an den PhD-Kolloquien konnten das Projekt und die Ergebnisse mit Holzbau Professoren und Doktoranden aus der ganzen Welt diskutiert werden. Die PhD-Kolloquien und Symposien waren darüber hinaus eine wertvolle Erfahrung und trugen zur Verbesserung der Präsentationstechnik und Diskussionsführung bei.

Tabelle 9: Vorträge an Doktoranden-Kolloquien und Symposien.

2015	Vortrag	PhD Kolloquium, München/Deutschland	Beech glulam	TE
2015	Poster	Empa PhD Symposium, Dübendorf/Schweiz	Strength grading of European beech lamellas	TE, GF, RS, AF
2016	Vortrag	Empa PhD Symposium, Dübendorf/Schweiz	Strength grading of European beech timber	TE, RS, AF
2017	Vortrag	PhD Kolloquium, Shanghai/China	Glued laminated timber made from European beech wood	TE
2018	Poster	Empa PhD Symposium, Dübendorf/Schweiz	A non-contact method for the determination of fibre direction in European beech wood	TE, RS, AF
2019	Vortrag	PhD Kolloquium, Vancouver/Kanada	European beech glued laminated timber	TE

3.4 Eastern Europe Conference on Timber Constructions

In der Regel werden europäische und Weltkonferenzen ohne die Teilnahme osteuropäischer (Ukraine und Weißrussland) Fachleute abgehalten. Gründe dafür sind unter anderem Sprachbarrieren, unterschiedliche Terminologie und die relativ hohen Kosten, die mit einer Konferenzteilnahme verbunden sind. Um hier eine Brücke zu bauen, fand auf Einladung von Dr. Andrii Bidakov von der Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture (KNUCEA; Kharkiv, Ukraine) am 7.-8. Juni 2018 die erste [Eastern Europe Conference on Timber Constructions](#) (EECTC) an der O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine statt.

Unter den rund 40 Teilnehmern waren einerseits mittel- und westeuropäische Forschende, darunter Prof. Hans Joachim Blass (Karlsruher Institut für Technologie KIT, Deutschland), Dr. Jose Manuel Cabrero (Universidad de Navarra, Spanien), Dr. Robert Jockwer (ehem. ETH Zürich), Eero Tuhkanen (Tallinn University of Technology, Estland), Flavio Nebiolo (Rothoblass, Italien) und Thomas Ehrhart (ETH Zürich, ehem. Empa). Andererseits nahmen Forscher aus der Ukraine und Weißrussland teil, aber auch der Rektor der O.M. Beketov National University of Urban Economy, Prof. Volodymyr Mykolayovych Babayev, sowie der erste Vizebürgermeister der Stadt Kharkiv, Igor Terekhov. Simultanübersetzer erlaubten einen exzellenten Austausch zwischen den Forschenden bzw. den Forschenden und den politischen Entscheidungsträger. Von Robert Jockwer und Thomas Ehrhart wurden insgesamt drei Vorträge gehalten, darunter auch ein Vortrag zum Buchen Brettschichtholz Projekt inklusive Aspekten hinsichtlich der Verbindungstechnik (Tabelle 10).

Tabelle 10: Veröffentlichung bei der Eastern Europe Conference on Timber Constructions EECTC (07.-08.06.2018).

2018	Vortrag und Paper	EECTC, Kharkiv/Ukraine	Beech glulam - Experimental studies on the mechanical properties and on the performance of screw connections	RJ, TE
------	----------------------	---------------------------	---	--------

3.5 Laubholz Workshop in Graz

Am 30. November 2018 fand an der Technischen Universität Graz, Österreich ein Workshop zum Thema [Verbindungstechnik für Laubholz Konstruktionen](#) mit rund 25 Teilnehmern statt. Der Einladung von Prof. Gerhard Schickhofer (TU Graz) folgten von Schweizerischer Seite Thomas Strahm (neue Holzbau AG), Prof. Ernst Gehri und Thomas Ehrhart (ETH Zürich, ehem. Empa). Von Thomas Ehrhart wurden die Projektergebnisse zum Thema Festigkeitssortierung von Buchen Brettern, Produktion und Eigenschaften von Buchen Brettschichtholz (Tabelle 11) präsentiert.

