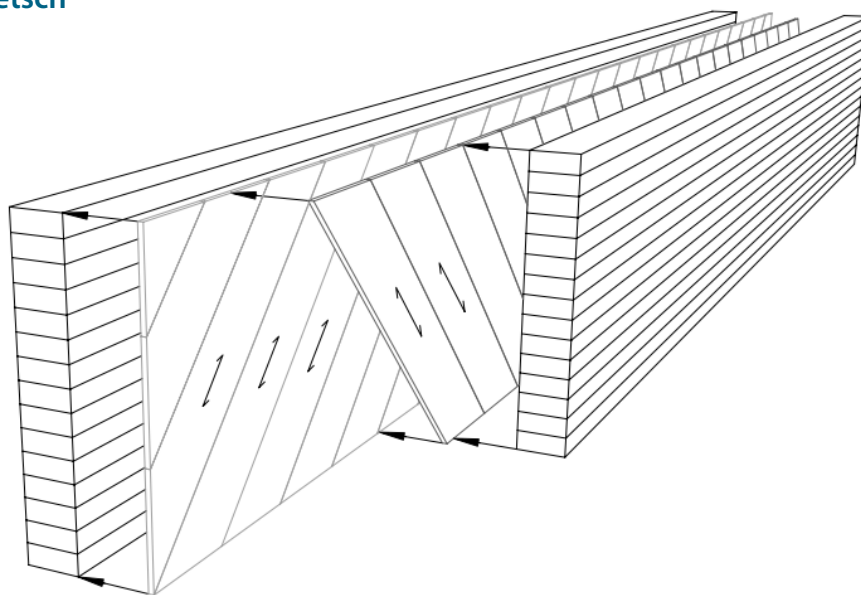


BBSR-
Online-Publikation
48/2024

Hybride Holzbauteile aus Laubholz- Furnieren und Brettschichtholz aus Nadelholz – holzbewehrtes Holz

von

Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
Dr.-Ing. Markus Lechner
Prof. Dr.-Ing. Philipp Dietsch



Hybride Holzbauteile aus Laubholz-Furnieren und Brettschichtholz aus Nadelholz – holzbewehrtes Holz

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
F O R S C H U N G S F Ö R D E R U N G

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-18.21

Projektlaufzeit: 01.2019 bis 03.2021

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Guido Hagel
guido.hagel@bbr.bund.de

Autoren

Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
Dr.-Ing. Markus Lechner, M. Sc.
Prof. Dr.-Ing. Philipp Dietsch

Redaktion

Technische Universität München

Stand

Juni 2021

Gestaltung

Technische Universität München

Bildnachweis

Titelbild: Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Dr.-Ing. Markus Lechner
Grafiken und Fotografien: Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, sofern nicht anders angegeben.
Weitere Bildnachweise siehe Seite 103.

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Winter, Stefan; Lechner, Markus; Dietsch, Philipp, 2024: Hybride Holzbauteile aus Laubholz-Furnieren und Brettschichtholz aus Nadelholz – holzbewehrtes Holz. BBSR-Online-Publikation 48/2024, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	7
Abstract.....	8
1 Einleitung.....	9
1.1 Motivation.....	9
1.2 Konzept und Aufbau von holzbewehrtem Holz	10
1.2.1 Konzept	10
1.2.2 Furnierlage (FL).....	10
1.2.3 Neigungswinkel einer Furnierlage	11
1.2.4 Furnierebene (FE)	12
1.2.5 Bewehrungsgrad (δ).....	13
1.3 Zielsetzung.....	13
1.4 Arbeitsplan	14
2 Grundlagenermittlung (AP1)	15
2.1 Laubholz Furniere – Buche	15
2.1.1 Furnierarten und Herstellung.....	15
2.1.2 Mechanische Kennwerte von Buchenfurnieren	18
2.2 Klebstoffsysteme.....	19
2.3 Faserverbundstrukturen	20
2.3.1 Grundprinzip.....	20
2.3.2 Fasern	21
2.3.3 Matrix.....	23
2.3.4 Anknüpfungspunkte für holzbewehrtes Holz	24
3 Numerische Untersuchungen (AP2).....	27
3.1 Allgemein	27
3.2 Querkzug	27
3.3 Schub und Biegung.....	29
3.4 Zwischenfazit	29
4 Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte von Furnieren aus Buche (AP 3)	30
4.1 Allgemein	30
4.2 Herstellung.....	30

4.3	Versuchsaufbau und Durchführung	30
4.4	Auswertung und Ergebnisse	31
5	Biege- und Schubversuche (AP3).....	34
5.1	Allgemein	34
5.2	Herstellung	35
5.3	Delaminierung	37
5.4	Biegeversuche	38
5.4.1	Versuchsaufbau und Durchführung	38
5.4.2	Auswertung und Ergebnisse.....	39
5.5	Schubversuche	47
5.5.1	Versuchsaufbau und Durchführung	47
5.5.2	Auswertung und Ergebnisse.....	51
6	Versuche zur Tragfähigkeit von Ausklinkungen, Durchbrüchen und Queranschlüssen (AP4).....	56
6.1	Allgemein	56
6.2	Ausklinkungen.....	58
6.2.1	Versuchsaufbau und Durchführung	58
6.2.2	Herstellung	59
6.2.3	Auswertung und Ergebnisse.....	60
6.3	Durchbrüche.....	65
6.3.1	Versuchsaufbau und Durchführung	65
6.3.2	Herstellung	66
6.3.3	Auswertung und Ergebnisse.....	67
6.4	Queranschlüsse	72
6.4.1	Versuchsaufbau und Durchführung	72
6.4.2	Herstellung	73
6.4.3	Auswertung und Ergebnisse.....	74
7	Verhalten von holzbewehrtem Holz bei Feuchteänderungen (AP5)	83
7.1	Allgemein	83
7.1.1	Versuchsaufbau und Durchführung	83
7.1.2	Herstellung	84
7.1.3	Auswertung und Ergebnisse.....	85

8	Rechen- und Bemessungsmodelle für holzbewehrtes Holz (AP6)	89
8.1	Konstruktionsempfehlungen	89
8.2	Numerisches Berechnungsmodell	90
9	Zusammenfassung	95
	Mitwirkende	96
	Literaturverzeichnis	98
	Abbildungsverzeichnis	103
	Tabellenverzeichnis	107

Kurzfassung

Dieses Forschungsprojekt befasst sich mit der Entwicklung eines neuartigen furnierverstärkten Holzprodukts für tragende Anwendungen – holzbewehrtes Holz. Dabei werden zur Erhöhung der Schub- und Querkzugbeanspruchung Furniere senkrecht in einen Brettschichtholzquerschnitt eingebracht. Durch die Anordnung der Furnierlagen zwischen den Brettschichtholzbauanteilen in Winkeln von 0°, 45° und 90° werden die stark anisotropen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Brettschichtholz homogenisiert. Mit Hilfe von numerischen Simulationen und experimentellen Untersuchungen wurde das Tragverhalten und die Leistungsfähigkeit von holzbewehrtem Holz untersucht. Die Ergebnisse belegen eine erhebliche Steigerung der Tragfähigkeit von holzbewehrtem Holz mit Ausklinkungen, runden Durchbrüchen und Querschlüssen. Erste Untersuchungen zur Auswirkung der Neigung der Furnierlagen auf das Schwindverhalten wurden im Projekt durchgeführt. Flach geneigte Furnierlagen zeigen einen geringeren Sperreffekt als 90° orientierte.

Holzbewehrtes Holz ist ein neues, hochleistungsfähiges Holzbauprodukt für tragende Zwecke mit deutlich verbesserten Eigenschaften bei Schub- und Querkzugbeanspruchungen.

Abstract

This research project deals with the development of a novel veneer-reinforced timber product for load-bearing applications – veneer-reinforced timber. For this composite timber product, veneers are inserted vertically into a glulam cross-section to act as reinforcement for shear and tension stresses perpendicular to the grain. By arranging the veneer layers between the glulam components at angles of 0° , 45° and 90° , the highly anisotropic strength and stiffness properties of glulam are homogenized. By means of numerical simulations and experimental investigations, the load-bearing behavior and the efficiency of veneer-reinforced timber are investigated. The results substantiate a considerable increase in load bearing capacities of veneer-reinforced timber with notches, holes or cross connections. Studies and derived recommendations on the effect of the inclination of the veneer on the shrinkage behavior of this composite timber product conclude this paper. Flat inclined veneer layers show a lower blocking effect than 90° oriented ones.

Veneer-reinforced timber is a new, high-performance load-bearing timber construction product with significantly improved properties in shear and tension perpendicular to the grain.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Brettschichtholz (BSH) ist ein Erfolgsprodukt des modernen Holzbaus mit einem Produktionsvolumen von momentan ca. 2,5 Mio m³ allein in D und AT (Umsatz ca. 1 Mrd. €). Eine bekannte Schwachstelle von BSH sind die im Vergleich zur Biegefestigkeit sehr geringen Schub- und Querkzugfestigkeiten (nur ca. 15 % bzw. 2 % der Biegefestigkeit, DIN EN 14080:2013-09). Dies führt zu häufigen Rissbildungen, sowohl in auf Querkzug und Schub beanspruchten Bereichen (gekrümmte Träger, Durchbrüche, Ausklinkungen, Queranschlüsse) als auch bei Austrocknung des BSH. Statistischen Auswertungen von Schadensfällen zufolge, stellen derartige Rissbildungen mehr als 50 % aller vorgefundenen Schäden in Brettschichtholzbauteilen dar (Blaß und Frese 2010) (Dietsch 2012) (Dietsch und Winter 2018). Derartige Schäden führen zu einem massiven Imageverlust. Stand der Technik ist es, diesen Eigenschaften lokal durch Verstärkungen in Form langer Vollgewindeschrauben zu entgegnen (Anzahl pro Bauwerk z. T. > 1000). Aufgrund von Verformungsverträglichkeiten wirken derartige Verstärkungen erst im Falle des gerissenen Holzbauteils. Die nur lokal wirkende Verstärkung erschwert zudem spätere Änderungen am Tragwerk (z.B. Durchbrüche, Lastanhängung). Neueste Untersuchungen zeigen zudem, dass Verstärkungen aufgrund ihres Sperreffektes bei Schwinden rissinduzierend und damit tragfähigkeitsmindernd sein können (Danzer et al. 2020). Die bis dato durch materialfremde, lokal wirkende Elemente eingebrachten Verstärkungseffekte sind dem "holzbewehrten Holz" inhärent und durchgehend vorhanden. Die Entwicklung eines robusten, bio-basierten, sortenreinen und recyclingfähigen Produktes ermöglicht es nicht nur standardmäßig mit Schrauben verstärkte Holzprodukte zu ersetzen, sondern auch neue Einsatzgebiete für Holzbauteile zu erschließen. Dies führt zu einer gesteigerten Wertschöpfung der europaweit agierenden deutschen Holzbauindustrie.

1.2 Konzept und Aufbau von holzbewehrtem Holz

1.2.1 Konzept

Holzbewehrtes Holz ist eine Weiterentwicklung von Brettschichtholz. Dafür wird Brettschichtholz aus Fichte mit gezielt angeordneten Furnierlagen zu holzbewehrtem Holz kombiniert (Abbildung 1.1).

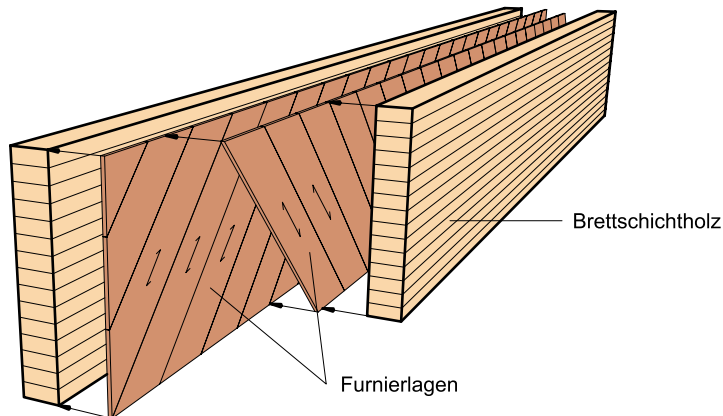


Abbildung 1.1 Aufbau von holzbewehrtem Holz am Beispiel einer innenliegenden Furnierebene mit zwei gegenläufigen Furnierlagen

Durch Anordnung von Furnierlagen zwischen oder auf den Brettschichtholzbauteilen werden die stark anisotropen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Brettschichtholz homogenisiert. Es entsteht ein inhärent verstärktes stabförmiges Holzprodukt für tragende Zwecke. Das grundsätzliche Vorgehen der Anordnung der Furnierlagen orientiert sich an dem Aufbau von Faserverbundwerkstoffen wie z.B. Carbon (CFK), glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) oder aramidfaserverstärkten Kunststoffen (AFK) aus dem Flugzeug- und Automobilbau.

1.2.2 Furnierlage (FL)

Eine Furnierlage besteht aus einem oder mehreren faserparallel verklebten Einzelfurnieren, Abbildung 1.1.

1.2.3 Neigungswinkel einer Furnierlage

Der Neigungswinkel (α_{FL}) einer Furnierlage ist als der Winkel zwischen der Faserlängsrichtung von Brettschichtholz und der Faserlängsrichtung einer Furnierlage definiert (Abbildung 1.2). Furnierlagen werden im Winkel (α_{FL}) zur Faserlängsrichtung von Brettschichtholz angeordnet.

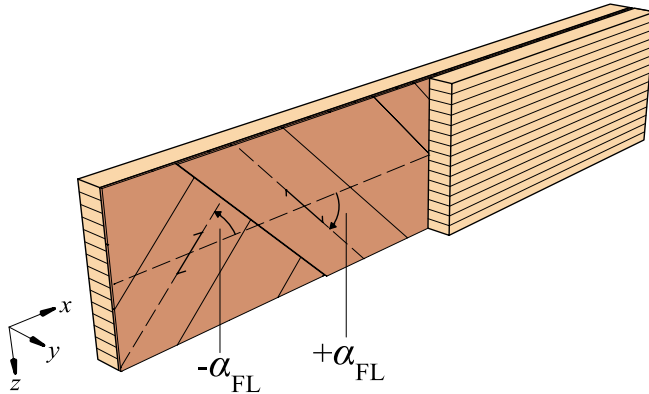


Abbildung 1.2 Definition Neigungswinkel (α_{FL}) einer Furnierlage von -90° bis $+90^\circ$

Es sind Neigungswinkel (α_{FL}) von -90° bis 90° möglich.

1.2.4 Furnierebene (FE)

Eine Furnierebene besteht aus einer oder mehreren Furnierlagen. Holzbewehrtes Holz besteht aus einer oder mehreren Furnierebenen mit innen- oder außenliegender Anordnung (Abbildung 1.3).

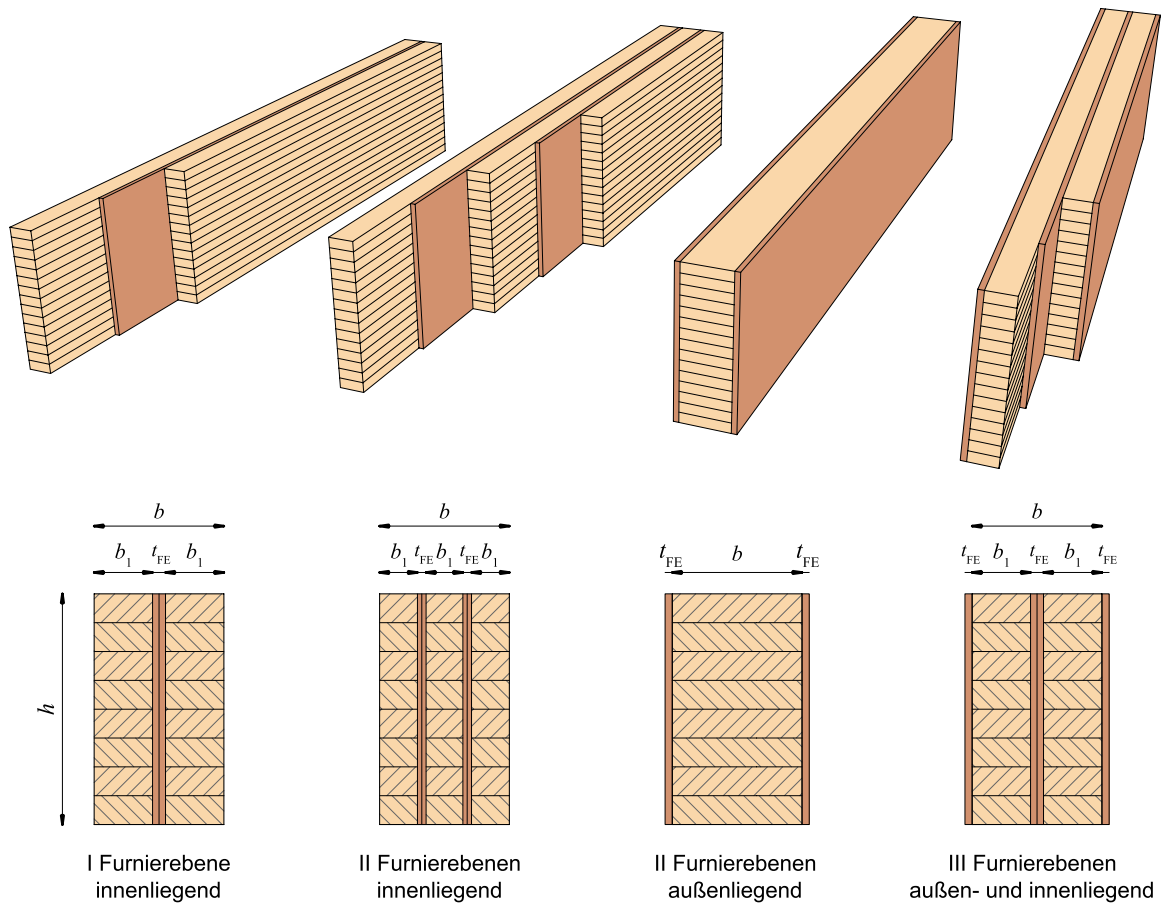


Abbildung 1.3 Anordnungsmöglichkeit von Furnierebenen (FE) für holzbewehrtes Holz

1.2.5 Bewehrungsgrad (δ)

Der Bewehrungsgrad (δ) gibt das Verhältnis der Furnierbreite zur Querschnittsbreite an und wird wie folgt definiert:

$$\delta = \frac{\sum t_{FE}}{b} \quad [-] \quad (1-1)$$

t_{FE}	[mm]	Breite der Furnierebene
b	[mm]	Querschnittsbreite

In Abbildung 1.4 sind die geometrischen Zusammenhänge gezeigt.

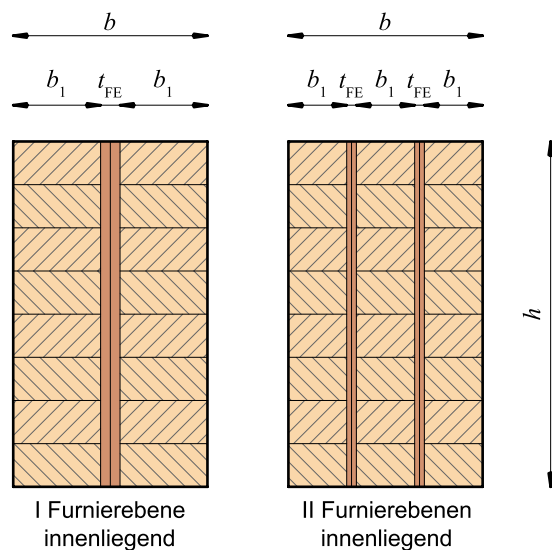


Abbildung 1.4 Bezeichnungen HBH Querschnitt

1.3 Zielsetzung

In diesem Forschungsvorhaben wird die grundsätzliche Machbarkeit (proof of concept) und die Leistungsfähigkeit von holzbewehrtem Holz untersucht.

Durch die Furnierlagen soll vor allem

- die Schubbeanspruchbarkeit,
- die Querkzugbeanspruchbarkeit und
- die Leistungsfähigkeit von Verbindungsmittelgruppen

wesentlich erhöht werden.

1.4 Arbeitsplan

Prototypen sind ein guter Nachweis für die Machbarkeit einer Idee, ihre Leistungsfähigkeit wird am Besten im Versuch nachgewiesen (proof of concept). Dementsprechend bilden experimentelle Untersuchungen an holzbewehrtem Holz den Kern des Forschungsansatzes. In Abbildung 1.5 ist der geplante und durchgeführte Arbeitsplan gezeigt.

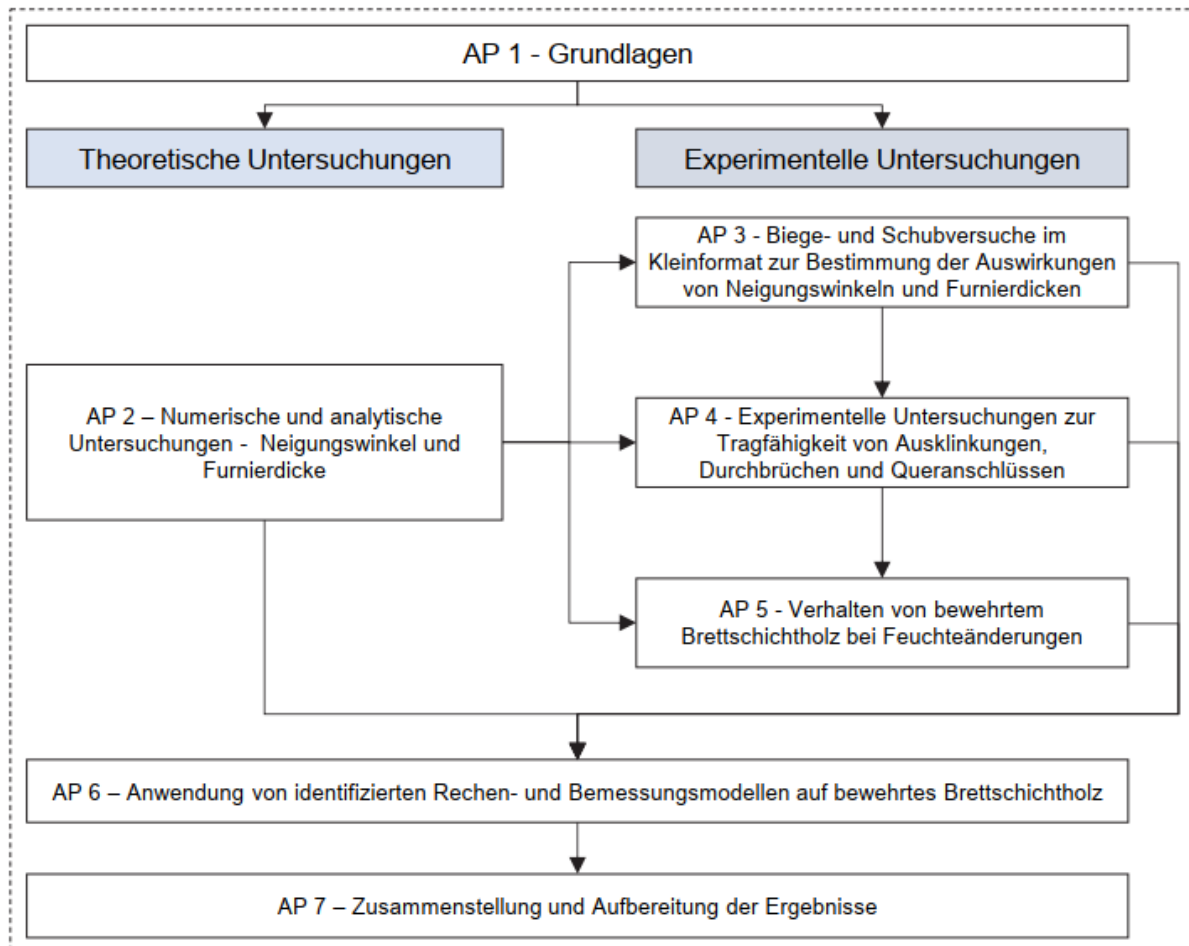


Abbildung 1.5 Übersicht der Untersuchungsmethodik und Arbeitspakete

2 Grundlagenermittlung (AP1)

2.1 Laubholzfurniere – Buche

2.1.1 Furnierarten und Herstellung

Ein Furnier wird nach DIN 68330:2016-06 als ein „*Blatt aus Holz das durch Schälen, Messern oder Sägen vom Baumstamm, einem Teil des Baumstamms oder dessen Wurzel gewonnen wird*“ definiert.

Furniere lassen sich, entsprechend ihrer Herstellung, in drei Gruppen unterteilen: Sägefurniere, Messerfurniere und Schäl-furniere (Abbildung 2.1).