Da an der TU Graz zahlreiche Forschungsarbeiten zum Thema Brettschichtholz aus Laubholz und Verbindungen von Laubholz Bauteilen durchgeführt wurden bzw. aktuell laufen, wird ein Wissensaustausch und eine enge Kooperation, welche durch die Teilnahme an solchen Veranstaltungen gefördert wird, als sehr wichtig erachtet.

Tabelle 11: Vortrag beim Laubholz Workshop in Graz (30.11.2018).

2018	Vortrag	Laubholz Workshop, Graz/Österreich	Brettschichtholz aus Buche: Sortierung, Produktion und Eigenschaften	TE
------	---------	---------------------------------------	---	----

3.6 Wissensaustausch mit dem Forschungsprojekt WoodWisdom-Net Projekt «EU Hardwoods»

Praktisch zeitgleich, jedoch mit etwas Vorlauf wurde auf europäischer Ebene das WoodWisdom-Net Projekt «European Hardwoods for the Building Sector», kurz [«EU Hardwoods»](#) durchgeführt. Die folgenden Forschungsinstitute und Forscher haben an diesem Projekt mitgearbeitet:

- Holzforschung Austria, Wien (AT): Peter Lisenmann (Projektleiter)
- MPA Stuttgart (DE): Dr. Simon Aicher
- FCBA Technical Institute, Bordeaux (FR): Dr. Guillaume Legrand
- University of Ljubljana (SL): Prof. Goran Turk
- FVA Baden-Württemberg, Freiburg i. Br. (DE): Dr. Udo Sauter
- Bundesforschungszentrum für Wald, Wien (AT): Dr. Clemens Schadauer
- CBD Contemporary Building Design, Celje (SL): Dr. Bruno Dujič
- SIMONIN SAS, Morteau (FR): Christian Gavignet
- Fachverband der Holzindustrie Österreichs, Wien (AT): Dr. Ulrich Hübner

Die Ziele des Projekts «EU Hardwoods» waren:

- Definition des Rohmaterials in Bezug auf die Verfügbarkeit und die Qualität des Stammes. (Der Bestand sollte analysiert werden und eine Prognose für den zukünftigen Bestand auf der Grundlage verschiedener waldbaulicher Szenarien sollte erstellt werden, einschliesslich der Definition des Potenzials für verschiedene Rundholzqualitäten und -sortierungen einschliesslich des Sägepotenzials / -musters.)
- Charakterisierung der Laubholzarten Buchen, Eiche, Kastanie und Esche in Bezug auf die visuelle und maschinelle Festigkeitssortierung als Voraussetzung für die Erweiterung des Anwendungsspektrums
- Entwicklung eines FE-Modells zur Simulation von homogenem und inhomogenem sowie hybrider Brettschichtholz
- Entwicklung neuer High-Tech-Produkte: Brettsperrholz als Kombination von Laub- und Nadelholzlamellen
- Ableitung von Festigkeitsmodellen für Brettschichtholz und Brettsperrholz auf der Grundlage der Festigkeitseigenschaften von Lamellen und Keilzinkenverbindungen, Validierung durch Tests.

Das Projekt lief vom 01.03.2014 – 31.12.2016. Der [Schlussbericht](#) wurde im Juni 2017 vorgelegt. Auf Grund der späteren Laufzeit des AP Holz-Projekts (01.06.2015 – 31.12.2020) gestaltete sich der Wissensaustausch mit den Forschern des «EU Hardwoods» schwierig. Versuche des Wissensaustausches scheiterten meistens an der beiderseitigen Zurückhaltung in der Freigabe unfertiger Arbeitsdokumente und Entwürfe. Letztlich erfolgte der Wissensaustausch jedoch durch das Publizieren der Ergebnisse beider Projekte an Konferenzen und in Fachzeitschriften.

3.7 Publikationen in Journals

Neben den zahlreichen oben angeführten Vorträgen bei Konferenzen, Tagungen und Workshops wurden im Rahmen des Projektes auch Papers zur Publikation in internationalen Fachzeitschriften mit Peer Review verfasst. Da der Umfang dieser Papers im Vergleich zu Konferenzbeiträgen wesentlich grösser sein kann, lassen sich die Untersuchungen in solchen Papers deutlich detaillierter beschreiben. Eine Übersicht zu den bereits veröffentlichten, zu den im Review-Prozess befindenden, den derzeit in Arbeit befindenden und weiteren geplanten Papers ist in der Tabelle 12 zu finden.

Tabelle 12: Veröffentlichungen in internationalen Fachzeitschriften mit Peer Review.

2018	SCIE-Paper	European Journal of Wood and Wood Products	A non-contact method for the determination of fibre direction of European beech wood (<i>Fagus sylvatica L.</i>)	TE, RS, AF
2020	SCIE-Paper	European Journal of Wood and Wood Products	European beech (<i>Fagus sylvatica L.</i>) glued laminated timber: Lamination strength grading, production and mechanical properties	TE, RS, ML, AF
2020 ¹⁾	SCIE-Paper	Materials and Structures	Compressive strength and buckling resistance of glued laminated timber columns made of beech	TE, RS, PP, EG, AF
2020 ²⁾	SCIE-Paper	Bautechnik	Brettschichtholz aus Buche	TE, RS, AF
2020 ²⁾	SCIE-Paper	Construction and Building Materials	Image-based strength grading of European beech boards and optimisation potential using machine learning	TE, MS, PP, RS, AF
2021 ³⁾	SCIE-Paper	Construction and Building Materials	Influence of the moisture content on the compressive strength and MOE of beech glulam	TE, RS, AF
2021 ³⁾	SCIE-Paper	Construction and Building Materials	Mechanical properties of beech glulam after 30 years in a service class 2 environment	TE, RS, AF, EG (?)

¹⁾ Derzeit im Review Prozess; ²⁾ Derzeit in Erstellung / Bearbeitung (Stand 30.06.2020); ³⁾ Geplant

3.8 Dissertation Thomas Ehrhart

Am 2. Juli 2019 hat Thomas Ehrhart erfolgreich die Doktorprüfung an der ETH Zürich abgelegt. Neben dem Dissertationsleiter Prof. Andrea Frangi waren die Korreferenten Prof. Gerhard Schickhofer, Prof. Ingo Burgert und Dr. René Steiger bei der Prüfung zugegen.

Der Titel der Arbeit, welche die wissenschaftlichen Aspekte des Projektes behandelt, lautet European Beech Glued Laminated Timber. Die Dissertation steht zum Download auf der Datenbank [Research Collection](#) der ETH Zürich zur Verfügung.

Tabelle 13: Veröffentlichte Doktorarbeit von Thomas Ehrhart.

2019	PhD Thesis	ETH Zürich Nr. 26173	European Beech Glued Laminated Timber	TE
------	------------	-------------------------	---	----

4 Beitrag zur nationalen Normierung

Buchen Brettschichtholz ist, wie auch Brettschichtholz aus Nadelholz, ein Bauprodukt. Es ist deshalb eine Deklaration der Eigenschaften, wie sie etwa für die Tragwerksbemessung benötigt werden, durch den Hersteller erforderlich. Darüber hinaus ist es notwendig, Massnahmen zur Qualitätskontrolle zu definieren. Die Angabe von Eigenschafts- und Bemessungswerten für das qualitätsgesichert hergestellte Produkt Buchen Brettschichtholz ist eine Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Marktimplementierung grösseren Ausmasses.