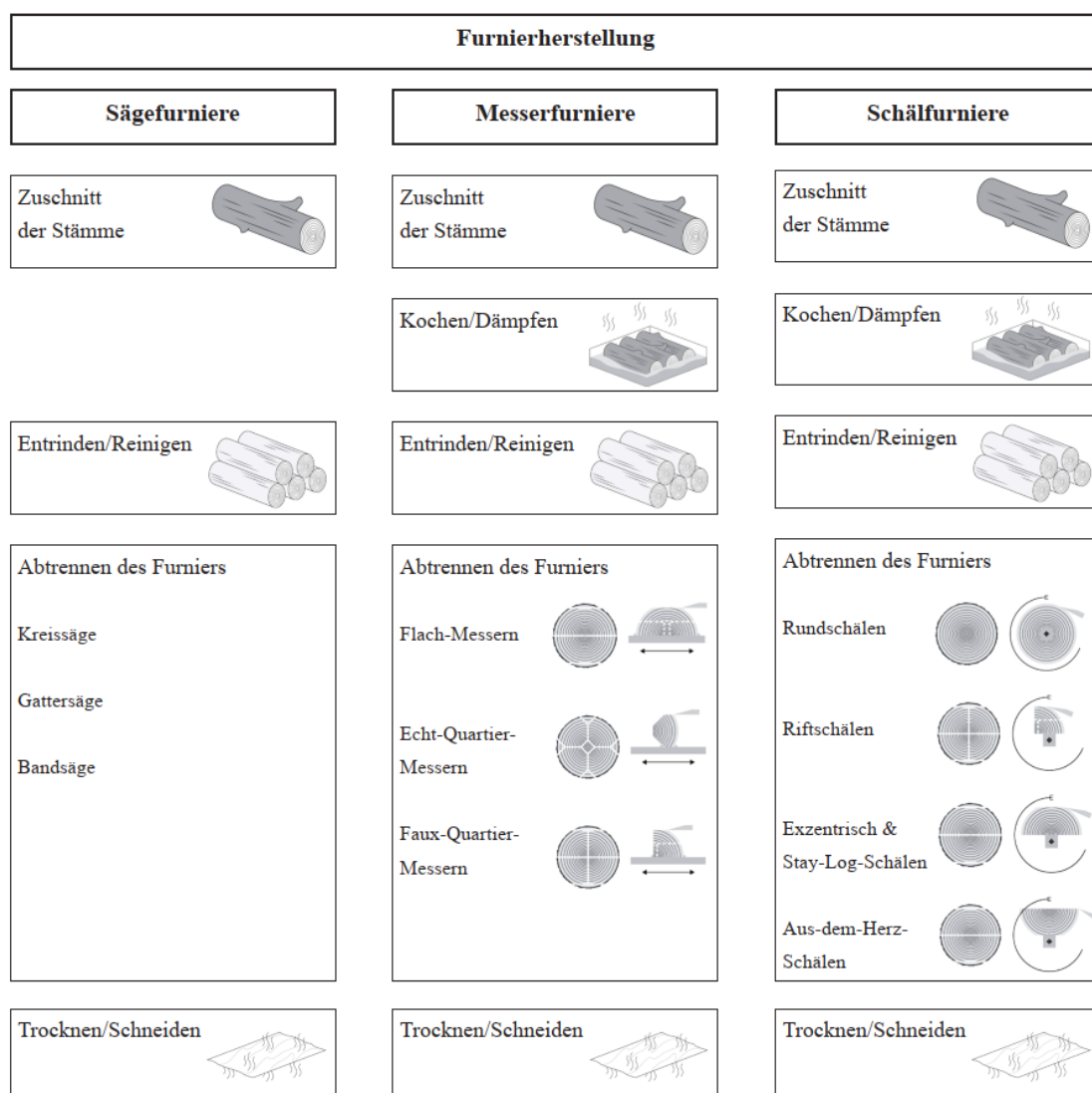


Abbildung 2.1 Verfahren zur Furnierherstellung, (Wallner 2018) nach (Pollmeier 2014) und (Fritz Kohl GmbH & Co. KG 2017)

Zunächst müssen die geschlagenen Baumstämme auf eine bearbeitbare Länge zugeschnitten werden. Hierbei können Fehlstellen bereits aussortiert werden. Es folgt das Entrinden und Reinigen der Stämme. Da Bäume ein hohes Alter erreichen können, sind eingebundene

Fremdmaterialien, z.B. aus Kriegen, nicht ausgeschlossen. Metallische Einbindungen, wie Granatsplitter, verkürzen die Lebenserwartung der Maschinen deutlich und werden deshalb vor der Verarbeitung entfernt (Kollmann et al. 1975). Bei einigen Furnierwerken wird dieser Schritt hinter das Kochen bzw. Dämpfen gestellt. Müssen die Stämme zwischengelagert werden, so ist darauf zu achten, dass sie mit Wasser berieselt werden. Dadurch wird ein Austrocknen verhindert, welches zu Rissen führen kann.

Anschließend werden die Stämme auf die Verarbeitung durch eine Wärmebehandlung vorbereitet. Sie werden in einem Heißwasserbad gekocht bzw. gedämpft. Dadurch kommt es zu einer Plastifizierung des Holzes und innere Spannungen werden abgebaut. Dieser Schritt ist für die Verarbeitung als Messer- und Schäl furnier notwendig, um eine saubere Schnittführung gewährleisten zu können. Sägefurniere müssen nicht wärmebehandelt werden (Kollmann et al. 1975). Der Koch- bzw. Dämpfprozess dauert je nach Holzart und Temperatur einen Tag bis zwei Wochen und verändert die Farbe des Holzes (Initiative Furnier + Natur e.V. 2017).

Nach der Wärmebehandlung sind die Stämme für das Abtrennen des Furniers bereit. Dies erfolgt auf unterschiedliche Art und Weise. Sägefurniere werden entweder mittels einer Kreis-, Gatter- oder Bandsäge aufgetrennt. Das Furnierbild entspricht dem der Messerfurniere. Bei der Gewinnung von Furnieren durch Messern und Schälen ist es für eine gute Qualität wichtig, dass die Messer und der Druckbalken mit einer Genauigkeit von 0,1 mm eingestellt sind (Fritz Kohl GmbH & Co. KG 2017). Der Druckbalken dient einerseits der Erzeugung einer gleichmäßigen Furnierstärke, andererseits zur Minimierung von herstellungsbedingten Mikrorissen.

Je nach Auftrennung des Stammes und Schnittwinkel lässt sich das Messerverfahren in Flach-Messern, Echt-Quartier-Messern und Faux-Quartier-Messern unterteilen. Unter Flach-Messern versteht man das Messern eines halbierten Stammes von der Außenseite. Das Ergebnis ist eine Maserung, welche außen streifig und innen gefladert ist und mit zunehmenden Arbeitsfortschritt streifiger wird. Echt- und Faux-Quartier-Messern erfolgt am geviertelten Stamm. Bei Echt-Quartier-Messern wird senkrecht zu den Jahrringen geschnitten, was eine ausschließlich streifige Textur ergibt, bei Faux-Quartier-Messern werden die Jahrringe flach angeschnitten. Dies hat eine halbbäumige Maserung zur Folge (Initiative Furnier + Natur e.V. 2017).

Schäl furniere können ebenfalls auf verschiedene Art und Weise gewonnen werden. Die gängigste Methode ist das Rundschälen. Der ganze Stamm wird an der Mittelachse eingespannt und von außen nach innen spiralförmig geschält. Die Textur des Furniers wird sehr unregelmäßig gefladert (Initiative Furnier + Natur e.V. 2017). Zur Herstellung der 3,5 mm starken Furniere für BauBuche-Produkte wird dieses Verfahren angewendet (Pollmeier 2014). Beim Riftschälen wird der Stamm geviertelt und nahezu senkrecht zur Faser geschält, wodurch sich eine streifige Maserung ergibt. Exzentrisches, bzw. Stay-Log-Schälen erfolgt meist am halbierten Stamm und gibt eine ähnliche Maserung wie beim Flach-Messern. Eine weitere Möglichkeit ist das „Aus-dem-Herz-Schälen“. Dies erfolgt von innen nach außen an halbierten, gedrittelten oder geviertelten Stämmen. Die Textur des Furniers wird als sehr blumig bezeichnet (Initiative Furnier + Natur e.V. 2017). Die Herstellung von Schäl furnier mittels Rundschälen ist deutlich preiswerter und damit wirtschaftlicher als die übrigen Verfahren (Fritz Becker GmbH & Co. KG 2017). In Abbildung 2.2 sind die verschiedenen Herstellungsarten von Messer- und Schäl furnieren und deren Ergebnisse veranschaulicht.

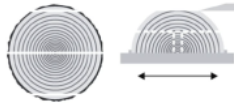
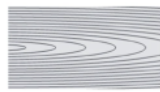
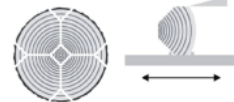
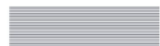
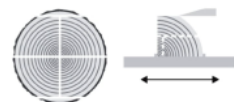
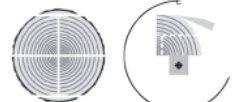
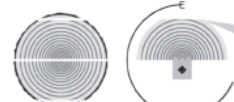
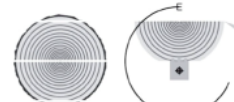
Bezeichnung	Prinzip	Ergebnis (Textur des Furniers)
Flach-Messern		
Echt-Quartier-Messern		
Faux-Quartier-Messern		
Rundschälen		
Riftschälen		
Exzentrisch & Stay-Log-Schälen		
Aus-dem-Herz-Schälen		

Abbildung 2.2 Herstellungsarten von Messer- und Schäl furnieren und deren Ergebnisse, (Wallner 2018) nach (Fritz Kohl GmbH & Co. KG 2017)

Die gemesserten, bzw. geschälten Furniere weisen einen extrem hohen Feuchtigkeitsgehalt auf. Um die Dauerhaftigkeit sicherzustellen, werden sie bis unter den Fasersättigungspunkt getrocknet. Zu trockene Furniere sind brüchig, zu feuchte sind anfällig für Schädlinge (Initiative Furnier + Natur e.V. 2017). Während des Trocknungsvorgangs neigen Furniere stark zum Verziehen und Werfen. Deshalb ist eine gleichzeitige Druckbeaufschlagung notwendig. Um Risse zu vermeiden und die Qualität zu gewährleisten, ist eine genaue Abstimmung von Druck, Temperatur, Zeit und Luftfeuchtigkeit von großer Bedeutung (Kollmann et al. 1975). Die Buchenfurniere für BauBuche-Produkte werden in einem Durchlauftrockner innerhalb von 15 Minuten auf eine Holzfeuchte von 4 % gebracht (Pollmeier 2014). Hier gibt es weitere Entwicklungen: Durch verbesserte Methoden, wie das Presstrocknungsverfahren, kann die Presszeit und das tangentielle Schwindverhalten nachweislich reduziert werden, wodurch eine höhere Formstabilität der Furniere erreicht wird (Buddenberg 2015). Als letzter Schritt werden die Ränder der getrockneten Furniere begradigt und auftretende Fehlstellen ausgeschnitten (Initiative Furnier + Natur e.V. 2017). Die aktuellen Entwicklungen tendieren Richtung visuelle Bildbearbeitungsprogramme. Damit lassen sich Fehlstellen genauer erkennen und heraustrennen. Das führt zu

einer höheren Furnierausbeute (Buddenberg 2015). In modernen Furnierwerken sind alle Arbeitsschritte automatisiert. Präzise Einstellungen der Messer, eine hohe Genauigkeit der Furnierstärken und die Garantie der Qualität sind Standard. Neuere Erkenntnisse und Entwicklungen sowie die Anwendung des Rundschälens tragen zu einer höheren Ausbeute bei. Insgesamt betragen die Holzverluste während der Schäl furnierherstellung rund 50 %, bezogen auf einen Kubikmeter Rundholz. Sie setzen sich aus Verlusten aus Ablängen der Rundholzstämmen, Schälverluste, Trocknungsverluste und Klippverluste zusammen. Die Ausbeute ist zwar wesentlich höher als bei der Schnittholzerzeugung (22 %), jedoch ist noch Entwicklungspotential vorhanden (Buddenberg 2015). In Abbildung 2.3 ist der Herstellprozess anhand von Bildern veranschaulicht.

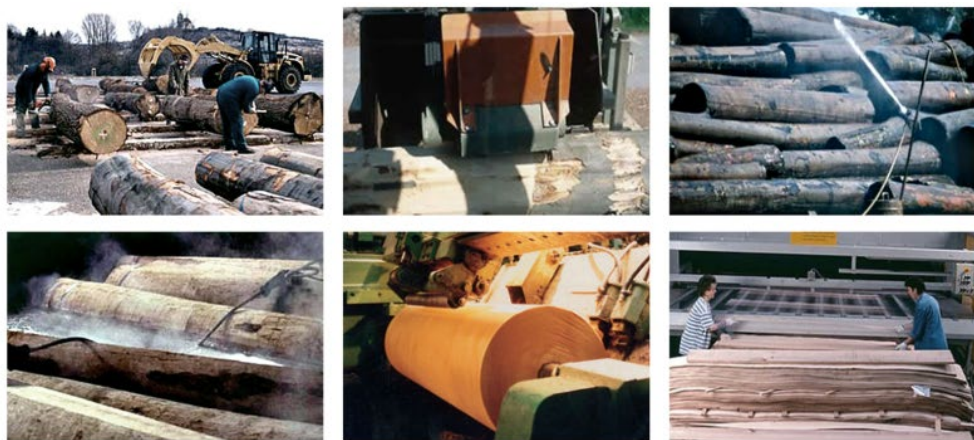


Abbildung 2.3 Herstellprozess von Furnieren - Zuschnitt der Stämme; Entrinden der Stämme; Lagerung unter Wasserbeaufschlagung; Kochen/Dämpfen; Rundschälen; Trocknen/Sortieren (Initiative Furnier + Natur e.V. 2017), (Fritz Becker GmbH & Co. KG 2017)

2.1.2 Mechanische Kennwerte von Buchenfurnieren

Mittels einer Literaturrecherche von Wallner (2018) wurden mechanische Kennwerte von Buchenfurnieren zusammengetragen (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1 Mechanische Kennwerte und Rohdichte von Einzelfurnieren und Furnierschichtholz aus Buche, Mittelwerte nach verschiedenen Untersuchungen, Zusammenstellung von Wallner (2018)

Untersuchung	t [mm]	n _{Lagen} [-]	ρ [kg/m³]	E ₀ [N/mm²]	E ₉₀ [N/mm²]	G [N/mm²]	G _R [N/mm²]	f _{t,0} [N/mm²]	f _{c,0} [N/mm²]	f _{t,90} [N/mm²]	f _m [N/mm²]	f _v [N/mm²]	f _R [N/mm²]
[Buchelt und Wagenführ, 2008] (Einzelfurnier)	0,5	1	-	12000	630	-	-	71	-	7,9	136	-	-
[Staudacher, 2015] Zugprüfung an Kleinproben, Einzelfurnier	3	1	610	16725	-	-	-	158	-	-	-	-	-
[Staudacher, 2015] Zugprüfung nach EN 408, Furnierschichtholz	1,5	12	758	11852	-	-	-	100	-	-	-	-	-
[Staudacher, 2015] Hochkantbiegeprüfung nach [EN 408, 2010], Furnierschichtholz	1,5	12	756	17556	-	720	-	-	-	-	-	-	-
[Staudacher, 2015] Schubversuch nach [Erhard, 2014], Furnierspertholz	1,5	11	741	-	-	-	458	-	-	-	-	-	5,4
[Staudacher, 2015] Schubversuch nach [Hirschmann, 2011], Furnierschichtholz	1,5	11	742	-	-	-	-	-	-	-	-	10,8	-
[Aydin et al., 2004] (Furnierschichtholz)	2,1	9	700	19512	-	-	-	-	55	-	118	-	-

f_{t,90}: Keine Werte vorhanden

Buchelt und Wagenführ (2008) führten Zug- und Biegezugprüfungen an längsgemesserten Einzelfurnieren aus Buche (*fagus sylvatica*) und Eiche (*quercus robur*) von 0,5 mm und 0,35 mm Stärke durch. Dabei wurden die mechanischen Kennwerte, der Einfluss der Furnierstärke und Holzart ermittelt, wobei sich der 3-Punkt-Biegeversuch als ungeeignet erwies.

Staudacher (2015) beschäftigte sich mit der Ermittlung mechanischer Kennwerte von Furnieren, unter anderem der Holzart Buche (*fagus sylvatica*). Es wurden Zugprüfungen an Einzelfurnieren von 3 mm Stärke durchgeführt. Des Weiteren wurden an 12-lagigem Furnierschichtholz mit 1,5 mm starken Lagen Zug- und Hochkantbiegeversuche nach DIN EN 408:2012-10 durchgeführt. Die Schubfestigkeiten wurden anhand von Schubversuchen nach Hirschmann (2011) an 11-lagigen Furnierschichtholz mit 1,5 mm starken Lagen untersucht. Zur Ermittlung der Rollschubfestigkeit wurde der Versuch nach Ehrhart (2014) herangezogen. Dieser erfolgte an 11-lagigem Furniersperrholz mit zwei Querlagen. Da in Staudacher (2015) jeweils nur eine geringe Anzahl an Versuchen durchgeführt wurde, sind aufgrund der Streuung die Materialwerte nicht sehr aussagekräftig.

Aydin et al. (2004) untersuchten neben dem Einfluss der Klebstoffart die mechanischen Eigenschaften von 9-lagigem Furnierschichtholz aus 2,1 mm starken Buchenfurnieren (*fagus orientalis*). In Tabelle 2.1 werden die Werte aus den Versuchen parallel zur Faser mit Phenol-Formaldehyd-Verklebung verwendet.

Normen oder Zulassungen, denen Werte entnommen werden können, existieren aktuell nur für Furnierprodukte. Zur Ermittlung einheitlicher und vollständiger mechanischer Kennwerte von Einzelfurnieren ist weiterer Forschungsbedarf notwendig.

2.2 Klebstoffsysteme

Zur kraftschlüssigen Verbindung der Furnierebenen und der BSH-Komponenten im holzbewehrten Holz ist eine dauerhafte Klebeverbindung erforderlich. Dabei werden die Furniere (Buche) mit dem Brettschichtholz aus Nadelholz in verschiedenen Kraft-Faser-Winkeln miteinander kraftschlüssig verklebt. Für diese Anwendung existieren zum aktuellen Zeitpunkt keine expliziten zugelassenen Klebstoffe. Für die Herstellung tragender Holzbauteile ist nach DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08 in Deutschland unabhängig von der Nutzungsklasse nur der Klebstofftyp I nach DIN EN 301:2018-01 zulässig. Die für die Herstellung von tragenden Holzbauteilen geeigneten Klebstoffe finden sich in den Klebstofflisten der Materialprüfungsämter Stuttgart und München. In Tabelle 2.2 sind im Holzbau übliche Klebstoffe zusammengestellt.

Tabelle 2.2 Gängige Klebstoffsystem für tragende Zwecke im Holzbau zusammengestellt von Wallner (2018)

Klebstofffamilie	Farbe	Aushärtezeit	Formaldehyd	Regelung	Anwendungsbereich
Phenol-Resorcin-Formaldehyd (PRF)	dunkel	Stunden bis Tage	Ja	BRL A Teil 1	Flächenverklebung, Keilzinkenverbindung
Melamin-Harnstoff (Urea)-Formaldehyd (MUF)	hell	Stunden bis Tage	Ja	BRL A Teil 1	Flächenverklebung, Keilzinkenverbindung
1-Komponenten-Polyurethan (1K-PUR)	hell	Wenige Minuten	Nein	abZ	Flächenverklebung, Keilzinkenverbindung
Emulsion-Polymer-Isocyanat (EPI)	hell	Wenige Stunden	Nein	abZ	Flächenverklebung, Keilzinkenverbindung
2-Komponenten-Polyurethan (2K-PUR)	hell	24 Stunden	Nein	abZ	Risssanierung, Einkleben von Stahlstäben
Epoxidharz (EP)	hell	24 Stunden	Nein		Risssanierung, Einkleben von Stahlstäben

Aktuell gibt es in Deutschland keinen zugelassenen Klebstoff für die Anwendung als Klebeverbindung zwischen Laubholz und Nadelholz mit unterschiedlicher Faserorientierung der Füge-teile. Nach der Zulassung für BSH aus Buche und BSH-Buche-Hybridträger (Z-9.1-679) können innerhalb der NKL 1 Buchenlamellen mit Nadelholzlamellen dauerhaft verklebt werden, wobei die große Lamellenstärke von Buchen-BSH im Vergleich zu den geringen Stärken der Furniere bei Buchen-FSH zu erhöhten Beanspruchungen in den Klebefugen führt.

Das Klebstoffsystem zur Verwendung für holzbewehrtes Holz muss folgende Kriterien erfüllen:

- Dauerhafte Eignung zur Verklebung von Laubholz (Buche)
- Dauerhafte Eignung zur Verklebung von Nadelholz
- Dauerhafte Eignung zur Verklebung von Füge-teilen unterschiedlicher Faserorientierung
- Fugenfüllende Eigenschaft

Da die Füge-teile von holzbewehrtem Holz nicht faserparallel, sondern in verschiedenen Winkeln zueinander verklebt werden, ist es zu erwarten, dass die Rollschubfestigkeit eines Füge-teils das schwächste Glied der Verbindung darstellt. Daher eignen sich zur erstmaligen Herstellung von HBH-Prüfkörpern im Prinzip alle im Holzbau üblichen Klebstoffsysteme. Um einwandfreie Klebstofffugen herzustellen empfiehlt sich ein fugenfüllender Klebstoff. Für die Herstellung der HBH-Prüfkörper wird deswegen ein Klebstoff der PRF-Familie gewählt (Abschnitt 5.2).

2.3 Faserverbundstrukturen

2.3.1 Grundprinzip

Ein Faserverbundwerkstoff besteht aus mindesten zwei oder mehreren Komponenten. Die Komponenten sind eine Matrix, Fasern sowie eine Grenzschicht (Schlichte), die Matrix und Faser verbindet (Abbildung 2.4).

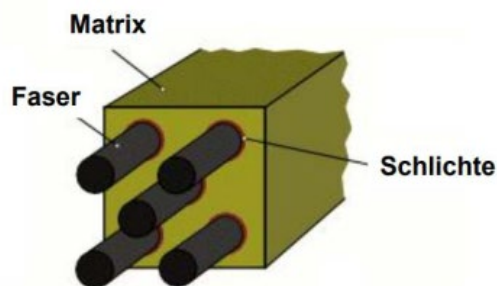


Abbildung 2.4 Fasern, Matrix und Schlichte (Quicker 2016)

Die positiven Eigenschaften der Komponenten werden so kombiniert, dass am Ende ein Verbundwerkstoff entsteht, der bessere Eigenschaften aufweist als die jeweiligen Ausgangsmaterialien. Faser und Matrix haben unterschiedliche Funktionen. Die Fasern verbessern die mechanischen Eigenschaften und die Matrix umschließt die Fasern dabei als schützender Mantel. Außerdem hält die Matrix die einzelnen Fasern in der richtigen Position fest. Die Funktionsweise der Faserverbundstoffe ist in vier Paradoxen von Werkstoffen verankert. Die vier Paradoxe gemäß Flemming und Roth (2003) werden im Folgenden dargestellt.

- Paradoxon 1: Die wirkliche Festigkeit eines festen Stoffes ist sehr viel niedriger als die theoretisch berechnete.
- Paradoxon 2: Ein Werkstoff in Faserform hat eine vielfach größere Festigkeit als dasselbe Material in anderer Form. Je dünner die Faser ist, desto grösser ist die Festigkeit.
- Paradoxon 3: Die gemessene Festigkeit einer Faser ist umso grösser, je kleiner die Messlänge ist.
- Paradoxon 4: In einem Composite-Material kann die Verbundstruktur als Ganzes Spannungen ertragen, die die schwächere Komponente zerbrechen würde, während von der stärksten Komponente ein viel höherer Prozentsatz der theoretischen Festigkeit realisiert werden kann, als wenn sie allein beansprucht würde.

Alle vier Paradoxe beruhen auf dem Fakt, dass Werkstoffe Schwachstellen bzw. Fehler in ihrer Struktur besitzen. Bei einem Werkstoff bestehend aus einer Matrix und Fasern mit kleinerem Durchmesser haben Schwachstellen und Strukturfehler einen viel geringeren Einfluss auf das gesamte System als bei einem identischen Werkstoff mit gleichem prozentualen Faseranteil aber etwas größerem Faserdurchmesser. Somit ist der relative Anteil der tragfähigen Fasern bei Versagen einer Faser bei dem Werkstoff mit kleinerem Durchmesser deutlich höher. Durch die Reduzierung der Schwachstellen basierend auf dem Wissen der vier Paradoxe findet also eine Homogenisierung statt, die deutlich verbesserte Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften als Resultat hervorbringt.