Die Schweiz ist Mitglied des Europäischen Komitees für Normung (CEN) und beteiligt sich an der Erarbeitung und Weiterentwicklung von europäischen Bemessungsnormen (Eurocodes) sowie von Produkt- und Prüfnormen (EN). Das CEN Konzept sieht vor, den Waren- und Dienstleistungsaustausch in Europa zu vereinfachen und Handelshemmnisse abzubauen. Sobald eine harmonisierte (d.h. von allen CEN-Mitgliedsländern akzeptierte) EN vorliegt, müssen nationale Normen zurückgezogen werden, sofern diese der EN widersprechen. Weil der Zeitplan für die Erarbeitung und Umsetzung einer harmonisierten EN für Laubholz nicht von der Schweiz bestimmt werden kann und in der Regel ein langwieriger Prozess ist, kann die Normierung von Buchen Brettschichtholz zunächst auf nationaler Ebene zweckmässig sein.

Auf nationaler Ebene ist für die Normierung im Bereich Holzbau die Normenkommission SIA 265, unter der Leitung von Andrea Frangi, zuständig. Ziel innerhalb des Projektes war es, diese Normenkommission laufend über den Projektfortschritt und die Ergebnisse zu informieren. Dadurch sollte eine kritische Diskussion hinsichtlich normenrelevanter Aspekte in diesem Expertenkreis so früh wie möglich erfolgen und eine vergleichsweise reibungslose Berücksichtigung von Buchen Brettschichtholz bei einer Revision der SIA 265 oder der Erstellung eines Merkblattes sichergestellt werden.

4.1 Information der Normenkommission SIA NK 265

Seit der 31. Sitzung der SIA NK 265 am 27.01.2015 wurde das Thema Brettschichtholz aus Buche regelmässig bei den Sitzungen der SIA NK 265 traktiert. Von René Steiger wurde dabei jeweils zum Arbeitsstand im Projekt und zu den Projektergebnissen berichtet.

Am 15. Januar 2019 wurden die Projektergebnisse im Rahmen der SIA NK 265 Sitzung von Thomas Ehrhart präsentiert und die normenrelevante Fragestellungen und Aspekte zur Diskussion gestellt (Tabelle 14). Eine weitere Präsentation zum Teilprojekt 2 (Verbindungen) wurde in derselben Sitzung von Steffen Franke gehalten.

Tabelle 14: Vorstellung der Projektergebnisse im Rahmen der Normenkommission SIA 265.

2019	Vortrag	SIA NK 265, Zürich/Schweiz	Brettschichtholz aus Buche – Normenrelevante Fragestellungen und Aspekte	TE
------	---------	-------------------------------	---	----

4.2 Bemessungshandbuch Lignatec Laubholz

Um Ingenieuren, Architekten und Planern, die den Einsatz von Laubholzprodukten in Tragwerken in Erwägung ziehen, ein benutzerfreundliches Dokument zur Verfügung zu stellen, wurde beschlossen, ein Lignatec Bemessungshandbuch (Tabelle 15) zu erstellen. Darin sollen

die zur Bemessung von Tragwerken mit Brettschichtholz Bauteilen aus Buche, Esche und Kastanie sowie mit Stabschichtholz aus Buche notwendigen Angaben dargestellt werden.

Tabelle 15: Geplante Veröffentlichung der Projektergebnisse in einem Bemessungshandbuch Lignatec.

2020 ²⁾ Handbuch Lignatec	Bemessungsregeln Buchen BSH	TE, TS
--------------------------------------	-----------------------------	--------

Die in diesem Bemessungshandbuch enthaltenen Themen sind nach derzeitigem Planungsstand (26.03.2020) das Laubholz in Schweizer Wäldern (Autor: Bernhard Pauli), Grundlagen, Dauerhaftigkeit, Brandschutz (Michael Klippel), Nachhaltigkeit, Oberflächenbehandlungen (Wolfram Selter), BSH Buche (Thomas Ehrhart), Stabschichtholz Buche (Martin Lehmann), BSH Kastanie (Andrea Bernasconi), BSH Esche (Thomas Strahm), Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise (Thomas Ehrhart und Thomas Strahm), Verbindungen in BSH Buche (Steffen Franke und Robert Jockwer), Anwendungsbeispiele, Hinweise zur Ausschreibung mit Schweizer Holz, Normen und Literatur und Adressen und Partner. Das Fachlektorat erfolgt durch Christoph Fuhrmann, René Steiger und Andrea Frangi. Das Dokument soll bis Ende des Jahres 2020 fertiggestellt und gedruckt werden.

Die Projektergebnisse werden in das Kapitel «Brettschichtholz (BSH) aus Buche» einfließen, welches gegliedert ist in die Unterkapitel:

- Allgemeines zu Buchen-BSH
- Hersteller von Buchen-BSH
- Hinweise für eine effiziente Tragwerksplanung mit Buchen BSH
- Mechanische Eigenschaften.

4.3 Herstellerrichtlinien

Neben Informationen zu den Produkteigenschaften und den Bemessungsregeln sind auch Informationen erforderlich, wie Laubholzprodukte hergestellt werden können und welche Massnahmen zur Qualitätskontrolle erforderlich sind.

Im Rahmen eines anderen Projekts ist deshalb ein zweites Handbuch (Tabelle 16) geplant bzw. in Erarbeitung, das die Herstellerrichtlinien beinhalten soll. Dieses soll in Anlehnung an die EN 14080 (Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen) erstellt werden. Als Autoren sind Martin Arnold (Empa), Martin Lehmann (BFH/AHB), Thomas Strahm (neue Holzbau AG) und Thomas Ehrhart (ETH) vorgesehen. Das Fachlektorat erfolgt durch Christoph Fuhrmann, René Steiger und Christophe Sigrist. Das Dokument soll bis spätestens Februar 2021 fertiggestellt und gedruckt werden.

Tabelle 16: Geplante Veröffentlichung der Herstellerrichtlinien.

2020 ²⁾ Handbuch Lignatec	Herstellerrichtlinien Laubholz BSH	TS, ML, TE, MA
--------------------------------------	------------------------------------	----------------

5 Beitrag zur internationalen Normierung

5.1 prEN 14080-2: Brettschichtholz aus Laubholz

Als Mitglied des Europäischen Komitees für Normung (CEN) beteiligt sich die Schweiz auch an der Erarbeitung und Weiterentwicklung von Euronormen (EN). Besonders relevant in Hinblick auf das Projekt ist dabei die prEN 14080-2, welche unter dem Arbeitstitel «Hardwood Glulam» derzeit von der CEN/TC124/WG3/TG1 erarbeitet wird. In dieser Norm sollen, in Anlehnung an die EN 14080, welche für Brettschichtholz aus Nadelholz und Pappel gilt, die Anforderungen für Brettschichtholz aus Laubholz definiert werden. Der Leiter dieser Task Group ist Dr.-Ing. Gerhard Dill-Langer von der Universität Stuttgart / Materialprüfungsanstalt Stuttgart.

Zur Vertretung der Schweizerischen Interessen und zur Berücksichtigung der Projektergebnisse in dieser Norm wurde von der SIA NK 265 eine Schweizer Spiegelgruppe bestehend aus René Steiger, Martin Lehmann, Thomas Strahm, Thomas Ehrhart und Gordian Stafp gebildet und in die Task Group TG 1 delegiert. In Absprache soll zumindest jeweils ein Schweizer Vertreter an den Sitzungen der TG 1 teilnehmen.