2.3.2 Fasern

Grundlegend werden zur Verstärkung vier verschiedene Klassen von Fasern verwendet. Die zwei primären Klassen werden unterschieden in natürliche und synthetische Fasern. Diese unterteilen sich wiederum jeweils in organische und anorganische Fasern. Einen nennenswerten Marktanteil bei hoch beanspruchten Faser-Kunststoff-Verbunden haben nur die Glas-, die

Kohlenstoff- und die Aramidfaser erreicht (Schürmann 2007). Da sich diese Faserarten auf dem Markt durchgesetzt haben, wird auf Aramid-, Kohlenstoff- und Glasfaser näher eingegangen. Neben den drei genannten Fasertypen gibt es noch einige weitere wie PBO-Fasern, Keramikfasern, Polyethylenfasern, Naturfasern etc.

In Tabelle 2.3 ist eine von Ludwig (2019) zusammengestellte Übersicht der positiven und negativen Eigenschaften von Glas-, Kohlenstoff- und Aramidfaser gezeigt.

Tabelle 2.3 Vergleich von Glas-, Kohlenstoff- und Aramidfaser nach Ludwig (2019)

Faser	Vorteile	Nachteile
Glasfaser	- hohe Dimensionsstabilität - nicht entflammbar, hoher Feuerwiderstand - hohe Feuchtebeständigkeit - sehr hohe biologische und chemische Beständigkeit - geringe Kosten (2-8 €/kg) - hohe Bruchdehnung - hohe Druck- und Zugfestigkeiten	- niedriges Elastizitätsmodul - hohe Wärmeausdehnung
Kohlenstofffaser	- geringe Dichte (1,74-190 g/cm³) - sehr hohe Festigkeiten und Steifigkeiten - sehr hohes Elastizitätsmodul - regulierbare Wärmeausdehnung - hohe Ermüdungsfestigkeit - hohe biologische und chemische Beständigkeit - sehr guter Kriechwiderstand	- hohe Kosten - sprödes Bruchverhalten - geringe faserparallele Druckfestigkeit in Relation zu Zugfestigkeit
Aramidfaser	- hohe Steifigkeit - hohe Zugfestigkeit - hohes Elastizitätsmodul - hoher Rissausbreitungswiderstand - sehr geringe Dichte (1,45 g/cm³) - hohe Bruchdehnung (ca. 3,5%) - nichtleitend - gute Dämpfung	- geringe Druckfestigkeit in Relation zu Zugfestigkeit - niedrige Feuchtebeständigkeit - hohe Strahlungsempfindlichkeit (UV-Strahlung) - schlechte Verarbeitbarkeit

Damit eine Grenzschicht entsteht, die einen kraftschlüssigen Verbund von Faser und Matrix gewährleistet, werden die Fasern bei der Herstellung speziell behandelt. Dies passiert entweder durch eine Oberflächenbehandlung oder mit Hilfe von Beschichtungen. Die Beschichtung, die für die bessere Haftbarkeit sorgt, wird als Schlichte bezeichnet. Neben dem resultierenden kraftschlüssigen Verbund zwischen Faser und Matrix dient die Schlichte auch noch als Schutz für besonders kerbempfindliche Fasern. Ob eine gute Haftung zwischen Fasern und Matrix vorliegt, lässt sich am sichersten anhand der Querzugfestigkeit beurteilen also der Festigkeit einer UD-Schicht bei Belastung quer zur Faserrichtung (Schürmann 2007). Die einzelnen Fasern, die unendlich lang hergestellt werden können, werden als Filamente bezeichnet. Neben Filamenten können noch kurze Fasern (Stapelfasern) hergestellt werden. Diese sind aber nicht so gebräuchlich, da sie über niedrigere Festigkeiten verfügen. Filamente können weiter zu Garnen, Zwirnen, Schnitffasern und Rovings verarbeitet werden. Bei Garnen werden die Filamente verdreht. Zwirne sind weiterverarbeitete verdrehte Garne. Um enge Radien in einem

Verbundwerkstoff ausfüllen zu können und Lücken mit Fasermaterial zu stopfen, werden geschnittene und somit sehr kurze Fasern benutzt. Unter Rovings versteht man die parallele Bündelung mehrerer Einzelfilamente (Monofilamente) zu Strängen. Hierbei spielt wiederum die Schlichte eine wichtige Rolle, da sie die Monofilamente in den Rovings miteinander verklebt. Die Feinheit der Rovings wird in der längenbezogenen Masse tex gemessen ($1 \text{ tex} = 1\text{g}/1000\text{m}$). Ebenso wird ein Roving über die K-Zahl bestimmt. Die K-Zahl gibt Auskunft über die Anzahl der Einzelfilamente ($1\text{K} = 1000 \text{ Filamente}$).

Aus Filamenten, Garnen, Schnitffasern und Rovings werden dann schlussendlich textile Faserhalbzeuge bzw. Prepregs angefertigt. Also fertige Faserprodukte, die in Kombination mit einer Matrix bereit zur Herstellung eines Faserverbundwerkstoffs sind. Genauer versteht man unter textilen Faserhalbzeugen meist flächige vorgefertigte Faserstrukturen, die durch Verfahren wie Weben, Flechten und Sticken hergestellt werden. Ein Prepreg ist ein Faserhalbzeug, das mit Harzen vorimprägniert wurde. Gründe für die Herstellung textiler Faserhalbzeuge sind nach Schürmann (2007) ein vereinfachter Herstellungsprozess, verringerte eigene Fertigungstiefe und eine erhöhte Qualität des Endproduktes durch bessere Kompetenzen des Halbzeugherstellers.

2.3.3 Matrix

Neben der schützenden Funktion und der Positionsfixierung der Fasern hat die Matrix noch andere Aufgaben. Zum einen muss sie die Kräfte in die Fasern einleiten und zum anderen auch wiederum von Faser zu Faser weiterleiten. Als Matrix können Duroplaste, Thermoplaste und Elastomere verwendet werden. In Abbildung 2.5 kann man die schematische Darstellung der molekularen Struktur von Polymeren erkennen. Neben den drei gebräuchlichsten Matrixsystemen gibt es noch anorganische Systeme. Diese können aus Metallen, Keramiken oder Kohlenstoff bestehen.

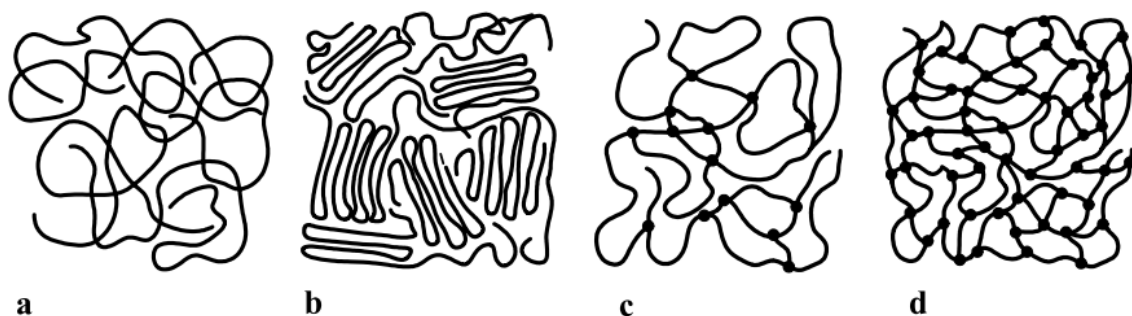


Abbildung 2.5 Schematische Darstellung der Kettenstruktur von Polymeren, a) linearer amorpher Thermoplast, b) linearer teilkristalliner Thermoplast, c) chemisch vernetzter Elastomer, d) chemisch vernetzter Duroplast (Schürmann 2007)

Überwiegend werden in der Faserverbundtechnologie Duroplaste eingesetzt. Die Gruppe der Duroplaste, die dabei speziell in Frage kommt, sind die Reaktionsharze. Nach DIN 16945:1989-03 sind „*Reaktionsharze flüssige oder verflüssigbare Harze, die für sich oder mit Reaktionsmitteln (Härter, Beschleuniger u.a.) ohne Abspaltung flüchtiger Komponenten durch Polyaddition bzw. Polymerisation härten*“. Außer Härter und Beschleuniger gibt es noch

Reaktionsharzmassen. Das sind vorgemischte Reaktionsharze, die bereits Härter und Beschleuniger enthalten. Duroplaste verfügen auf Molekülebene über eine stark vernetzte 3D-Kettenstruktur. Die mechanischen Eigenschaften hängen stark vom Aushärtungsgrad ab.

Anders als die Duroplaste werden Thermoplaste erst bei sehr hohen Temperaturen fließfähig. Das ist auf ihre molekulare Struktur zurückzuführen. Bei den Thermoplasten sind die Moleküle nicht chemisch miteinander verkettet, sondern über Sekundärbindungen miteinander verbunden. Diese werden auch Nebenvaleanzbindungen genannt. Es wird unterschieden in amorphe, teilkristalline und kristalline Thermoplaste. Mit zunehmender Kristallinität steigt das E-Modul und die Festigkeit. Die Bruchzähigkeit nimmt ab. Der Grad der Kristallinität wird unter anderem auch durch die Abkühlgeschwindigkeit beim Herstellungsverfahren bestimmt. Die ebenso ansteigende Sprödigkeit - bedingt durch die abnehmende Bruchzähigkeit - ist auch der Grund warum man auf kristalline Thermoplaste verzichtet.

Elastomere haben nur eine sehr schwache molekulare Bindung. Ihre Gebrauchstemperatur liegt oberhalb der Glasübergangstemperatur (T_g). Das Überschreiten der Glasübergangstemperatur beschreibt den Übergang von dem Zustand fest in gummiartig bis zähflüssig. Bei Elastomeren ist diese Glasübergangstemperatur gemäß Schürmann (2007) unter 0°C . Elastomere besitzen eine sehr hohe Reißdehnung. Ein weiterer Vorteil ist die reversible Verformung bei sehr hohen Belastungen. Allerdings haben Elastomere eine sehr geringe Steifigkeit. Diese ist so gering, dass die Fasern bei Druckbelastung in einem Verbund nicht ausreichend gestützt werden können. Aufgrund der chemischen Vulkanisation sind Elastomere nicht schmelzbar und somit auch nicht recyclebar. Tabelle 2.4 gibt einen Überblick über einige Beispiele der vorgestellten Polymere.

Tabelle 2.4 Überblick über die gebräuchlichsten Duroplaste, Thermoplaste und Elastomere (Drechsler et al., 2019)

Duroplaste	Thermoplaste	Elastomere
Epoxidharz (EP)	Polyethylenterephthalat (PET)	Silikon
Ungesättigte Polyesterharze (UP)	Polybutylenterephthalat (PBT)	Polyurethan (PUR)
Vinylesterharze (VE)	Polyamid (PA)	
Phenolharze	Polyphenylensulfid (PPS)	
	Polyetheretherketon (PEEK)	

2.3.4 Anknüpfungspunkte für holzbewehrtes Holz

Bei dem Vergleichen von Holz und Faserverbundwerkstoffen fällt in erster Linie auf, dass Holz wie es in der Natur vorkommt schon ein natürlicher Faserverbundwerkstoff ist. Auch die Funktionsweise ist hier die gleiche wie die bei den Faserverbundwerkstoffen. Die Zellulosefasern sind hierbei für die Festigkeit zuständig, während die Matrix aus Lignin die Fasern in Position hält und schützt. Die Fasern in dem Rohstoff Holz besitzen eine unidirektionale Richtung. Die Faserverteilung und -anordnung in Holz ist ebenso wie in Faserverbundstrukturen nicht ideal. Beim Holz ist das bedingt durch den natürlichen Wuchs, der viele Unregelmäßigkeiten mit sich bringt. Bei den Faserverbundstrukturen wiederum ist es unmöglich in den Herstellungsverfahren die Fasern derartig anzuordnen und mit Harz zu imprägnieren, dass sie in einem ideal homogenen gleichverteilten Querschnitt vorliegen. Die Funktionsweise des Materials Holz

kann man ebenfalls mit den vier Paradoxen von Faserverbundwerkstoffen und den drei Bedingungen nach Puck beschreiben. Anders als bei Holz weisen die Fasern und Matrix von Faserverbundstrukturen noch einige andere Vorteile auf wie zum Beispiel hohe Dimensionsstabilität oder sehr hohe biologische und chemische Beständigkeit. In Holzbauprodukten ist Klebstoff das Bindemittel für die einzelnen Laminatschichten bzw. Bretterlagen. Im Gegensatz dazu wird bei Faserverbundwerkstoffen kein extra Kleber benötigt, um die einzelnen Laminatschichten zu verbinden. Diese Aufgabe übernimmt ebenfalls die Matrix. Jedoch können Polyurethane in Verbundwerkstoffen als Matrix dienen und auch bei tragenden Holzbauprodukten als Klebstoff.

Für die Berechnung und das Aufstellen des Elastizitätsgesetzes in dem Themenbereich der Faserverbundstrukturen sind die Ingenieurkonstanten (Schubmodul, Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl) elementar. Diese Größen sind ebenfalls beim Material Holz zutreffend.

Im Gegensatz zu tragenden Holzbauprodukten finden Faserverbundwerkstoffe in erster Linie im Leichtbau Anwendung.

Aufgrund des natürlichen Wachses von Holz und dem dementsprechend ringförmigen Wachstum liegen bei Holz und Faserverbundstrukturen unterschiedliche Arten von Orthotropie vor. Für Bauholz liegt eine rhombische Anisotropie vor. Unidirektionale Schichten (UD-Schichten) besitzen die Eigenschaft der transversalen Isotropie. Abbildung 2.6 zeigt den Unterschied der beiden Matrizen.

Orthotropic Material

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}$$

Transversely isotropic Material

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} E_3 &= E_2 \\ G_{13} &= G_{12} \\ \nu_{13} &= \nu_{12} \end{aligned}$$

9 independent constants:

$$E_1, E_2, E_3, G_{23}, G_{31}, G_{12}, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$$

5 independent constants:

$$E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}, \nu_{23} (, G_{23})$$

Abbildung 2.6 Vergleich einer Steifigkeitsmatrix rhombische Anisotropie (links) mit einer Steifigkeitsmatrix transversale Isotropie (rechts) (Drechsler und Hartmann 2018)

Um Spannungen in einem Mehrschichtverbund aus Holz nach der klassischen Laminattheorie berechnen zu können, müsste man also als Ausgangsdaten anders als bei Faserverbundstrukturen neun Konstanten und nicht fünf Konstanten ermitteln. Die Festigkeitsberechnung im Anschluss an die klassische Laminattheorie läuft dann analog wie bei Faserverbundwerkstoffen für Holzbauprodukte ab. Allerdings könnte man hier hinsichtlich der geringen Querkzug- und Schubfestigkeiten von Holz das Bruchkriterium modifizieren und somit umformulieren.

Trummer et al. (2004) formulieren es nachfolgendermaßen. Dabei ist f die Bruchspannung für Nadelholz oder der Festigkeitskennwert für den Versagenszustand einer UD-Schicht.

$$\text{Schub- und Querkzugversagen:} \quad \frac{\sigma_2^2}{f_2^2} + \frac{\tau_{12}^2}{f_{12}^2} = 1 \quad (2-1)$$

$$\text{Zugversagen:} \quad \frac{\sigma_1^2}{f_1^2} = 1 \quad (2-2)$$

Die Voraussetzungen gemäß Schürmann (2007), die bei einer Übertragung der klassischen Laminattheorie auf den Holzbau problematisch sein könnten, sind die angenommene Dünnwandigkeit und die damit verbundene Annahme eines ebenen Spannungszustandes sowie die Annahme eines linear, ideal elastischem Werkstoffverhalten. Die Dünnwandigkeit ist bei einer ausreichenden Dimensionierung gegeben. Da Holz ein viskoelastisch-plastischer Werkstoff ist, müssten hier Modifikationen bzw. Lösungen gefunden werden. Allerdings zeigte sich in vorangegangenen Forschungsprojekten und Untersuchungen, dass sich bei der Anwendung der klassischen Laminattheorie im Holzbau Berechnungen ergaben, die mit experimentell ermittelten Werten übereinstimmten. Untersuchungen wie die von Martínez-Martínez et al. (2018) zeigen, dass ANSYS Composite Preppost (ACP) auch schon im Bereich des Holzbaus Anwendung gefunden hat. Das ist auch aus dem Grund möglich da innerhalb von ANSYS Composite Preppost für dickwandige Strukturen das „Composite Solid Model“ verwendet werden kann.

3 Numerische Untersuchungen (AP2)

3.1 Allgemein

Um effiziente Aufbauten von holzbewehrtem Holz zu ermitteln, wurde eine umfangreiche Parameterstudie zu Furnierdicken und Furnierneigungen durchgeführt. Es wurden Querschnitte mit einer Furnierebene (I) und mit zwei Furnierebenen (II) im linear-elastischen Zustand untersucht. Die BSH-Komponenten und die Furnierlagen wurden als 3D-Volumenkörper mit einem linear-elastischen orthotropen Materialmodell abgebildet. Es wurden Volumenelemente (ANSYS-SOLID186) mit quadratischen Ansatzfunktionen verwendet. Die Klebstoffschichten wurden als starrer Verbund modelliert. Die Simulation wurde mit der Software ANSYS® durchgeführt. In Tabelle 3.1 sind die verwendeten Steifigkeitskennwerte gezeigt.

Tabelle 3.1 Steifigkeitskennwerte für die numerische Simulation

	E_x [N/mm ²]	E_y [N/mm ²]	E_z [N/mm ²]	ν_{xy} [-]	ν_{yz} [-]	ν_{xz} [-]	G_{xy} [N/mm ²]	G_{yz} [N/mm ²]	G_{xz} [N/mm ²]
BSH - GL24h	11.500	300	300	0,016	0,33	0,016	650	65	650
Furnierlagen	5.000 – 20.000	470	470	0,016	0,33	0,016	850	430	850

Die Steifigkeitskennwerte der BSH-Komponenten wurden auf Basis der Mittelwerte der DIN EN 14080:2013-09 angesetzt. Für die Furnierlage wurden die Kennwerte für Platte BauBuche S aus der Zulassung (Z-9.1-838) verwendet. Als Rollschubmodul (G_{yz}) wurde der Wert für das Flachkantschubmodul ($G_{v,0,flat,mean}$) der Platte BauBuche Q angesetzt, da das Rollschubmodul der Querlagen dabei maßgebend wird. Die Querkontraktionszahlen (ν) wurde nach (Niemz und Sonderegger 2017) aus den Werten von Fichte abgeleitet.

3.2 Querzug

Um den Einfluss von Furnieren auf die Zugspannungen senkrecht zur Faser in Brettschichtholz zu untersuchen, wurden kleine Körper mit einer Länge $l = 100$ mm und einer Höhe $h_0 = 400$ mm und unterschiedlichen Furnierneigungen modelliert. Die Breite b_1 wurde in 10 mm Schritten variiert. Anschließend wurden die Zugspannungen senkrecht zum Faserverlauf bei $h/2$ auf der Oberfläche (d.h. größter Abstand zu den Furnieren) der BSH-Komponenten des HBH extrahiert und mit unbewehrtem Brettschichtholz verglichen. Damit kann der Einfluss der Furnierebene in Abhängigkeit von der Breite der BSH-Komponenten abgeschätzt werden. Abbildung 3.1 zeigt den Versuchsaufbau des FEM-Modells.

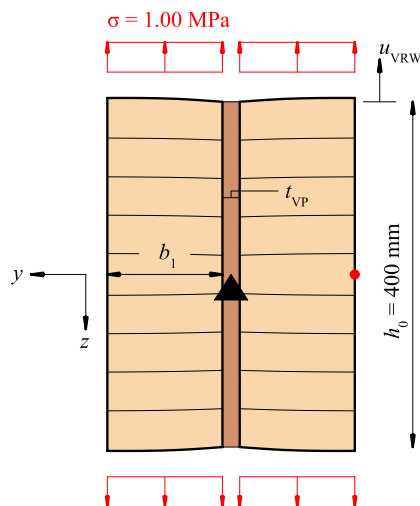


Abbildung 3.1 FEM-Aufbau zur Untersuchung des Einflusses der Furniere auf die Zugspannungen senkrecht zur Faser im Brett-schichtholz, Auswertepunkt auf der Brett-schichtholzoberfläche (roter Punkt), Darstellung Querschnitt

Abbildung 3.2 zeigt den Abbau der Zugspannungen senkrecht zur Faser in der BSH-Komponenten von HBH für vier verschiedene Furnieraufbauten und drei Breiten b_1 (60 mm, 80 mm, 100 mm). Die Spannungen $\sigma_{t,90,HBH}$ sind die Spannungen der BSH-Komponenten HBH.

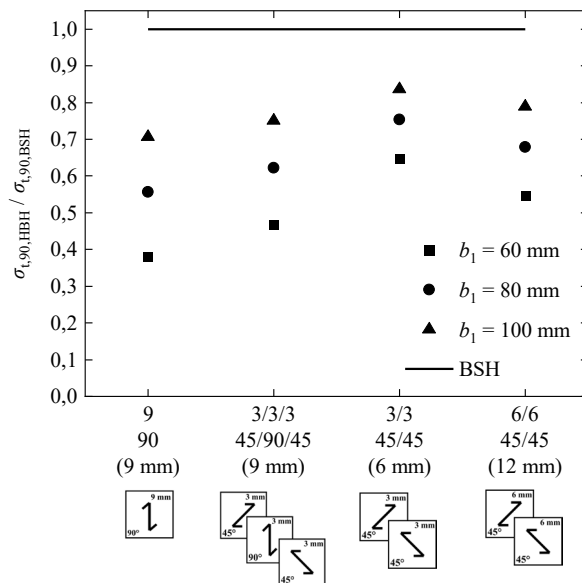
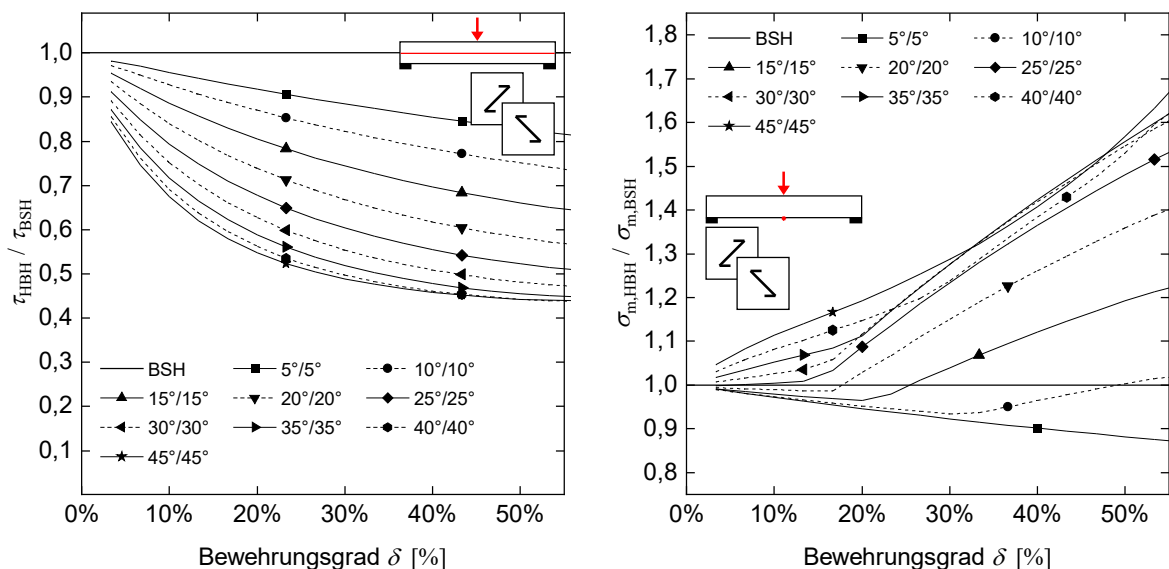


Abbildung 3.2 Einfluss des Furnierwinkels und der Furnierdicke auf die Zugspannungen senkrecht zur Faser in den BSH-Komponenten von HBH mit einer Furnierebene

Die Furniere können die Zugspannungen senkrecht zur Faser der BSH-Komponenten im Vergleich zu unbewehrtem BSH um 20 bis 60 % reduzieren. Hierfür ist ein Mindestbewehrungsgrad von 10 bis 15 % erforderlich. Bei einer Breite $b_1 = 60$ mm des BSH-Bauteils können die Querzugspannungen um bis zu 50 % reduziert werden. Mit zunehmender Breite b_1 nimmt der Einfluss der Furniere ab. Bei einer Breite $b_1 = 100$ mm der BSH-Komponenten können die Spannungen noch um 20 % reduziert werden.

3.3 Schub und Biegung

Der Einfluss der Furniere auf die Schubspannungen in den BSH-Komponenten wurde mit Hilfe eines numerischen Modells eines 3-Punkt-Biegeversuchs untersucht. Das Modell hatte ein Verhältnis $l/h = 5$ und die Breite des HBH-Trägers betrug 180 mm. Der Bewehrungsgrad wurde schrittweise erhöht. Mit steigendem Bewehrungsgrad nimmt die Schubspannung in den BSH-Komponenten ab (Abbildung 3.3) (a).



(a) Schubspannung der BSH-Komponenten von HBH in Abhängigkeit von Bewehrungsgrad und Neigungswinkel der Furnierlagen

(b) Einfluss des Neigungswinkels der Furnierlagen auf die Biegespannungen der BSH-Komponenten von HBH in Abhängigkeit des Bewehrungsgrads

Abbildung 3.3 Einfluss des Neigungswinkels der Furnierlagen auf die Biege- und Schubspannungen in der BSH-Komponenten von HBH

Eine kreuzweise Anordnung der Furniere in einem Winkel von 45° (+45°/-45°) zeigt das größte Potential. Die Schubspannungen in den BSH-Komponenten können um 20 – 50 % reduziert werden. Abbildung 3.3 (b) zeigt die Biegespannungen der BSH-Komponenten in Abhängigkeit des Neigungswinkels der Furnierlagen und des Bewehrungsgrads. Bei einem Furnierwinkel zwischen 0° und 25° (+25°/-25°) steigen die Biegespannungen der BSH-Komponenten bis zu einem Bewehrungsgrad von ca. 15 % nicht wesentlich an. Bei größeren Bewehrungsgraden sinkt der Anteil an Längsfasern der BSH-Komponente, die zum Abtrag der Längsspannungen zur Verfügung stehen, was einen deutlichen Anstieg der Biegespannungen zur Folge hat.

3.4 Zwischenfazit

Die FEM-Analysen zeigen, dass die Furnierebenen die Schub- und Querkzugspannungen der BSH-Komponenten reduzieren können. Die Simulationen ergaben, dass die Furniere einen Elastizitätsmodul $E_{0,FE}$ von mindestens 10.000 N/mm² haben sollten.

4 Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte von Furnieren aus Buche (AP 3)

4.1 Allgemein

Das Ziel der Untersuchung ist die Ermittlung von Festigkeits- und Steifigkeitskennwerten mehrlagig faserparallel verklebter Furniere aus Buche. Es werden die Zugfestigkeit in Faserlängsrichtung ($f_{t,k,FL}$) und der E-Modul in Faserlängsrichtung ($E_{0,FL}$) von Furnierlagen bestimmt.

4.2 Herstellung

Für die Prüfkörper wurden Einzelfurniere mit einer Furnierdicke $t_F = 1,50$ mm verwendet. Die Furniere wurden aus drei unterschiedlichen Baumstämmen entnommen. Der Mittelwert der Rohdichte ($\rho_{F,MW}$) der Einzelfurniere wurde mit dem Darrverfahren nach EN 13183-1:2012 ermittelt und beträgt 744 kg/m^3 (COV 5,7 %). Der Mittelwert der Holzfeuchtigkeit ($u_{F,MW}$) der Furniere der drei Stämme betrug 9,6 % (COV 2,0 %). Untersucht wurden ein, zwei, vier und sechs faserparallel verklebte Einzelfurniere. Als Klebstoff wurde das Klebharz Silekol® 262, ein Gemisch aus Produkten der Polykondensation von Harnstoff und Formaldehyd in wässriger Lösung, verwendet, da der Hersteller der Prüfkörper in seiner Produktionsanlage nur diesen Klebstoff verarbeiten konnte. Zusätzlich wurden pro Baumstamm jeweils drei Prüfkörper mit vier und zwei Prüfkörper mit sechs Furnierlagen und einem Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Klebstoff (PRF-Klebstoff) nach (Z.9.1-1.840) in der Materialprüfanstalt der TU-München hergestellt.

4.3 Versuchsaufbau und Durchführung

Zur Bestimmung der Zugfestigkeit und des Elastizitätsmoduls wurden Zugversuche nach DIN EN 408:2012-10 durchgeführt. Der Prüfaufbau ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Die Berechnung der charakteristischen Werte erfolgte nach DIN EN 14358:2016-11. Die Belastung wurde weggesteuert aufgebracht. Für die Ermittlung des Elastizitätsmoduls wurden seitlich zwei induktive Wegaufnehmer angebracht. Die Lasteinleitung erfolgte über Klemmbacken auf einer Länge von 150 mm.

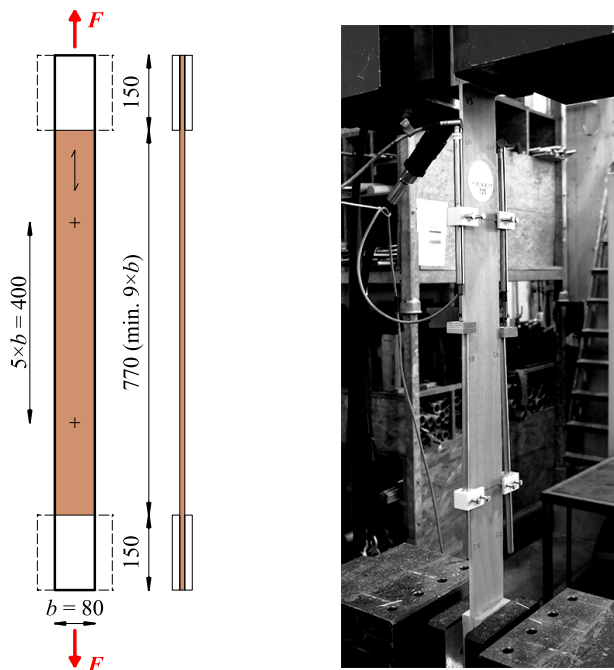
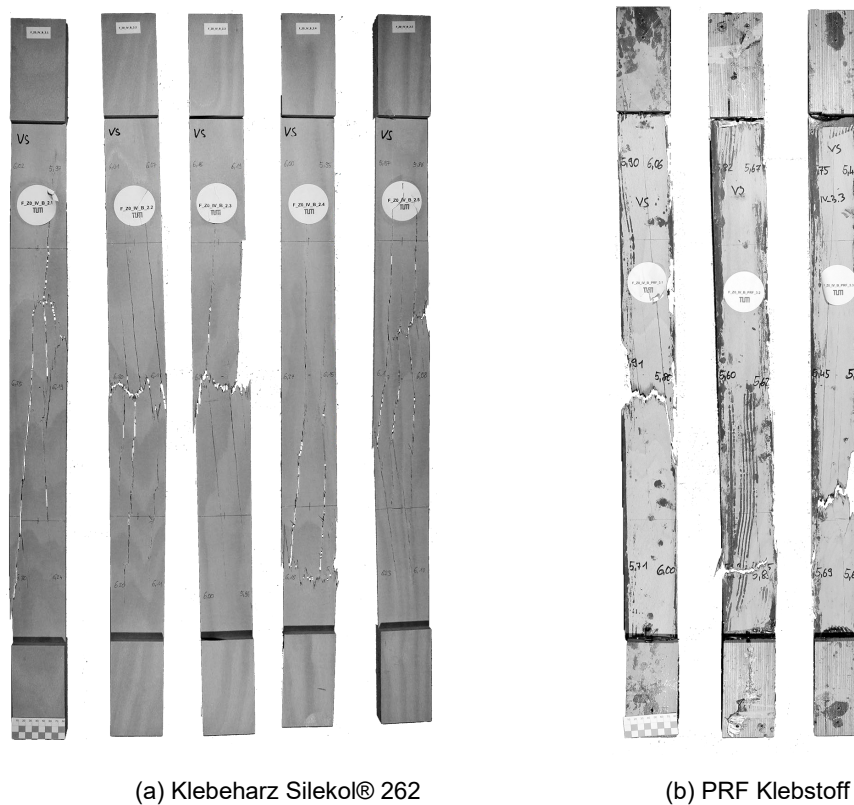


Abbildung 4.1 Versuchsaufbau der Zugversuche der Buchenfurniere, Abmessungen in mm

4.4 Auswertung und Ergebnisse

Die harnstoffverklebten Prüfkörper zeigten ein spröderes Bruchverhalten als die PRF-verklebten Prüfkörper. Das Versagen der Zugproben war einerseits durch Zugbrüche, andererseits durch eine Kombination aus Schub- und Zugbrüchen gekennzeichnet (Abbildung 4.2).



(a) Klebharz Silekol® 262

(b) PRF Klebstoff

Abbildung 4.2 Bruchbilder der Zugversuche von IV lagig faserparallel verklebten Furnierlagen

Die Ergebnisse der Zugversuche zeigen einen starken Homogenisierungseffekt für mehrlagig faserparallel verklebte Buchenfurniere, sowohl für die Zugfestigkeit ($f_{t,k,FL}$) als auch für den Elastizitätsmodul ($E_{0,FL}$) (Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4). Der Mittelwert von vier verklebten Furnieren ist doppelt so hoch wie der der Einzelfurniere. Bei den Prüfkörpern mit vier und sechs verklebten Furnieren wurden charakteristische Zugfestigkeiten ($f_{t,k,FL}$) von bis zu 100 N/mm² erreicht. Ein Einfluss der unterschiedlichen Klebstoffe auf die Zugfestigkeit konnte nicht festgestellt werden. Im Gegensatz dazu konnte jedoch ein Einfluss der Klebstoffe auf den Elastizitätsmodul beobachtet werden. Der Mittelwert des Elastizitätsmoduls der PRF-verklebten Prüfkörper mit vier Einzelfurnieren ist um 9,0 %, der mit sechs Einzelfurnieren um 13,4 % niedriger als der Prüfkörper mit Harnstoffklebstoff. Harnstoff-Formaldehyd-Klebstoff hat kleinere Moleküle und in Abhängigkeit vom Vernetzungsgrad der Moleküle tendenziell eine bessere Eindringfähigkeit als bereits stärker vernetzte PRF-Klebstoffe (Dunky und Niemz 2002), (Zeppenfeld und Grunwald 2005). Deshalb kann ein niedrig vernetzter Harnstoff-Formaldehyd-Klebstoff tiefer zwischen die Fasern der Buchenfurniere eindringen und verursacht dadurch einen Versteifungseffekt. Dieser ist umso größer, je dünner die Einzelfurniere sind. Die Mittelwerte der Elastizitätsmodule liegen in etwa auf dem gleichen Niveau wie die ähnlicher Laubholzprodukte (z.B. BauBuche S, $E_{0,mean} = 16.800$ N/mm², nach Z-9.1-838).

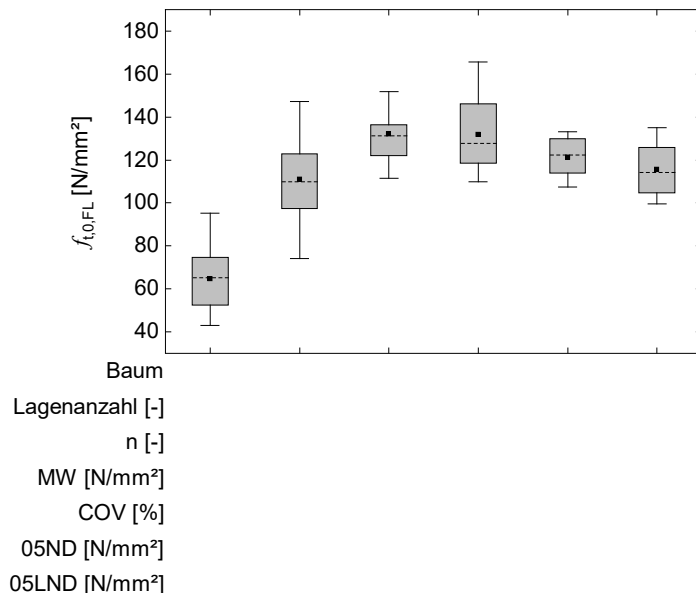


Abbildung 4.3 Zugfestigkeit parallel zur Faser ($f_{t,0,FL}$) mehrlagig faserparallel verklebter Buchenfurniere, 05ND und 05LND sind die 5 %-Quantile von Normal- und Lognormalverteilungen

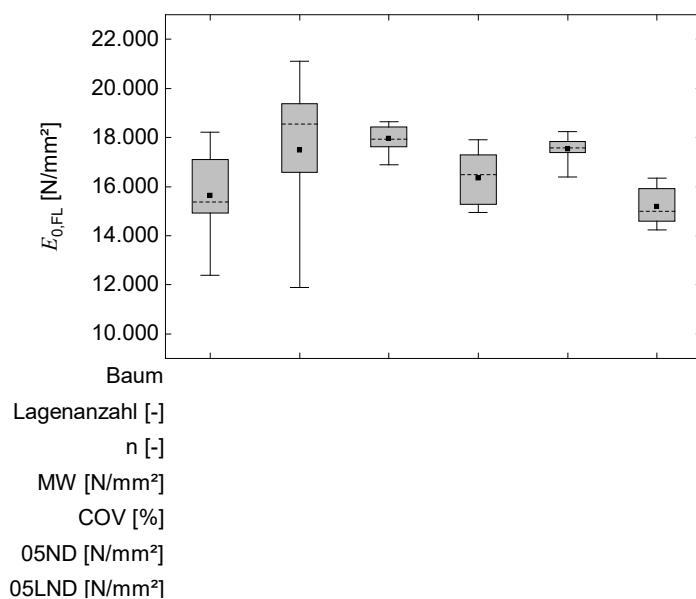


Abbildung 4.4 Elastizitätsmodul parallel zur Faser ($E_{t,0,FL}$) mehrlagig faserparallel verklebter Buchenfurniere, 05ND und 05LND sind die 5 %-Quantile von Normal- und Lognormalverteilungen

Auf Basis der untersuchten Furniere mit 1,50 mm Dicke wird ein Furnierlagenaufbau mit vier Einzelfurnieren empfohlen. Dadurch gleichen sich die wachstumsbedingten Unstetigkeiten der Furniere aus, und die Zugfestigkeiten können im Vergleich zu Einzelfurnieren signifikant erhöht werden.

5 Biege- und Schubversuche (AP3)

5.1 Allgemein

Zur Ermittlung des Trag- und Steifigkeitsverhaltens von holzbewehrtem Holz (HBH) bei Biege- und Schubbeanspruchung wurden drei HBH-Querschnittsaufbauten (Serie 1-3) untersucht. Zusätzlich wurde je Serie ein Brettschichtholz-Querschnitt (BSH-Querschnitt) als Referenzprüfkörper ohne Furniere geprüft, der ebenfalls aufgetrennt und anschließend Blockverklebt wurde (Abbildung 5.1).

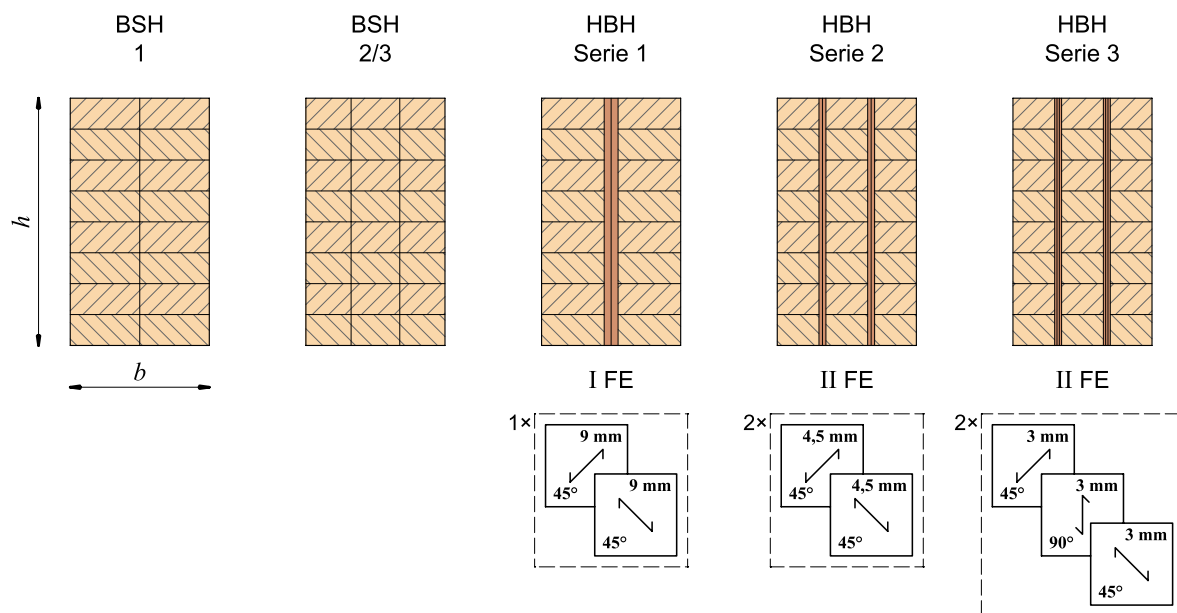


Abbildung 5.1 Querschnitte der HBH-Prüfkörper für die experimentellen Untersuchungen (Maße in mm)

Die Querschnittshöhe (h) der Biegeversuche betrug 320 mm, die der Schubversuche 400 mm. Die Querschnittsbreite (b) war einheitlich 180 mm. Alle HBH Prüfkörper hatten einen Bewehrungsgrad δ von 10 %. Das Versuchsprogramm war mehrstufig aufgebaut. Vor den zerstörenden Versuchen wurden an den Prüfkörpern nichtzerstörende Schwingungsmessungen durchgeführt. Die Bezeichnung der Prüfkörper erfolgt nach der Nomenklatur in Abbildung 5.2.

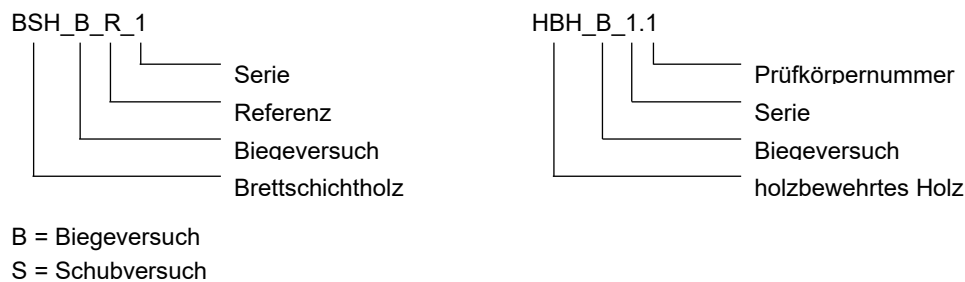


Abbildung 5.2 Nomenklatur der Prüfkörperbezeichnung

5.2 Herstellung

Für alle Prüfkörper wurde Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL28h nach DIN EN 14080:2013-09 verwendet. Die Furnierebenen wurden aus 1,5 mm dicken und ca. 160 mm breiten Einzelfurnieren aus Buche aufgebaut. Die Rohdichte ($\rho_{F,MW}$) und die Holzfeuchtigkeit ($u_{F,MW}$) der Einzelfurniere wurden an 20 Proben mit dem Darrverfahren nach EN 13183-1:2012 ermittelt. Die Rohdichte betrug 735 kg/m^3 (COV 12,7 %), die Holzfeuchtigkeit 9,9 % (COV 8,6 %). Als Klebstoff wurde ein fugenfüllender PRF-Klebstoff nach Z.9.1-1.840 eingesetzt. Dieser Klebstoff entspricht Klebstofftyp I nach DIN EN 301:2018-01 und ist für die Blockverklebung mit Klebstoffdicken bis 1,5 mm anwendbar. Zur Verstärkung der Biegetragfähigkeit der Schubprüfkörper wurden Lamellen ($d = 40 \text{ mm}$) aus Furnierschichtholz (BauBuche, Z-9.1-838) im Biegezug- und Biegedruckbereich aufgeklebt.

Die Herstellung der HBH-Prüfkörper erfolgte stufenweise, um möglichst gleichbleibende Materialeigenschaften der BSH-Komponenten sicherstellen zu können. Der Herstellungsprozess ist in Abbildung 5.3 (a-i) gezeigt. Für die Schubversuche wurde je HBH-Serie ein Brettschichtholzbalken ($b/h = 205/400 \text{ mm}$) produziert. Anschließend wurden die Balken in vier gleich lange Teile abgelängt (a) und mittels eines mobilen Sägewerks aufgetrennt (b). Aus den vier Balken wurden ein BSH-Prüfkörper und drei HBH-Prüfkörper einer Serie hergestellt. Die HBH-Prüfkörper der Biegeversuche wurden analog gefertigt, je HBH-Serie wurden zwei Brettschichtholzbalken ($b/h = 205/320 \text{ mm}$) produziert und anschließend mittig abgelängt. Mittels einer Beleimungsmaschine erfolgte der Klebstoffauftrag (je Klebefuge 750 bis 850 g/m^2) der Einzelfurniere (c). Anschließend wurden die Furniere mit den je nach HBH-Prüfkörperserie vorgegebenen Winkeln (α_{FL}) von 45° bzw. 90° (Abschnitt 5.1) positioniert und mit Stahlklammern lagegesichert (d). Einzelne Furnierblätter wurden mit Dehnungsmessstreifen ausgestattet und anschließend verklebt (e). Jeweils vier Prüfkörper wurden produziert und in der Blockpresse für 12 Stunden bei einem Pressdruck von ca. $1,00 \text{ N/mm}^2$ eingespannt (f). Die Lufttemperatur in der Produktionshalle schwankte zwischen 25 und 30°C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 bis 60% . Nachfolgend wurden die Prüfkörper ausgespannt (g) und die überstehenden Furnierebenen abgeschnitten (h). Abschließend wurden auf die Prüfkörper der Schubversuche die FSH-Biegezug- und FSH-Biegedruckverstärkungen aufgeklebt (i).



(a) Ablängen der BSH Balken



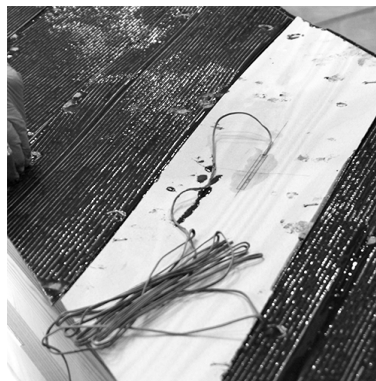
(b) Auftrennen der BSH Balken



(c) Leimauftrag auf die Furniere



(d) Positionierung der Furniere



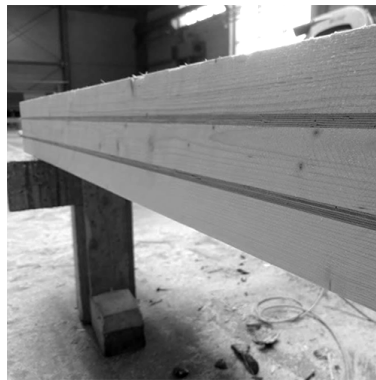
(e) Verkleben der Dehnungsmessstreifen (DMS)



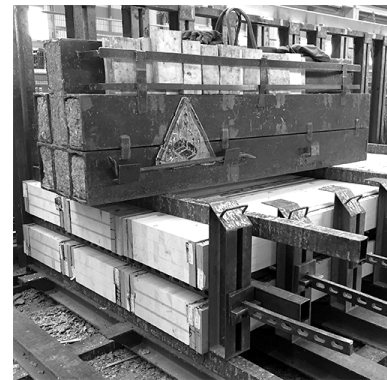
(f) Blockverklebung



(g) Verklebte HBH Prüfkörper



(h) Abbund HBH Prüfkörper



(i) Verklebung FSH Verstärkung

Abbildung 5.3 Produktionsschritte der HBH Prüfkörperherstellung

5.3 Delaminierung

Zur Überprüfung der Verklebungsqualität der Furniere untereinander und der Furniere zu den BSH-Komponenten wurden Delaminierungsversuche nach DIN EN 302-2:2017-11 durchgeführt. Dazu wurden je BSH-Serie ein Prüfkörper ($l/b/h = 75/180/400$ mm) und je HBH-Serie zwei Prüfkörper untersucht. Für die Versuche werden die verklebten Prüfkörper einer Wässerung/Trocknung unterzogen und dabei durch Eintauchen gewässert und abwechselnd hohem und niedrigem (Vakuum-)Druck ausgesetzt. Anschließend werden sie schnell bei niedriger Feuchte in einem festgelegten Luftstrom getrocknet. Das Ausmaß der Delaminierung (Öffnungen in den Klebstoffugen) als Ergebnis dieser Behandlungen wird gemessen und zur Gesamtlänge der Klebstoffugen an beiden Hirnholzflächen des Prüfkörpers in Beziehung gesetzt. Für die BSH- und HBH-Prüfkörper wurde das Verfahren bei hoher Temperatur (für Klebstofftyp I) durchgeführt. Die Delaminierung wurde für jeden Prüfkörper nach Gleichung (5-1) berechnet und in Prozent angegeben. Das Ergebnis ist nach DIN EN 302-2:2017-11 auf 0,1 % zu runden.

$$D = \frac{l_1}{l_2} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5-1)$$

D	[mm]	Delaminierung
l_1	[mm]	Gesamtlänge der Delaminierung an beiden Hirnholzflächen
l_2	[mm]	Gesamtnennlänge der Klebstoffugen an beiden Hirnholzflächen

Die höchstzulässige Delaminierung für Klebstofftyp I nach DIN EN 301:2018-01 beträgt 5 %. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.1 gezeigt.

Tabelle 5.1 Ergebnisse der Delaminierungsversuche

Material	Prüfkörper	l_2 [mm]	l_1 [mm]	Delaminierung [%]
BSH	D_1	788	19	2,4
	D_2	1576	18	1,1
	D_3	3152	3	0,1
	D_1.1	1576	116	7,4
	D_1.2	1576	0	0
HBH	D_2.1	3152	246	7,8
	D_2.2	3152	113	3,6
	D_3.1	3152	36	1,1
	D_3.2	3152	85	2,7

Die Verklebung der einzelnen Furniere zeigte keine Delaminierung. Bei der Verklebung zwischen den Buchenfurnieren und den BSH-Komponenten wurden die Vorgabe der DIN EN 301:2018-01 lediglich bei zwei Prüfkörpern geringfügig überschritten. Der verwendete Klebstoff ist für die Anwendung in holzbewehrtem Holz geeignet.

5.4 Biegeversuche

5.4.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Je HBH-Serie wurden drei Prüfkörper und ein BSH-Referenzprüfkörper geprüft. Der Versuchsaufbau folgte den Angaben der Prüfnorm DIN EN 408:2012-10. Die Spannweite der 4-Punkt-Biegeversuche betrug $18 \times h$, wobei h mit 320 mm die Höhe des Balkens ist (Abbildung 5.4). Die Kraft wurde an zwei Punkten in einem Abstand von $6 \times h$ von den Auflagern eingeleitet. Dazu wurden zwei Hydraulikzylinder mit einer maximalen Kraft von je 250 kN eingesetzt.

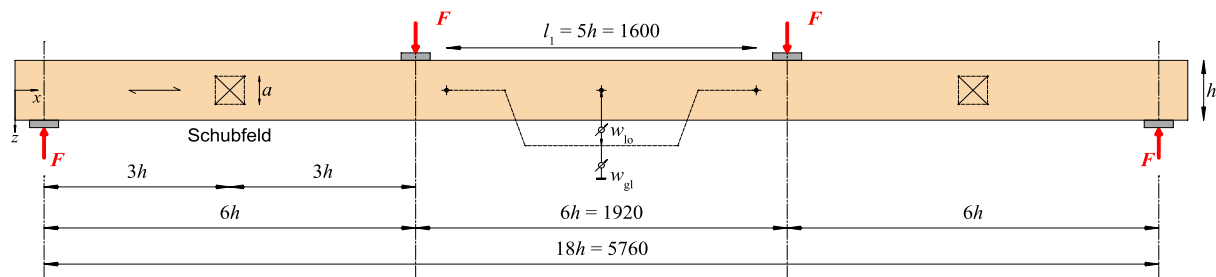
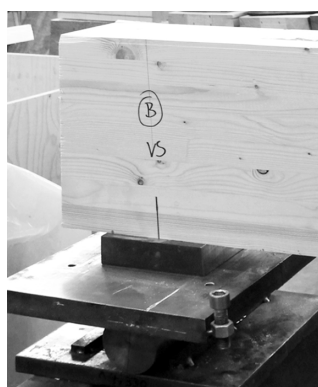


Abbildung 5.4 Prüfaufbau der 4-Punkt-Biegeversuche nach DIN EN 408:2012-10 für die Bestimmung der Biegefestigkeit und des Elastizitätsmoduls, $h = 320$ mm

Die globale Durchbiegung (w_{gl}) wurde mit einem Seilzugwegaufnehmer in Feldmitte aufgezeichnet, die lokale Durchbiegung (w_{lo}) auf beiden Trägerseiten durch induktive Wegaufnehmer über eine Traverse im Abstand von $l_1 = 5 \times h$ (Abbildung 5.5) (b). Zur Ermittlung des Schubmoduls wurden in den Randfeldern auf jeder Trägerseite Messkreuze ($a = 150$ mm) angebracht (Abbildung 5.4). Als Lasteinleitungsplatten wurden Stahlplatten mit einer Dicke von 40 mm verwendet (Abbildung 5.5). Die Platten mit einer Länge von 150 mm erstreckten sich über die gesamte Prüfkörperbreite. Unter Berücksichtigung der Querdrukfestigkeit nach DIN EN 14080:2013-09 von BSH und der erwarteten Biegefestigkeit waren keine Querdrukverstärkungen vorgesehen.



(a) Auflager



(b) Lasteinleitung

Abbildung 5.5 Auflager und Lasteinleitung

Die Träger wurden auf Stahlrollen statisch bestimmt gelagert (Abbildung 5.5) (a). Dazu wurde die horizontale Verschiebung einer Rolle behindert. Auf eine seitliche Abstützung gegen ein

mögliches Biegeknickversagen wurde verzichtet. Bei allen Versuchen wurde die Geschwindigkeit des Belastungszyinders so gewählt, dass die geschätzte Höchstlast F_{est} innerhalb von $300 \text{ s} \pm 120 \text{ s}$ erreicht wurde. Aus den ermittelten Rohdichten der Prüfkörper ist ein Einfluss der Klebefugen ablesbar (Abbildung 5.6) (a). Die Prüfkörper der HBH-Serie 2 und 3 haben im Gegensatz zur HBH-Serie 1 eine Klebefuge mehr, dadurch steigt die Rohdichte um 5,2 %. Die Holzfeuchte der BSH-Komponenten wurde an vier unterschiedlichen Lamellen je Prüfkörper ermittelt (Abbildung 5.6) (b). Der Mittelwert der Holzfeuchte (u_{MW}) der BSH-Komponenten über alle Prüfkörper beträgt 13,2 % (COV 5,7 %).

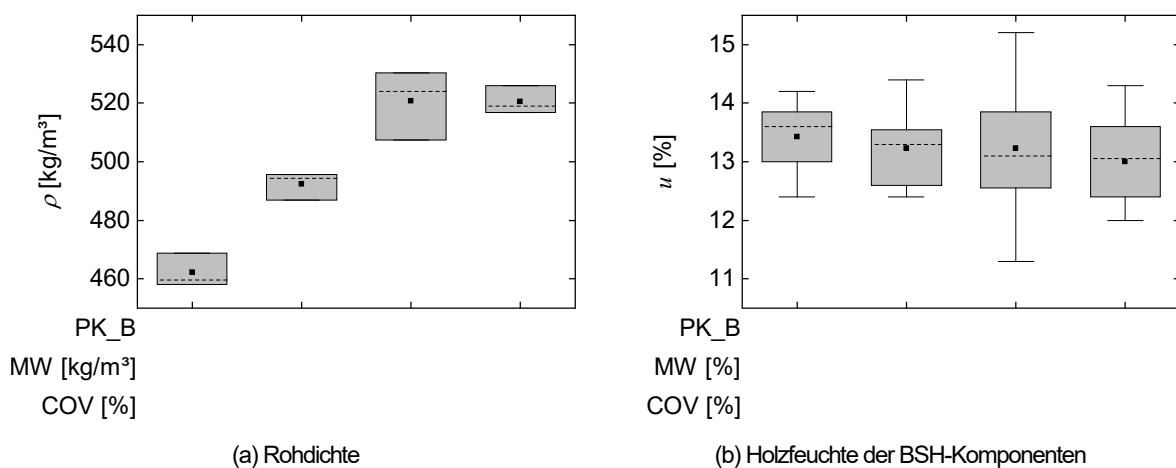
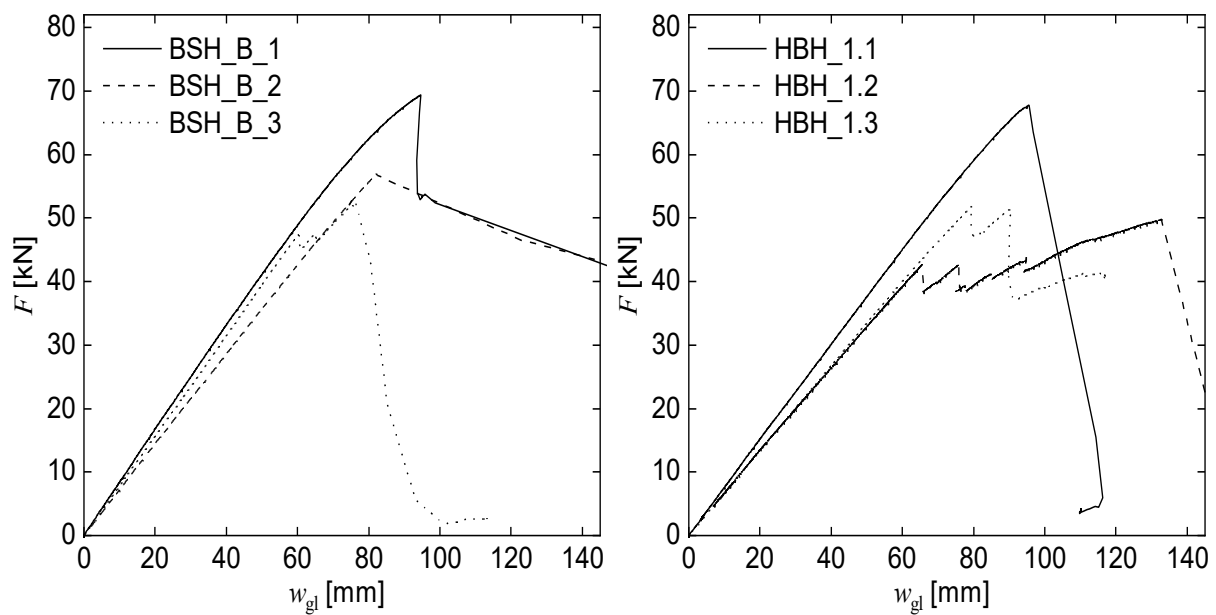


Abbildung 5.6 Rohdichte und Holzfeuchte der BSH und HBH Prüfkörper

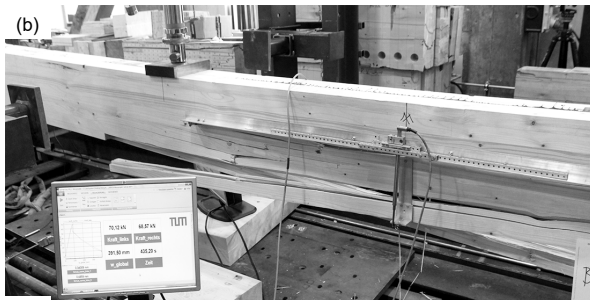
5.4.2 Auswertung und Ergebnisse

Die BSH- und HBH-Prüfkörper versagten spröde auf Biegezug zwischen den Lasteinleitungspunkten. Die HBH-Prüfkörper tendierten zu einem räumlich lokalen Biegebruchverhalten im Vergleich zu den BSH-Referenzprüfkörpern (Abbildung 5.7 und Abbildung 5.8).

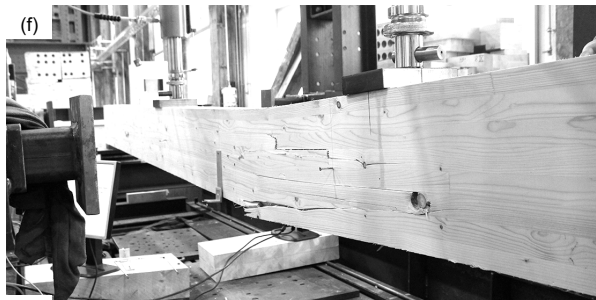


(a) BSH Prüfkörper

(e) HBH Serie 1



(b) BSH_1, (c) BSH_2, (d) BSH_3



(f) HBH_1.1, (g) HBH_1.2, (h) HBH_1.3

Abbildung 5.7 Bruchverhalten der BSH und HBH 1 Biegeprüfkörper

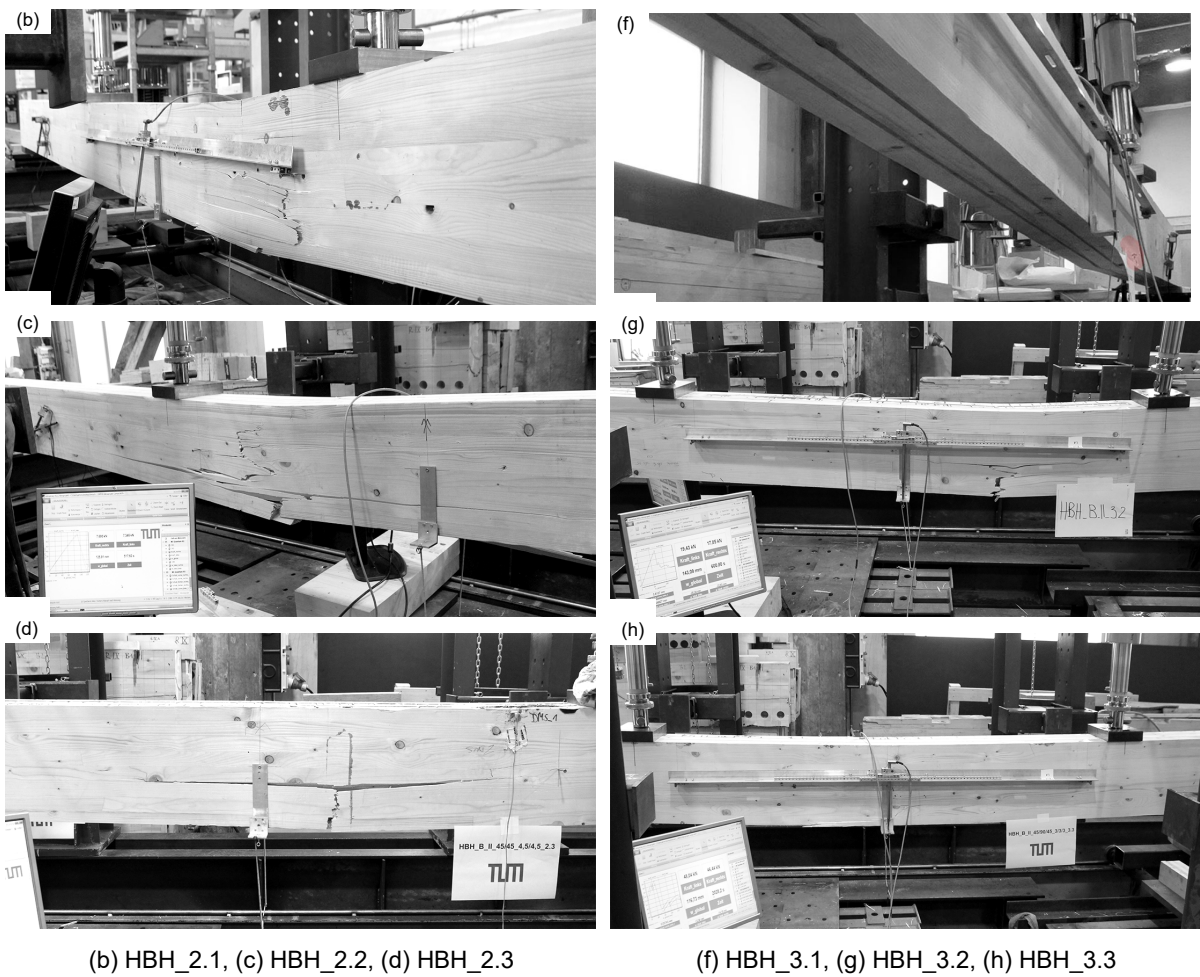
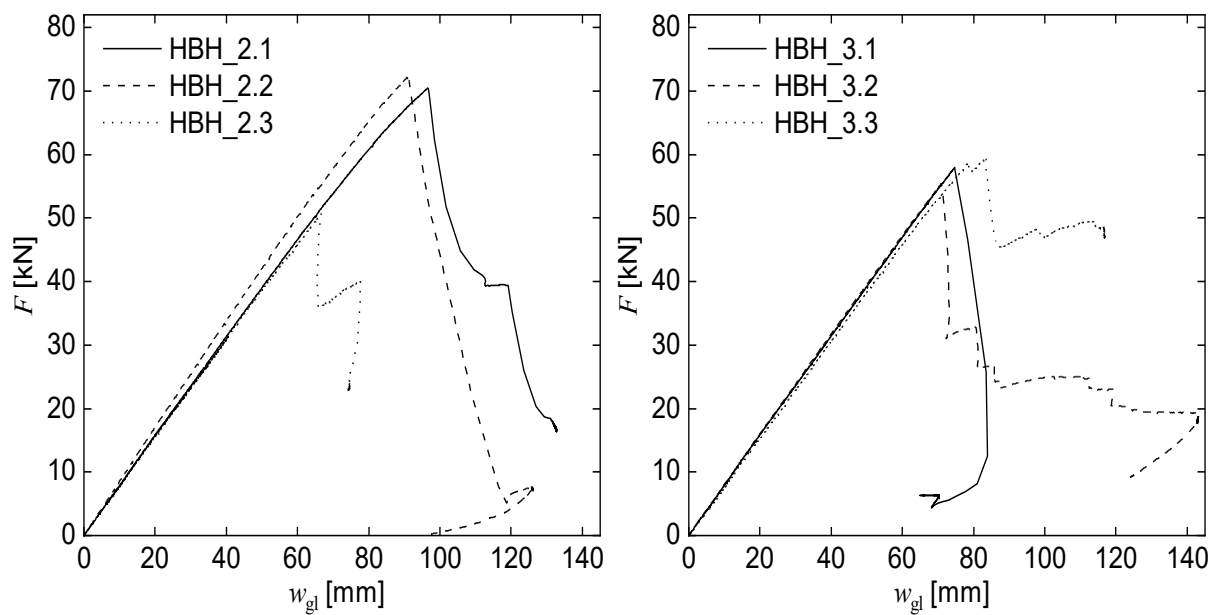


Abbildung 5.8 Bruchverhalten der HBH 2 und 3 Biegeprüfkörper

Die Berechnung der Biegefestigkeit (f_m) der BSH- und HBH-Prüfkörper erfolgte nach Gleichung (5-2) mit der Querschnittsbreite (b) und mit der Netto-Brettschichtholzbreite (b_{BSH}) mit der Höchstlast (F_{max}). In Abbildung 5.9 sind die Ergebnisse dargestellt.

$$f_m = \frac{3 \cdot a \cdot F_{max}}{b \cdot h^2} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (5-2)$$

b	[mm]	Bruttobreite
h	[mm]	Trägerhöhe
$a = 6 \cdot h$	[-]	-

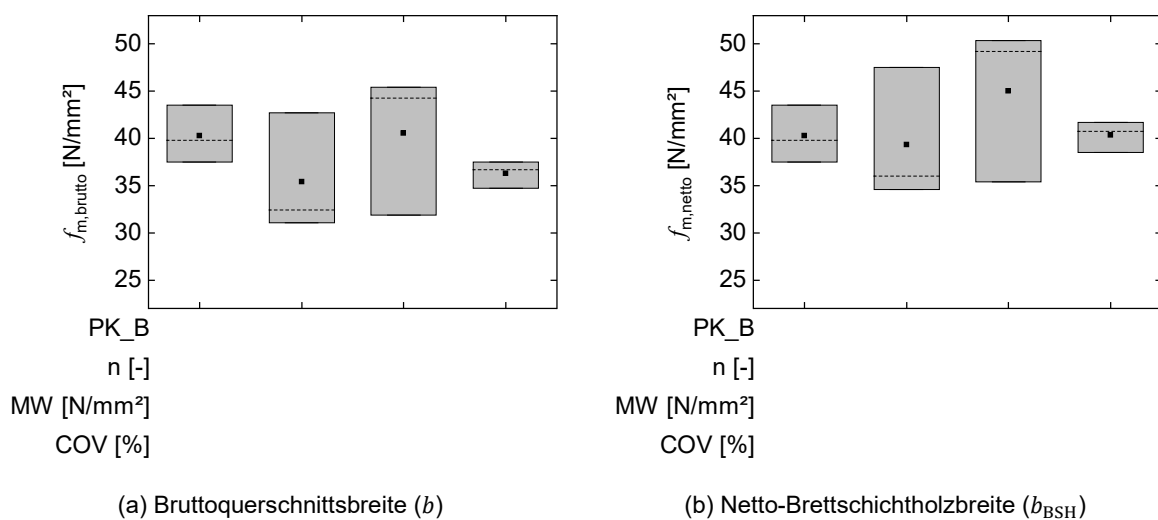


Abbildung 5.9 Biegefestigkeit der BSH- und HBH-Prüfkörper

Die Mittelwerte der berechneten Biegefestigkeiten ($f_{m,brutto}$) der Serien 1 und 3 sind um ca. 10 % niedriger als der Mittelwert der BSH-Prüfkörper. Das Verhalten ist auf den Bewehrungsgrad von $\delta = 10$ % zurückzuführen. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Furniere die Biegefestigkeit nicht erhöhen. Der Mittelwert von Serie 2 liegt auf dem gleichen Niveau wie der der BSH-Prüfkörper. Der Grund dafür ist die geringe Prüfkörperanzahl. Bei einer Versuchsreihe mit mehr Prüfkörpern wird für Serie 2 ein ähnliches Verhalten wie bei den Serien 1 und 3 erwartet. Die ermittelten Variationskoeffizienten liegen unter den Erwartungswerten des Variationskoeffizienten für die Biegefestigkeit nach (JCSS 2006) von $COV = 15$ %.

Die Ermittlung des Elastizitätsmoduls erfolgte durch zwei unabhängige Verfahren. Der lokale und der globale Elastizitätsmodul wurden nach DIN EN 408:2012-10 und durch Schwingungsmessungen bestimmt. Der lokale Elastizitätsmodul ($E_{m,l}$) wurde nach Gleichung (5-3) bestimmt. Dazu wurde je Trägerseite eine Traverse aus einem Aluminium L-Profil im Abstand von $5 \times h$ in der Schwerachse des Trägers gelagert (Abbildung 5.5) (b). Die relative Verschiebung für die Ermittlung von ($E_{m,l}$) nach Gleichung (5-3) wurde je Trägerseite mit einem induktiven Wegaufnehmer erfasst.

$$E_{m,l} = \frac{a \cdot l_1^2 \cdot (F_2 - F_1)}{16 \cdot I \cdot (w_2 - w_1)} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (5-3)$$

Im Gegensatz zum lokalen Elastizitätsmodul müssen für die Bestimmung des globalen Elastizitätsmoduls (E-Modul) Schub- und Querdrukverformungen berücksichtigt werden. Der globale E-Modul ist deswegen eher als Systemparameter und nicht als Materialparameter zu betrachten und wird nach DIN EN 408:2012-10 mittels vertikaler Verformung in Feldmitte nach Gleichung (5-4) ermittelt.

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

$$a = 6 \cdot h \quad [-]$$

Die Auswertung der Messungen nach DIN EN 408:2012-10 zeigen, dass der Elastizitätsmodul der Serie 1 im Mittelwert um ca. 20 % reduziert wird. Im Gegensatz dazu verringert sich der Elastizitätsmodul der Serie 2 um ca. 5 % und der der Serie 3 um ca. 10 % (Abbildung 5.10). Ein ähnliches Verhalten ist bei den ermittelten E-Modulen aus den Schwingungsmessungen zu beobachten.

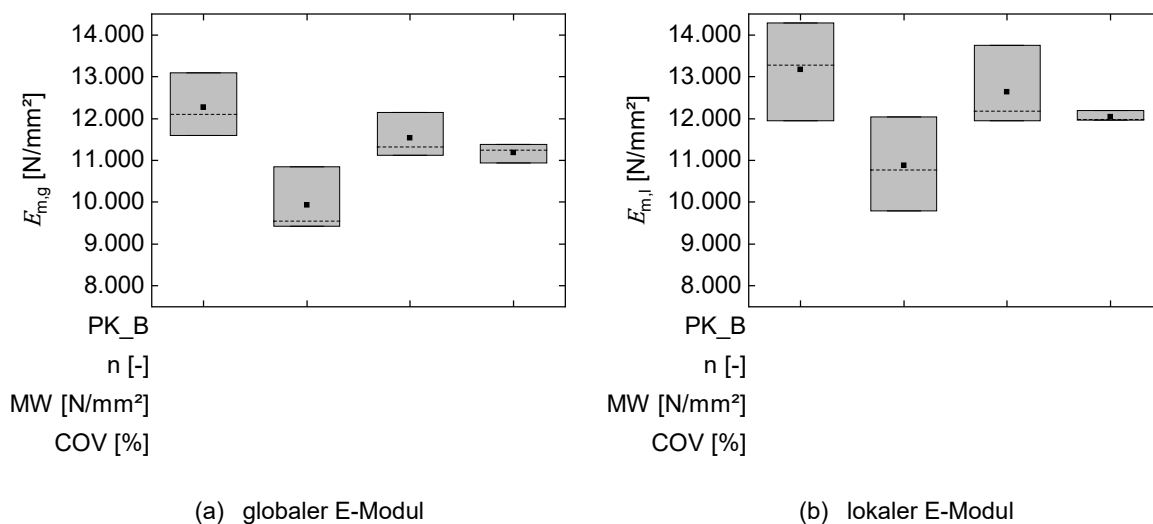
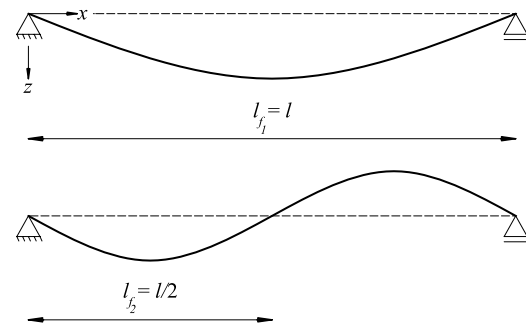


Abbildung 5.10 Ermittelte globale und lokale Elastizitätsmodule der BSH- und HBH-Prüfkörper

Vor den zerstörenden Versuchen wurden Schwingungsmessungen an den Biegeprüfkörpern durchgeführt und deren erste und zweite Eigenfrequenz bestimmt (Abbildung 5.13). Diese Untersuchungsmethodik wurde bereits von Dietsch (2012) erprobt.



(a) Schwingungsmessung an den BSH Rohlingen



(b) Schwingformen der ersten und zweiten Eigenfrequenz

Abbildung 5.14 Schwingungsmessungen an den BSH und HBH Prüfkörpern

In der Theorie der Baudynamik (Koronev und Rabinovic 1980) erhält man die Eigenfrequenzen der Biegeschwingung eines Biegeträgers mit dem statischen System eines Einfeldträgers nach Gleichung (5-5).

$$f_n = \frac{n^2 \cdot \pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_{ef,n}}{m}} \quad [\text{Hz}] \quad (5-5)$$

n	[-]	Ordnung der Schwingung
l	[m]	Spannweite
m	[kg/m]	Masse pro Meter
$EI_{ef,n}$	[Nm ²]	Biegesteifigkeit unter Berücksichtigung der Schubsteifigkeit

Die Biegesteifigkeit ($EI_{ef,n}$) berücksichtigt den Einfluss der Biegesteifigkeit (EI) und der Schubsteifigkeit (GA) in Abhängigkeit der Ordnung der Eigenfrequenz und wird nach Gleichung (5-6) ermittelt:

$$EI_{ef,n} = \frac{EI}{1 + \frac{EI \cdot \pi^2}{GA^* \cdot l_{fn}^2}} \quad [\text{Nm}^2] \quad (5-6)$$

$A^* = \frac{A}{\kappa}$	[m ²]	Schubfläche
$\kappa = 1,06$	[-]	Formfaktor für Holz (Hearmon 1966)
l_{fn}	[m]	Schwingweite nach, Abbildung 5.12 (b)
G	[N/m ²]	Schubmodul

Wird der Einfluss der Schubsteifigkeit vernachlässigt ($GA^* \rightarrow \infty$), so gilt: $EI_{ef,n} = EI$. Die Schwingweite ist von der Ordnung der Schwingung abhängig (Abbildung 5.13) (b). Durch Umstellen der Gleichung (5-5) kann aus der ersten und zweiten Eigenfrequenz ein effektiver Elastizitätsmodul bestimmt werden. Dieser beinhaltet einen Schubsteifigkeitsanteil und ist dadurch mit dem globalen Elastizitätsmodul, bestimmt nach DIN EN 408:2012-10, gleichzusetzen. Die

berechneten und gemessenen Eigenfrequenzen der Biegeprüfkörper sind in Tabelle 5.2 aufgezeigt.

Tabelle 5.2 Berechnete und gemessene erste und zweite Eigenfrequenz der Biegeprüfkörper

Prüfkörper	$f_{1,B}$ [Hz]	$f_{1,S}$ [Hz]	$f_{1,S}/f_{1,B}$ [-]	$f_{2,B}$ [Hz]	$f_{2,S}$ [Hz]	$f_{2,S}/f_{2,B}$ [-]	$f_{2,S}/f_{1,S}$ [-]
BSH_B_1	21,76	22,46	1,03	87,06	75,83	0,87	3,38
BSH_B_2	21,80	21,12	0,97	87,21	70,08	0,80	3,32
BSH_B_3	21,36	22,71	1,06	85,43	76,42	0,89	3,37
HBH_B_1.1	20,92	20,93	1,00	83,70	74,15	0,89	3,54
HBH_B_1.2	21,14	19,72	0,93	84,57	69,96	0,83	3,55
HBH_B_1.3	21,14	19,63	0,93	84,57	68,28	0,81	3,48
HBH_B_2.1	20,38	20,06	0,98	81,53	71,31	0,87	3,55
HBH_B_2.2	20,14	21,23	1,05	80,57	74,22	0,92	3,50
HBH_B_2.3	20,14	20,84	1,03	80,57	72,75	0,90	3,49
HBH_B_3.1	20,36	20,32	1,00	81,45	72,28	0,89	3,56
HBH_B_3.2	20,58	20,90	1,02	82,33	74,48	0,90	3,56
HBH_B_3.3	20,29	20,09	0,99	81,15	70,29	0,87	3,50

$f_{1,B}$ und $f_{2,B}$ berechnet mit $E = 12.600 \text{ N/mm}^2$ und $G = 650 \text{ N/mm}^2$

B = Berechnung

S = Schwingungsmessung

Die maximale Abweichung der berechneten und durch Schwingungsmessungen ermittelten ersten Eigenfrequenz beträgt 7 %. Die gemessene zweite Eigenfrequenz ist um bis zu 20 % niedriger als die berechnete. In Abbildung 5.11 sind die ermittelten Elastizitätsmodule auf Basis der Schwingungsmessungen (f_1 und f_2) gezeigt.

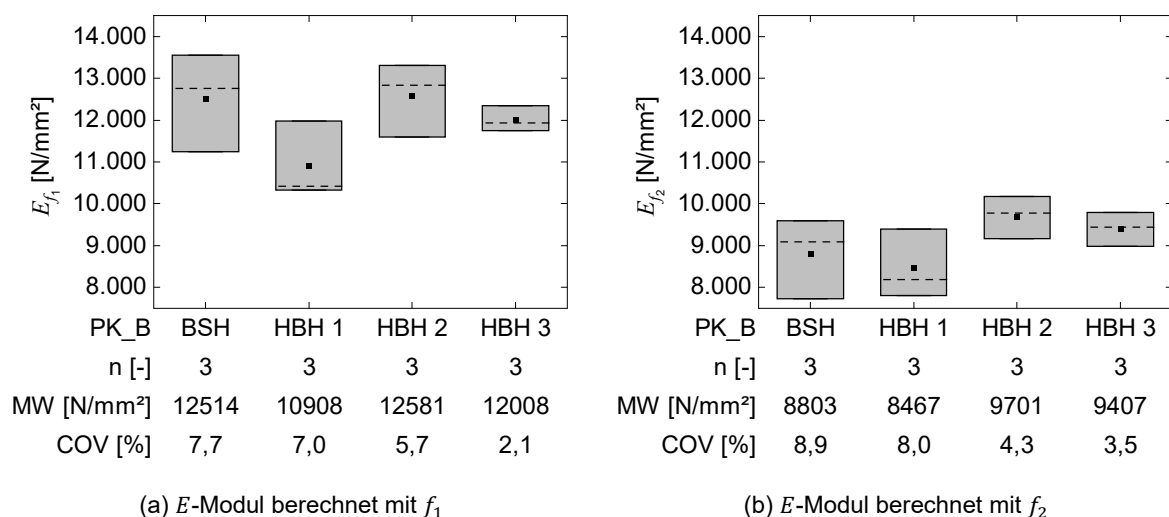


Abbildung 5.11 Berechnete Elastizitätsmodule auf Basis der gemessenen Eigenfrequenzen

Der Vergleich der Mittelwerte der Elastizitätsmodule aus den Schwingungsmessungen zeigt,

dass die aus den Schwingungsmessungen der ersten Eigenfrequenz ermittelten Elastizitätsmodule 2 bis 13 % größer sind als die globalen Elastizitätsmodule, ermittelt nach DIN EN 408:2012-10. Im Gegensatz dazu sind die aus der zweiten Eigenfrequenz ermittelten Elastizitätsmodule um 9 bis 30 % geringer.

Der Schubmodul ($G_{xz,408}$) wurde nach DIN EN 408:2012-10 mit dem Schubfeldverfahren ermittelt. Dazu wurden je Träger vier Messquadrante angeordnet, und die Änderung der Diagonalen (w_i) eines jeden Messquadrats bei zwei unterschiedlichen Lastniveaus (F_1 und F_2) wird bestimmt (Abbildung 5.4). Die Berechnung des Schubmoduls erfolgte anschließend nach Gleichung (5-7).

$$G_{xz,408} = \alpha \cdot \frac{h_0}{b \cdot h} \frac{V_{s,2} - V_{s,1}}{w_2 - w_1} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (5-7)$$

$\alpha = 1,5 - \frac{h_0^2}{4 \cdot h^2}$	[-]	Schubkorrekturfaktor
h_0	[mm]	Ausgangslänge der Diagonale im Messquadrat

In Tabelle 5.3 sind die ermittelten Schubmodule gezeigt.

Tabelle 5.3 Ermittelte Schubmodule aus den Biegeversuchen und den Schwingungsmessungen

Prüfkörper	$G_{xz,408}$ [N/mm ²]
BSH_1	579
BSH_2	604
BSH_3	575
HBH_1.1	742
HBH_1.2	770
HBH_1.3	620
HBH_2.1	774
HBH_2.2	918
HBH_2.3	893
HBH_3.1	717
HBH_3.2	872
HBH_3.3	735

Die nach DIN EN 408:2012-10 ermittelten Schubmodule ($G_{xz,408}$) der BSH- und HBH-Prüfkörper zeigen plausible Ergebnisse. Für die HBH-Prüfkörper konnte eine Erhöhung des Schubmoduls festgestellt werden. Dabei konnten die Schubmodule der HBH-Serie 1 um 21 %, der Serie 2 um 47 % und der Serie 3 um 32 % erhöht werden.

5.5 Schubversuche

5.5.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Zur Untersuchung der Schubtragfähigkeit von HBH wurden in einem ersten Schritt gedrungene 3-Punkt-Biegeversuche (3PB) mit zentrischer und exzentrischer Lasteinleitung in Anlehnung an Schickhofer und Obermayr (1998), Schickhofer (2001), Gehri (2010) und Brandner et al. (2012) durchgeführt. In Abbildung 5.12 ist der exzentrische 3PB-Versuchsaufbau gezeigt.

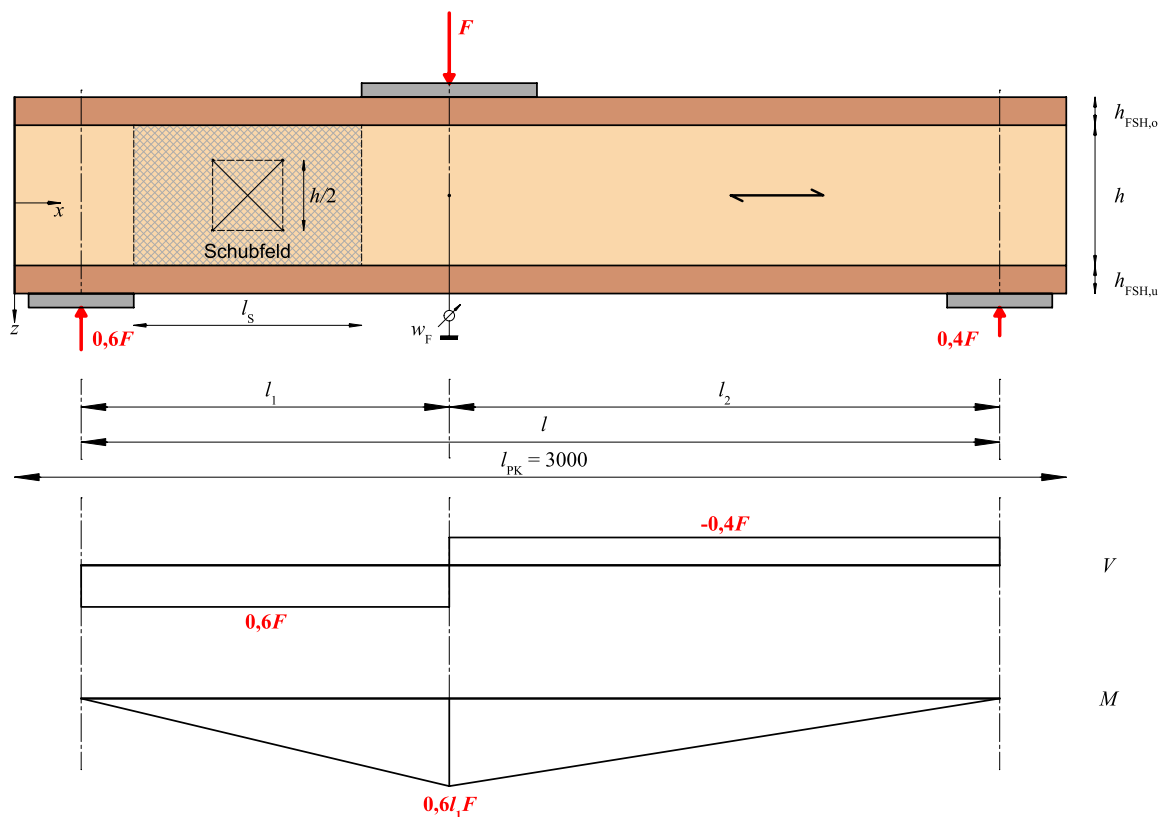


Abbildung 5.12 Prüfaufbau der 3-Punkt-Biegeversuche zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit von HBH mit Angabe des Querkraft und Momentenverlaufs

Weiter wurden 4-Punkt-Biegeversuche (4PB) als Einfeldträger mit Kragarm in Anlehnung an Basler et al. (1960) und Ehrhart (2019) durchgeführt. In Abbildung 5.13 ist der 4PB-Versuchsaufbau gezeigt.

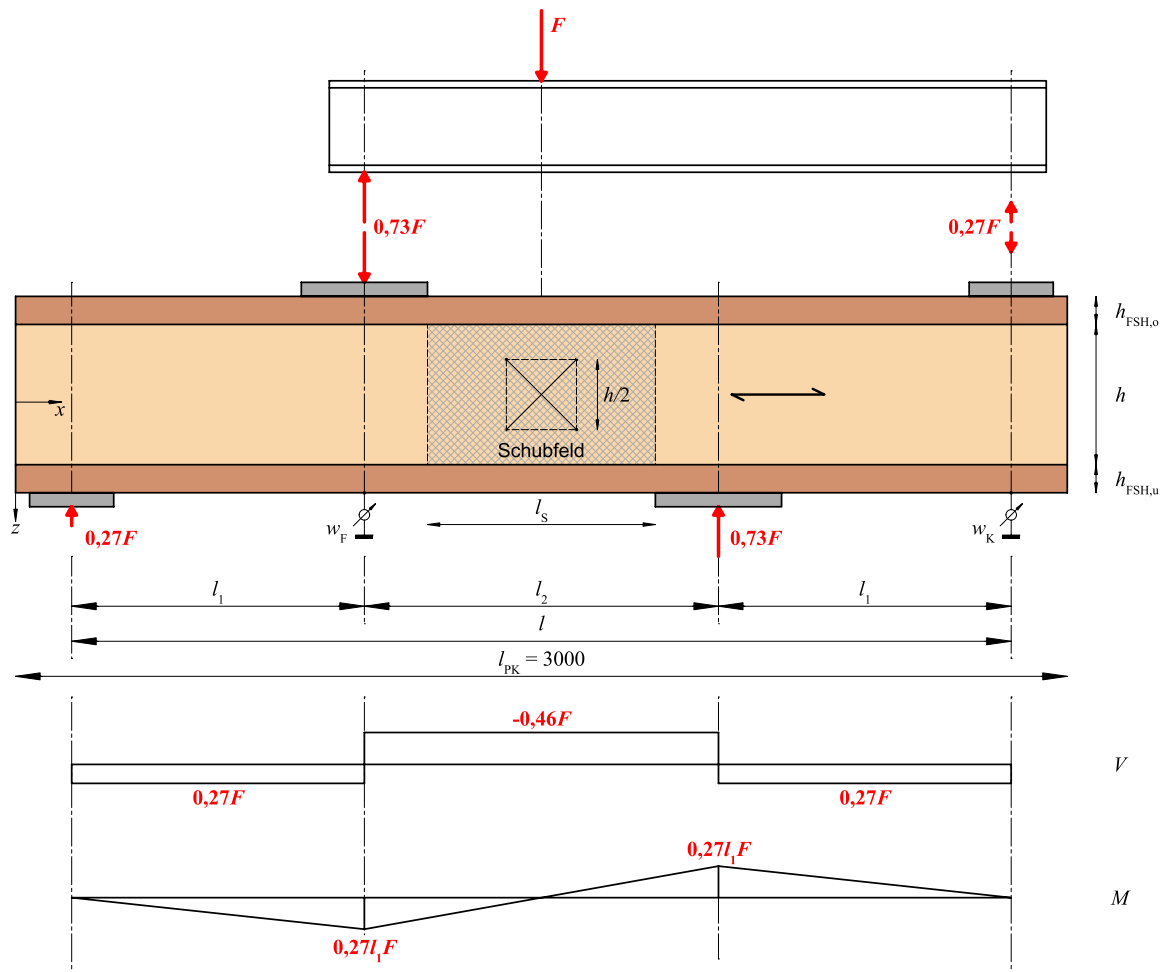


Abbildung 5.13 Prüfaufbau der 4-Punkt-Biegeversuche zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit von HBH mit Angabe des Querkraft und Momentenverlaufs

Die Länge des beanspruchten Schubfeldes wurde für den exzentrischen 3PB- und den 4PB-Versuchsaufbau mit $l_s = 650$ mm identisch gewählt. Unter Ansatz der Prüfkörperabmessungen ergeben sich die in Tabelle 5.4 gezeigten Verhältnisse für die Querkräfte und Momente in Abhängigkeit der Versuchsaufbauten.

Tabelle 5.4 Querkraft- und Momentenverhältnisse der drei gewählten Versuchsaufbauten

Versuch	l_1 [mm]	V_s [kN]	Faktor [-]	M [kNm]	Faktor [-]
3PB – zentrisch	1400	$0,5 \times F$	1,00	$0,700 \times F$	1,00
3PB - exzentrisch	1050	$0,6 \times F$	1,20	$0,629 \times F$	0,90
4PB	835	$0,46 \times F$	0,92	$0,225 \times F$	0,32

V_s = Querkraft im Schubfeld

Durch den exzentrischen 3PB-Versuchsaufbau wird im Vergleich zum zentrischen 3PB-Versuchsaufbau die Querkraft um 20 % erhöht und das Biegemoment um 10 % reduziert. Der gewählte 4PB-Versuchsaufbau reduziert das Biegemoment um 68 % und die Querkraft um 8 %. Abbildung 5.14 und Abbildung 5.15 zeigen die realisierten Versuchsaufbauten der 3PB- und 4PB-Versuche.



Abbildung 5.14 Realisierter 3PB-Versuchsaufbau zur Bestimmung der Schubtragfähigkeit von HBH

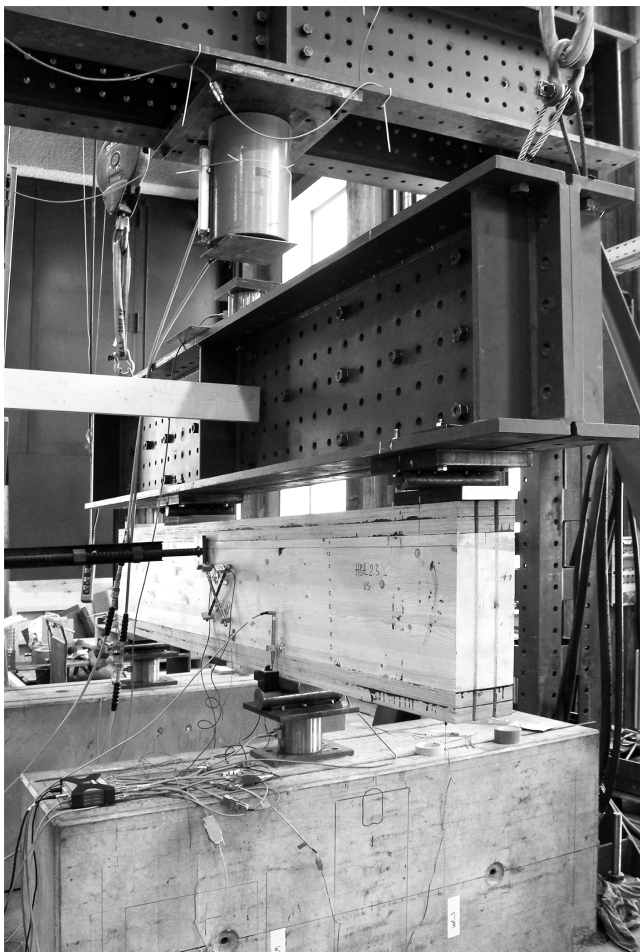


Abbildung 5.15 Realisierter 4PB-Versuchsaufbau zur Bestimmung der Schubtragfähigkeit von HBH

Je HBH-Serie wurden drei Prüfkörper und ein BSH-Referenzprüfkörper geprüft. Als Biegezug- und Biegedruckverstärkung wurden Furnierschichtholzstreifen (FSH) aus Buche aufgeklebt. Im Zuge der Versuche wurde die Dicke angepasst. Ebenso wurden die FSH-Verstärkung in der Furnierebene eingeschnitten, sodass keine Schubkräfte über die Klebefuge Furnierebene – FSH-Verstärkung möglich war (Abbildung 5.16) (a-c). Zusätzlich wurden in die eingeschnittenen Nuten der FSH-Verstärkung Streifen aus FSH, Faserorientierung parallel zur Belastungsrichtung, eingebracht (Abbildung 5.16) (b, c). Dadurch wurde eine gleichmäßige Krafteinleitung in die Furnierebene und die BSH-Komponenten erreicht. Die Lasteinleitungsbereiche wurden mit Vollgewindeschrauben verstärkt (Abbildung 5.16) (c).

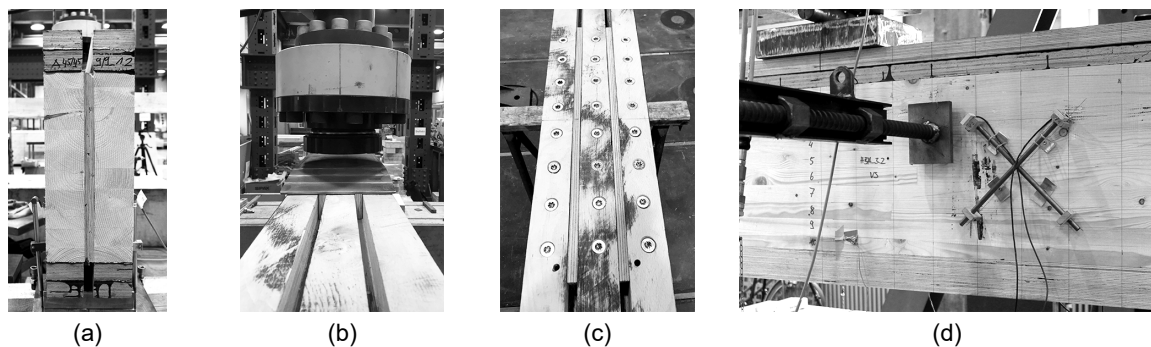


Abbildung 5.16 (a) Einschnitt der FSH-Biegezug- und Biegedruckverstärkung, (b) FSH-Streifen unter der Lasteinleitungsplatte zur direkten Lasteinleitung in die Furnierebenen, (c) Querdrukverstärkungen mit VG-Schrauben, (d) Messkreuz zur Bestimmung des Schubmodus

Bei den 3PB-Versuchen wurden die Versuchskörper in einem Portalrahmen mit einem hydraulischen Druckzylinder ($F_{\max} = 1000 \text{ kN}$), bei den 4PB-Versuchen mit einem hydraulischen Druckzylinder ($F_{\max} = 3000 \text{ kN}$) weggeregelt linear bis zum Bruch belastet. Bei den 4PB-Versuchen wurden die Auflagerkräfte und die Zylinderkraft mit externen Kraftmessdosen aufgezeichnet (Abbildung 5.15). Der Schubmodul (G_s) wurde über das Verfahren zur Prüfung des Schubfeldes nach DIN EN 408:2012-10 ermittelt. Das Messquadrat ($a = 200 \text{ mm}$) wurde auf halber BSH-Höhe angeordnet (Abbildung 5.16) (d). Als Messmittel wurden Wegaufnehmer (Typ DD1, Messbereich $\pm 2,5 \text{ mm}$, Linearitätsabweichung $\pm 0,5 \%$) verwendet. An ausgewählten Prüfkörpern wurden die Dehnungen in der BSH-Komponente von HBH im Bereich des maximalen Moments mittels 60 mm langen, aufgeklebten Dehnungsmessstreifen (DMS) gemessen. Außerdem wurden bei der Herstellung in zwei Prüfkörper DMS in die Furnierebenen eingebracht. In Tabelle 5.5 sind die Konfigurationen der Prüfkörper gezeigt.

Tabelle 5.5 Hauptabmessungen und Konfiguration der Prüfkörper zur Bestimmung der Schubtragfähigkeit

Prüfkörper	Versuch	$h_{FSH,o}$ [mm]	$h_{FSH,u}$ [mm]	Nut _{FSH}	DMS _{BSH}	DMS _{Furnier}	Schubmodul
BSH_S_1	3PB (zentrisch)	80	80	nein	-	-	nein
BSH_S_2	3PB (exzentrisch)	45	80	ja	-	-	ja
BSH_S_3	3PB (exzentrisch)	45	80	ja	-	-	ja
HBH_S_1.1	3PB (zentrisch)	80	80	nein	-	-	nein
HBH_S_1.2	3PB (zentrisch)	80	80	nein	-	ja	nein
HBH_S_1.3	4PB	80	80	ja	-	ja	ja
HBH_S_2.1	3PB (exzentrisch)	45	45	ja	-	-	ja
HBH_S_2.2	3PB (exzentrisch)	45	80	ja	-	-	ja
HBH_S_2.3	4PB	80	80	ja	ja	-	ja
HBH_S_3.1	4PB	80	80	ja	ja	-	ja
HBH_S_3.2	4PB	80	80	ja	ja	-	ja
HBH_S_3.3	3PB (exzentrisch)	45	80	ja	-	-	ja

Die Holzfeuchte der BSH-Komponenten wurde an vier unterschiedlichen Lamellen je Prüfkörper ermittelt. Der Mittelwert der Holzfeuchte (u_{MW}) der BSH-Komponenten über alle Prüfkörper beträgt 13,5 % (COV 3,7 %).

5.5.2 Auswertung und Ergebnisse

Die BSH- und HBH-Prüfkörper zeigen ein linear elastisches Verhalten und versagten anschließend spröde. Das Versagen der Prüfkörper kann in vier Versagensarten (VA) eingeteilt werden:

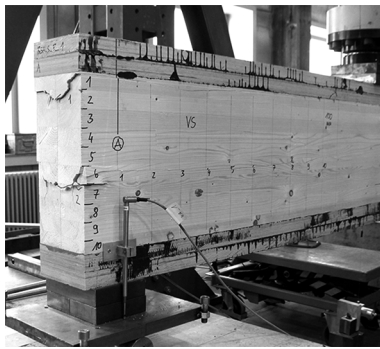
VA 1: Schubversagen im Brettschichtholz

VA 2: Schub- und Querkzugversagen im Übergangsbereich zwischen BSH und FSH

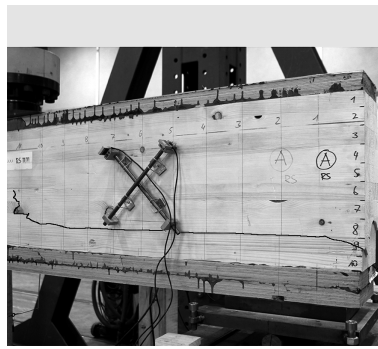
VA 3: Biegezugversagen im Brettschichtholz

VA 4: Schubversagen im Brettschichtholz im Bereich der ersten beiden Randlamellen

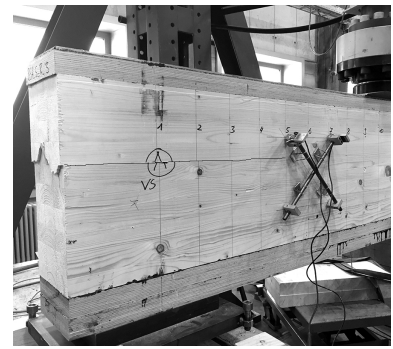
Bei den BSH-Referenzprüfkörpern konnte durch den gewählten 3PB-Versuchsaufbau ein Schubversagen (VA 1) erreicht werden. Im Gegensatz dazu versagten zwei der HBH-Prüfkörper der Serie 1 (HBH_S_1.1, HBH_S_1.2) im Übergangsbereich (Klebefuge bzw. Holzfasern in unmittelbarer Nähe zur Klebefuge) zwischen BSH und FSH (VA 2). Die HBH-Prüfkörper der Serie 2 (HBH_S_2.1, HBH_S_2.2) versagten auf Biegezug (VA 3) in der BSH-Komponente, ein Prüfkörper der Serie 3 (HBH_S_3.3) versagte auf Schub im Bereich der ersten beiden BSH-Randlamellen (VA 4). Die restlichen Prüfkörper (HBH_S_1.3, HBH_S_2.3, HBH_S_3.1 und HBH_S_3.2) wurden mit dem 4PB-Versuchsaufbau geprüft. Durch diesen Prüfaufbau konnte die Querkraft im Schubfeld im Vergleich zu dem 3PB-Versuchsaufbau deutlich erhöht werden. Der Prüfkörper HBH_S_3.2 versagte auf Schub (VA 1) im Schubfeld. Die restlichen Prüfkörper versagten entsprechend den Versagensarten zwei (VA 2) und vier (VA 4). Abbildung 5.17 (a-l) zeigt die Versagensarten je Prüfkörper.



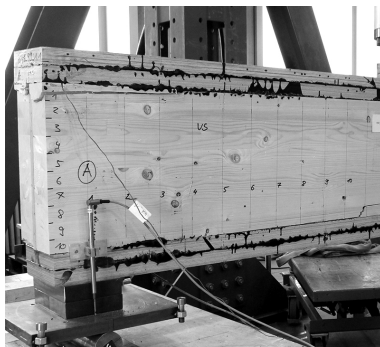
(a) BSH_S_1
3PB – zentrisch
VA 1



(b) BSH_S_2
3PB – exzentrisch
VA 1



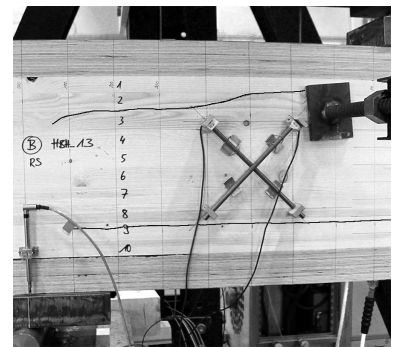
(c) BSH_S_3
3PB – exzentrisch
VA 1



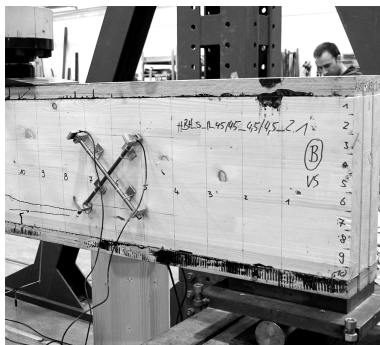
(d) HBH_S_1.1
3PB – zentrisch
VA 2



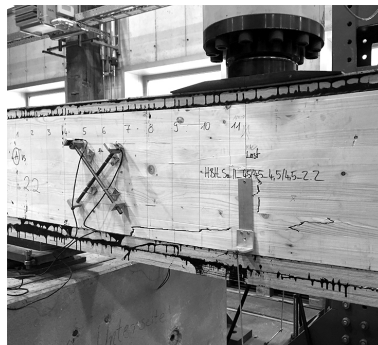
(e) HBH_S_1.2
3PB – zentrisch
VA 2



(f) HBH_S_1.3
4PB
VA 4



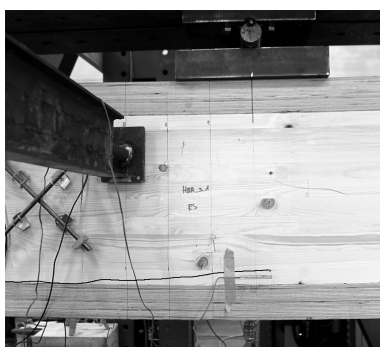
(g) HBH_S_2.1
3PB – exzentrisch
VA 3



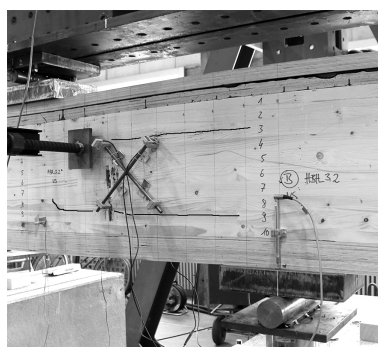
(h) HBH_S_2.2
3PB – exzentrisch
VA 3



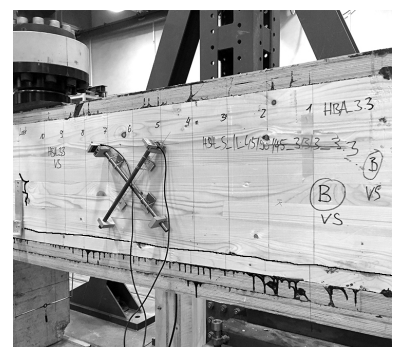
(i) HBH_S_2.3
4PB
VA 2



(j) HBH_S_3.1
4PB
VA 2



(k) HBH_S_3.2
4PB
VA 1



(l) HBH_S_3.3
3PB – exzentrisch
VA 4

Abbildung 5.17 Versagensarten der HBH- und BSH-Schubprüfkörper

Unter Berücksichtigung der FSH-Verstärkung wurden die Schubspannungen mit der ermittelten Querkraft ($V_{\max}$) auf Höhe des Versagensrisses (τ_{crack}) und die maximalen Schubspannungen ($\tau_{\max}$), bezogen auf die Brutto-Querschnittsbreite (b), auf Basis der Balkentheorie berechnet. Bei den Prüfkörpern mit eingeschnittenen Nuten wurde die Netto-FSH-Breite angesetzt. Der Verbund zwischen Brettschichtholz und der Buchen-FSH-Verstärkung wurde als starr angenommen. Das Eigengewicht des Lastverteilungsträgers des 4PB-Versuchsaufbaus wurde für die Schubspannungsberechnung berücksichtigt.

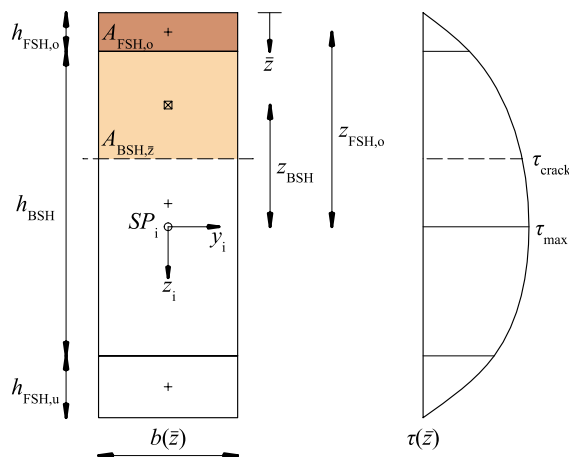


Abbildung 5.18 Querschnittsabmessungen und Schubspannungsverlauf der Schubprüfkörper

Der Schubspannungsverlauf für den Verbundquerschnitt berechnet sich wie folgt:

Im ersten Schritt werden die Verhältnisse (n_i) der E-Module von BSH und FSH berechnet:

$$n_i = \frac{E_{FSH}}{E_{BSH}} \quad [-] \quad (5-8)$$

E_{FSH}	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul der FSH Verstärkung
E_{BSH}	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul Brettschichtholz

Anschließend wird der ideale Schwerpunkt ermittelt zu:

$$z_{SP,i} = \frac{A_{BSH} \cdot h_{BSH} + n_i \cdot (A_{FSH,o} \cdot h_{FSH,o} + A_{FSH,u} \cdot h_{FSH,u})}{A_i} \quad [\text{mm}] \quad (5-9)$$

$A_i = A_{BSH} + n_i \cdot (A_{FSH,o} + A_{FSH,u})$	[mm ²]	Ideelle Fläche
---	--------------------	----------------

Das ideale Flächenträgheitsmoment wird nach Gleichung (5-10) berechnet:

$$I_{y,i} = I_{y,BSH} + n_i \cdot (I_{y,FSH,o} + I_{y,FSH,u}) \quad [\text{mm}^4] \quad (5-10)$$

Das statische Moment berechnet sich in Abhängigkeit der Koordinate ($\bar{z}$) nach:

$$S_y(\bar{z}) = A_{BSH,z} \cdot z_{BSH} + n_i \cdot A_{FSH,o} \cdot z_{FSH,o} \quad [-] \quad (5-11)$$

Die Schubspannungsverteilung berechnet sich in Abhängigkeit der Koordinate ($\bar{z}$) nach:

$$\tau(\bar{z}) = \frac{V_{max} \cdot S_y(\bar{z})}{I_{y,i} \cdot b(\bar{z})} \quad [-] \quad (5-12)$$

V_{max}	[N]	Maximale Querkraft
$S_y(\bar{z})$	[mm ³]	Statische Moment in Abhängigkeit der Koordinate $\bar{z}$
$I_{y,i}$	[mm ⁴]	Ideeles Flächenträgheitsmoment
$b(\bar{z})$	[mm]	Breite in Abhängigkeit der Koordinate $\bar{z}$

Um den Einfluss der aufgeklebten Verstärkungen der Buchen-FSH-Streifen korrekt abbilden zu können, wurde der globale Elastizitätsmodul der Verstärkung an abgetrennten FSH-Streifen ($l/b/h = 600/100/30$ mm) der Schubversuchsprüfkörper nach DIN EN 408:2012-10 ermittelt (Abbildung 5.19). Die Auswertung der Messwerte ergibt einen Elastizitätsmodul ($E_{m,g,mean}$) von 15.142 N/mm² (COV 4,5 %) für die Buchen-FSH-Verstärkung (Tabelle 5.6).

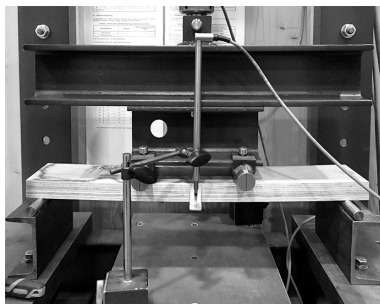


Abbildung 5.19 Realisierter Prüfaufbau

Tabelle 5.6 Versuchsergebnisse Buchen-FSH

Prüfkörper	Buche FSH		
n	[-]	20	
$l/b/h$	[mm]	600/100/30	
ρ_{mean}	[kg/m ³]	804	2,0 %
ω_{mean}	[%]	7,2	1,7 %
$f_{m,mean}$	[N/mm ²]	110,9	COV 15,8 %
$E_{m,g,mean}$	[N/mm ²]	15.142	4,5 %

In Tabelle 5.7 sind die Versagensarten, die ermittelten Querkräfte und die berechneten Schubspannungen abgebildet.

Tabelle 5.7 Querkräfte und Schubspannungen aus den 3PB und 4PB Versuchsaufbauten

Prüfkörper	Versuchsaufbau	VA	V_{max} [kN]	τ_{crack} [N/mm ²]	τ_{max} [N/mm ²]
BSH_S_1	3PB	1	315	4,6	4,6
BSH_S_2	3PB	1	328	4,7	5,1
BSH_S_3	3PB	1	392	5,8	6,1
HBH_S_1.1	3PB	2	360	2,8	5,3
HBH_S_1.2	3PB	2	330	2,5	4,9
HBH_S_1.3	4PB	4	376	4,7	5,6
HBH_S_2.1	3PB	3	341	5,8	5,8
HBH_S_2.2	3PB	3	429	6,8	6,8
HBH_S_2.3	4PB	2	510	3,9	7,6
HBH_S_3.1	4PB	2	472	3,6	7,0
HBH_S_3.2	4PB	1	577	7,4	8,6
HBH_S_3.3	3PB	4	457	5,2	7,2

Mit dem optimierten 3-Punkt-Biegeprüfaufbau konnte die Querkraft im Vergleich zum Mittelwert der BSH-Prüfkörper um bis zu 32 %, mit dem 4-Punkt-Biegeprüfaufbau um bis zu 67 % gesteigert werden. Ein Einfluss auf die Versuchsergebnisse aufgrund der unterschiedlichen Prüfaufbauten (3PB vs. 4PB) wird als gering eingeschätzt, da die Länge des Schubfelds ($l_s = 650$ mm) bei beiden Prüfaufbauten identisch war. Der Mittelwert der Schubspannung des verwendeten Brettschichtholzes ($\tau_{crack,BSH,MW}$) beträgt 5,0 N/mm² und ist 10,6 % höher als die nach JCSS (2006) berechnete Schubfestigkeit von Brettschichtholz ($f_{v,mean} = 4,52$ N/mm²). Die ermittelten Schubspannungen der HBH-Serien der Versagensarten 1 sind als Schubfestigkeit zu bewerten. Alle anderen berechneten Schubspannungen (VA 2-4) stellen lediglich eine untere Grenze dar.

6 Versuche zur Tragfähigkeit von Ausklinkungen, Durchbrüchen und Queranschlüssen (AP4)

6.1 Allgemein

In ersten experimentellen Untersuchungen wurde das Trag- und Verformungsverhalten von holzbewehrtem Holz (HBH) bei Ausklinkungen, Durchbrüchen und Queranschlüssen untersucht. Die Prüfkörper wurden aus den unversehrten Abschnitten der Biegeversuche (Abschnitt 5.4) gefertigt. Abbildung 6.1 zeigt das Grundprinzip der Prüfkörperverwendung und die Bezeichnung je Prüfkörper ist Abbildung 6.2 zu entnehmen.

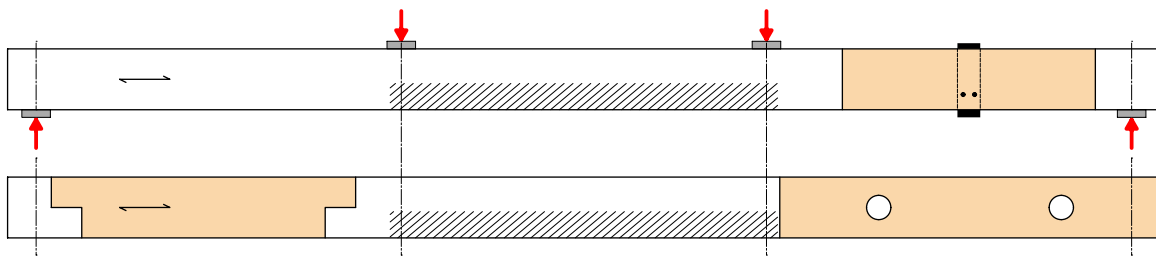


Abbildung 6.1 Aufteilung der Biegeprüfkörper zur experimentellen Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens von Ausklinkungen, Durchbrüchen und Queranschlüssen in holzbewehrtem Holz

Das Ziel der Untersuchung war es, Laststeigerungsfaktoren von HBH im Vergleich zu BSH für die unterschiedlichen Beanspruchungsarten zu quantifizieren. Weiter soll der Einfluss von Anzahl und Aufbau der Furnierebenen auf das Trag- und Verformungsverhalten bestimmt werden.

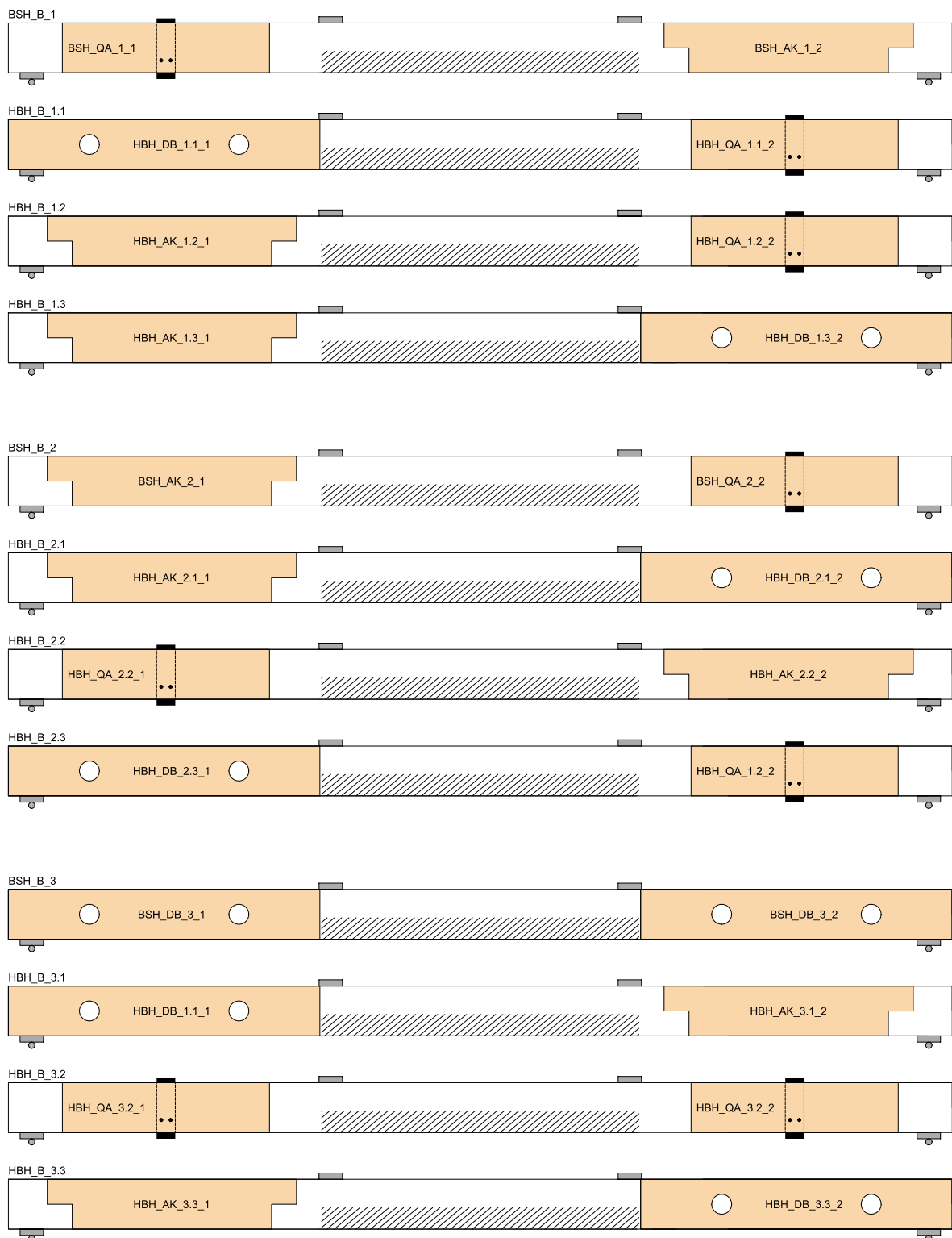


Abbildung 6.2 Übersicht der für die Versuche zu Ausklinkungen, Durchbrüche und Queranschlüsse verwendeten Prüfkörper

6.2 Ausklinkungen

6.2.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Ausklinkungen gibt es bis dato noch keine einheitliche Prüfvorschrift. Nach Jockwer (2014) sind die in der Literatur zu findenden Versuche zu Ausklinkungen meist in Zusammenhang mit spezifischen Konstruktionsansätzen durchgeführt worden. Die in den Versuchen geprüften Parameter wurden gewählt, um entweder empirische oder theoretische Bemessungsansätze zu verifizieren. In Jockwer (2014) findet sich eine detaillierte Übersicht von Versuchen zu Ausklinkungen und deren geometrischen Parametern. Die Tragfähigkeit von Ausklinkungen wird i. d. R. mittels 3-Punkt- bzw. 4-Punkt-Biegeversuchen untersucht. Trummer (2002) untersuchte die Tragfähigkeit von glasfaserverstärkten Ausklinkungen von Biegeträgern auf Basis der geometrischen Randbedingungen und der Versuchsanordnung von Hollinsky (1985). Das Ausklinkungsverhältnis war, wie auch in den Untersuchungen von Bejtka (2011) und Flaig (2013), die halbe Trägerhöhe ($\alpha = 0,5$). Der Versuchsaufbau und die geometrischen Randbedingungen zur Untersuchung der Tragfähigkeit von Ausklinkung in holzbewehrtem Holz bauen auf den genannten Arbeiten auf. Abbildung 6.3 zeigt die Prüfkörpergeometrie und den Versuchsaufbau. Je HBH-Serie wurden vier Ausklinkungen (zwei Prüfkörper mit jeweils zwei Ausklinkungen) und jeweils zwei Ausklinkungen der BSH-Serien 1 und 2 geprüft.

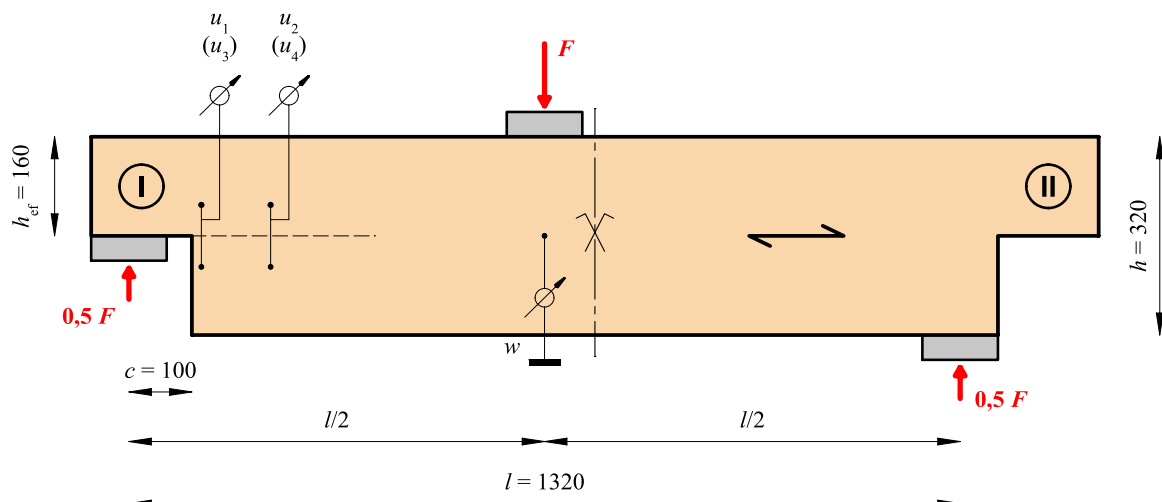


Abbildung 6.3 Versuchsaufbau Ausklinkungen in HBH, Abmessungen in mm

Die Prüfkörperhöhe (h) betrug 320 mm, die effektive Bauteilhöhe im Bereich der Ausklinkung (h_{ef}) 160 mm. Daraus ergibt sich ein Ausklinkungsverhältnis von $\alpha = 0,5$. Der Abstand zwischen der Wirkungsline der Auflagerkraft und der Ecke der Ausklinkung (c) betrug 100 mm. Die Stützweite (l) betrug 1,32 m. Durch den gewählten Prüfaufbau konnten je Prüfkörper zwei Ausklinkungen (I und II) untersucht werden. Ausklinkung I bezeichnet dabei die Stelle des Prüfkörpers, die im Auflagerbereich der Biegeversuche angeordnet war. Dadurch ist mit keinen Vorschädigungen (Mikrorissen etc.) aus den Biegeversuchen zu rechnen, die sich ggf. mindernd auf die Tragfähigkeit der Ausklinkungen auswirken könnten. In den einspringenden Ecken der Ausklinkungen wurde die Rissöffnung im Abstand von 15 mm (u_1 und u_3) und

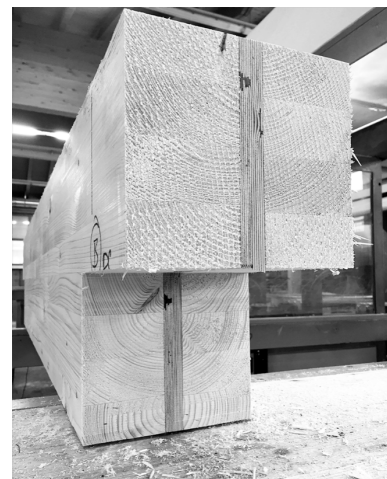
125 mm (u_2 und u_4) mit induktiven Wegaufnehmern über eine Länge von 100 mm gemessen. Weiter wurde die Durchbiegung unter der Lasteinleitung (w) mit einem Seilzugwegaufnehmer aufgezeichnet. Als Lasteinleitungsplatten wurden Stahlplatten mit einer Dicke von 30 mm verwendet. Die Platten mit einer Länge von 120 mm erstreckten sich über die gesamte Prüfkörperbreite. Die Last wurde mit einem Hydraulikzylinder mit einer maximalen Kraft von 250 kN eingeleitet. Bei allen Versuchen wurde die Geschwindigkeit des Belastungszyinders so gewählt, dass die geschätzte Höchstlast (F_{est}) innerhalb von $300 \text{ s} \pm 120 \text{ s}$ erreicht wurde. Die Holzfeuchte der BSH-Komponenten wurde an vier unterschiedlichen Lamellen je Prüfkörper ermittelt, der Mittelwert der Holzfeuchte (u_{MW}) der BSH-Komponenten betrug 14,1 % (COV 2,8 %). Die experimentellen Untersuchungen und die erstmalige Auswertung wurden durch eine vom Verfasser betreute Masterarbeit (Kaps 2019) begleitet.

6.2.2 Herstellung

Die Rohlinge der Probekörper für die experimentelle Untersuchung der Ausklinkungen, wurden aus den Randbereichen der Biegeprüfkörper der zuvor durchgeführten Biegeversuche gefertigt. Der Abbund der Prüfkörpergeometrie erfolgte durch eine Abbundanlage (Hundegger K2) bei der Firma *Holzbau PERR GmbH* (Abbildung 6.4).



(a)



(b)

Abbildung 6.4 (a) Fräsen der Ausklinkungen (b) fertige Ausklindung

6.2.3 Auswertung und Ergebnisse

Das Versagen der BSH-Prüfkörper war durch einen schlagartigen Querkzugriss, ausgehend von der Ausklinkungsecke, gekennzeichnet. Erste wahrnehmbare Geräusche, die auf Querkzugrisse hindeuten, waren ab einem Lastniveau von ca. 15 bis 20 kN zu hören. Die Rissentwicklung begann in der Mitte der Querschnittsbreite und breitete sich anschließend seitlich aus, bis es bei ca. 41 kN zu einem vollständigen Durchriss über die Querschnittsbreite kam (Abbildung 6.5) (b-c). Der Durchriss ist durch einen Lastabfall der Last-Durchbiegungskurve (w) zu erkennen (Abbildung 6.5) (a).

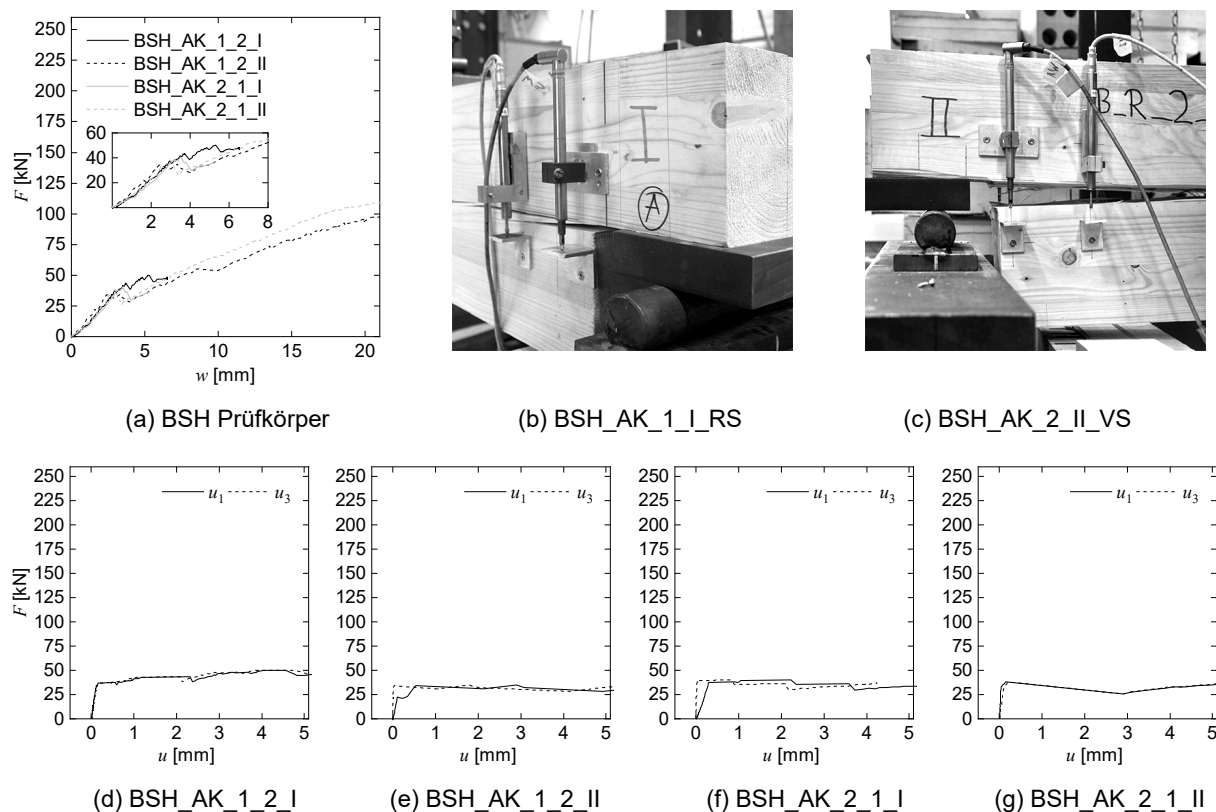


Abbildung 6.5 Ausklinkungen in BSH

Anschließend beteiligte sich nur noch die obere Querschnittshälfte am Lastabtrag. Dies ist durch einen horizontalen Verlauf der Kraft-Rissöffnungskurven zu erkennen (Abbildung 6.5) (d-e). Bei den HBH-Prüfkörpern der Serie 1 war eine Erstrissbildung (Querkzugrisse) in der BSH-Komponente von HBH ab einem Lastniveau von 25 bis 30 kN hörbar. Nach der Erstrissbildung konnte die Last bis auf ca. 40 kN gesteigert werden. Auf diesem Lastniveau öffneten sich die Initialrisse schlagartig, was in der Last-Rissöffnungskurve durch horizontale Sprünge von u_1 deutlich zu sehen ist (Abbildung 6.6) (d-g). Dabei entstanden die initialen Querkzugrisse jeweils in der BSH-Komponente mit anliegenden steigenden Furnierlagen. Diese Furnierlagen erzeugen aus Gleichgewichtsgründen lokale Querkzugspannungen in der BSH-Komponente. Bekommen die Furnierlagen durch ihre Anordnung im Gegensatz dazu Zugspannungen (fallende Furnierlagen), so entstehen in der BSH-Komponente Querdruckspannungen (Abbildung 6.6). Nach der initialen Querkzugrissbildung erfolgte eine Lastumlagerung von den BSH-

Komponenten in die Furnierebene. Anschließend konnte die Last unter weiteren Lastumlagerungen bei gleichzeitigem Risswachstum im Mittelwert auf bis zu 175 kN gesteigert werden.

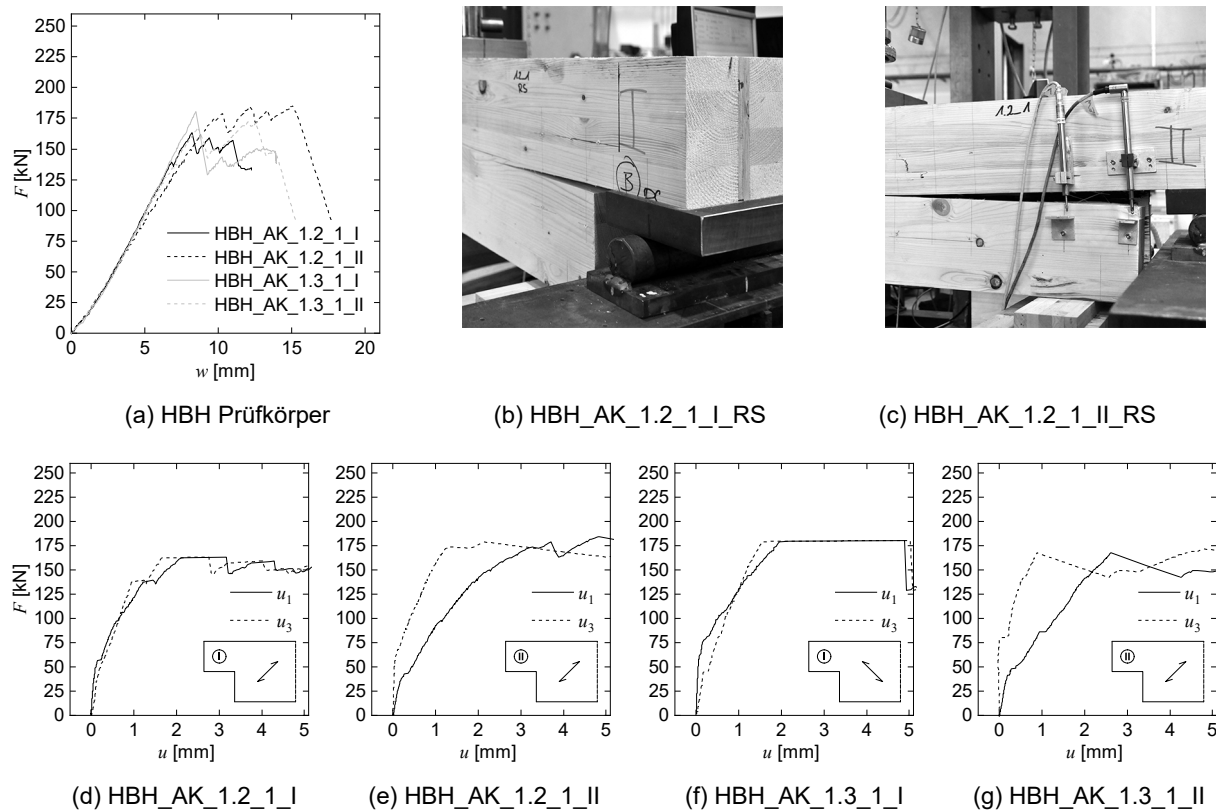


Abbildung 6.6 Ausklinkungen in HBH Serie 1

Der Lastabtrag erfolgt nun nur noch über die Furnierebene. Eine Ausklinkung dieser Serie versagte durch Abscheren der Furnierebene von der BSH-Komponente. Die Furnierebene blieb dabei unversehrt (Abbildung 6.6) (c). Die restlichen drei Ausklinkungen der Serie 1 versagten durch Zugbrüche in der Furnierebene, beginnend an der Ausklinkungsecke. Bei den HBH-Prüfkörpern der Serie 2 waren erste initiale Querkzugrisse in der BSH-Komponente ab einem Lastniveau von 30 bis 35 kN deutlich hörbar. Serie 2 zeigte auch eine große Lastumlagerungskapazität, die einzelnen Sprünge der Kraft-Rissöffnungskurve fallen geringer aus als bei Serie 1 (Abbildung 6.7) (d-f). Die einzelnen Furnierlagen der Furnierebenen versagten bei ca. 167 kN nach und nach auf Zug.

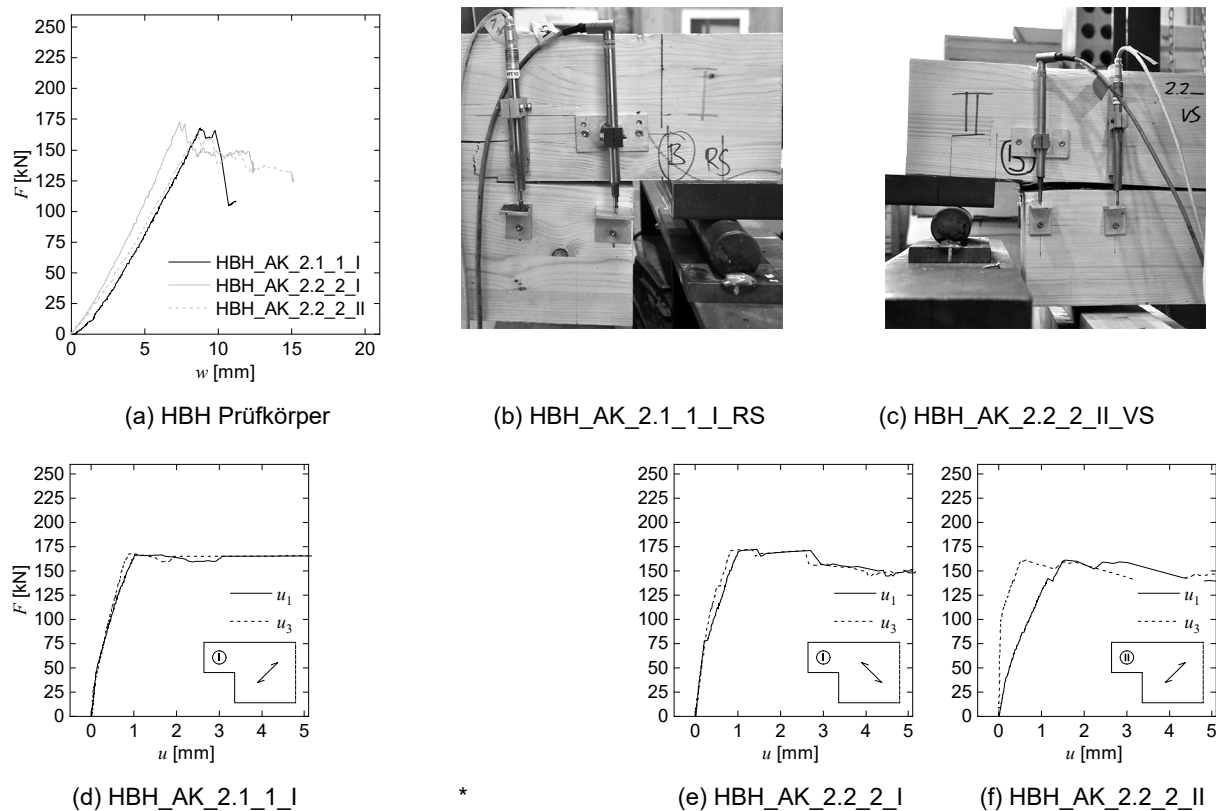


Abbildung 6.7 Ausklinkungen in HBH Serie 2 (*Durch eine Fehlfunktion der Prüfmaschine wurde die Ausklinkung HBH_AK_2.1_1_II zu schnell belastet und es erfolgte keine Messdatenaufzeichnung)

Bei den Ausklinkungen der HBH-Serie 2 konnte keine eindeutige Erstrissbildung in den BSH-Komponenten mit anliegenden steigenden Furnieren beobachtet werden. Die Ausklinkungen der HBH-Prüfkörper der Serie 3 zeigten ein ähnliches Verhalten wie die der Serie 2. Eine Erstrissbildung war ab einem Lastniveau von 35 bis 40 kN hörbar. Bei einem Lastniveau von ca. 222 kN konnte ein Schubversagen der Prüfkörper im Bereich des Restquerschnitts der Ausklinkungen sowie ein Zugversagen der Furnierlagen beobachtet werden. Serie 3 zeigte ein duktileres Versagen als alle anderen Serien. Dies wird auf die 90° orientierte mittlere Furnierlage je Furnierebene zurückgeführt. Bei den Ausklinkungen der HBH-Serie 3 konnte ebenfalls keine eindeutige Erstrissbildung in der BSH-Komponente mit anliegenden steigenden Furnieren beobachtet werden.

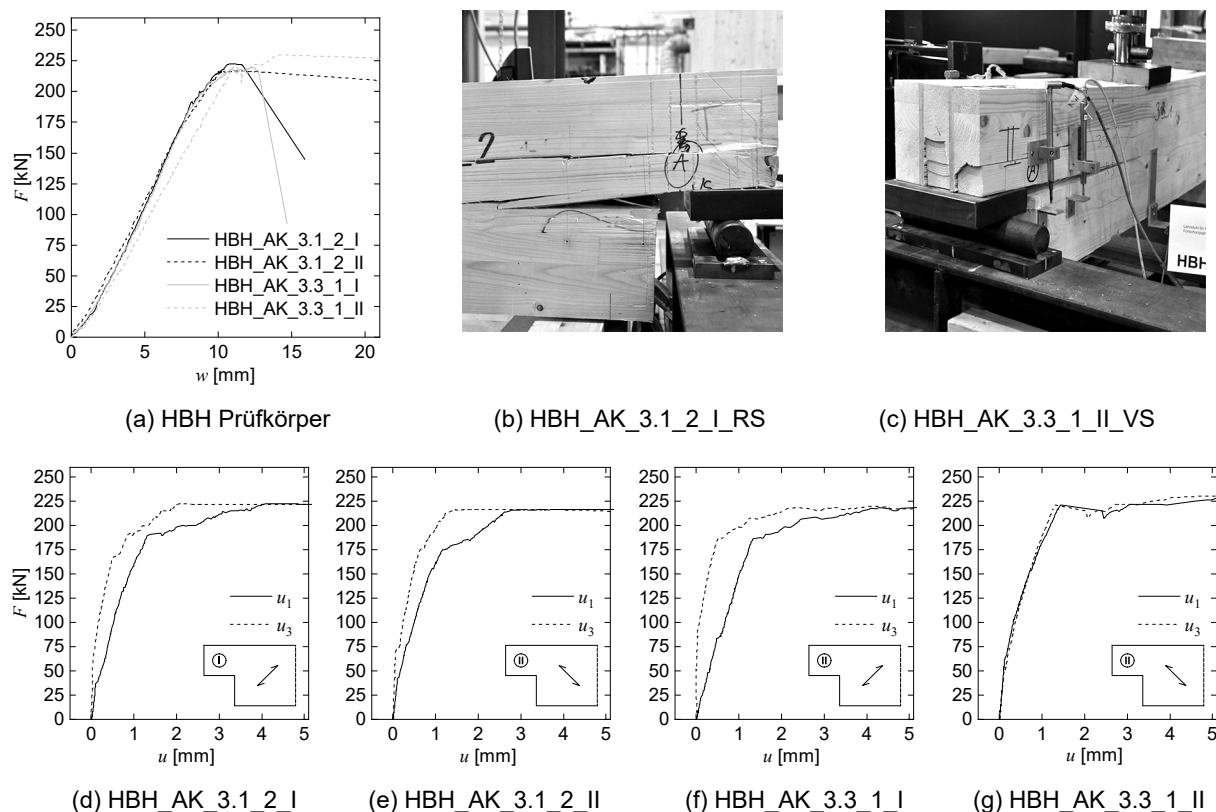


Abbildung 6.8 Ausklinkungen in HBH Serie 3

Das Tragverhalten von Ausklinkungen in HBH ist bei allen Serien durch eine hohe Lastumlagerungsmöglichkeit gekennzeichnet. Die initiale Erstrissbildung (Querzugrisse) war im Vergleich zu den BSH-Prüfkörpern auf einem 50 bis 80 % höheren Lastniveau. Bei Maximallast waren im Bereich der Ausklinkung die BSH-Komponenten über ihre Breite vollständig gerissen. Ebenso zeigten die auf Zug beanspruchten Furnierlagen ein Zugversagen.

Ein systematischer Einfluss möglicher Vorschädigungen aus den Biegeversuchen auf die Tragfähigkeit der Ausklinkungen (II) konnte nicht festgestellt werden.

Die Bruchlast wurde analog zu