Die bisherigen Treffen fanden in Stuttgart (7.-8. Juni 2018; Teilnehmer CH: René Steiger und Gordian Stafp), Paris (22.-23. Oktober 2018; Teilnehmer CH: Martin Lehmann, Gordian Stafp, Thomas Ehrhart), Berlin (27. Juni 2019; Teilnehmer CH: Martin Lehmann) und Dübendorf (14.-15. Februar 2020; Teilnehmer CH: René Steiger, Thomas Strahm und Urs Christian Luginbühl) statt.

Durch eine aktive Teilnahme der Schweizerischen Mitglieder sollen die Projektergebnisse in möglichst grossem Umfang auch Eingang in die EN 14080-2 finden. Dazu wurde unter anderem bereits die von Dr. Guillaume Legrand (FCBA) erstellte Excel Datenbank mit den Projektergebnissen hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften von Buchen Brettschichtholz und den Angaben zu den im Projekt durchgeföhrten Versuchen (Beanspruchungsart, Stichprobengrösse, Abmessungen der Prüfkörper, Methode der Datenauswertung, etc.) gefüllt.

Ein erster, rudimentärer Entwurf liegt zurzeit (März 2020) vor, kann jedoch noch nicht ausserhalb der Arbeitsgruppe zirkuliert werden. Zu welchem Zeitpunkt die prEN 14080-2 soweit fertiggestellt sein wird, dass sie in die Vernehmlassung gehen kann, lässt sich derzeit nicht abschätzen.

5.2 International Network on Timber Engineering Research INTER

Der Zweck des [International Network on Timber Engineering Research](#) INTER, beziehungsweise von dessen Vorgänger CIB/W18, ist die Präsentation, Diskussion und Dokumentation von Forschungsergebnissen im Holzbau und die Entwicklung von Anwendungsregeln für holzbauliche Vorschriften oder Normen mit Bezug zum Holzbau. Zu diesem Zwecke finden jährliche, jeweils vier Tage dauernde Treffen an wechselnden Orten statt. Die Auswahl der Beiträge erfolgt durch ein Peer-Review der Abstracts vor dem Treffen. Die Beiträge werden in einem Tagungsband gesammelt und sind öffentlich zugänglich.

In der Regel nehmen zwischen 60 und 80 Fachexperten aus bis zu 20 Ländern an den Treffen teil. Vorwiegend sind dies Forscher an universitären Einrichtungen, Holzbauingenieure,

Hersteller von Holzbauprodukten oder Verbindungsmittern für den Holzbau sowie Mitglieder von Normengremien. Aufgrund der hohen Dichte an Fachexperten und der grossen Anzahl an teilnehmenden Entscheidungsträger in Normengremien eignen sich die INTER Treffen ausgezeichnet zur Präsentation normenrelevanter Projektergebnisse und zur Bildung und Pflege von Netzwerken.

Die Zurverfügungstellung der Beiträge zum Download bereits vor dem Treffen, sowie die grosszügigen Time Slots für Präsentation und Diskussion bieten Gewähr für eine vertiefte Betrachtung des Themas.

Bei den INTER Treffen in den Jahren 2016, 2017, 2018 und 2019 wurden Abstracts eingereicht und akzeptiert und es erfolgten Veröffentlichungen aus dem Projekt (Tabelle 17).

Tabelle 17: Veröffentlichungen bei Meetings des International Network on Timber Engineering Research INTER (vormals CIB-W18).

2016	Vortrag und Paper	INTER, Graz/Österreich	Strength grading of European beech lamellas for the production of GLT and CLT (Paper 49-05-1)	TE, GF, RS, AF
2017	Vortrag und Paper	INTER, Kyoto/Japan	Impact and detection of grain direction in European beech wood (Note)	TE, RS, AF
2018	Vortrag und Paper	INTER, Tallin/Estland	Mechanical properties of European beech glued laminated timber (Paper 51-12-4)	TE, RS, PP, AF
2019	Vortrag und Paper	INTER, Tacoma/USA	Compressive strength and buckling resistance of glued laminated timber columns made of beech (Paper 52-12-1)	TE, RS, PP, EG, AF



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU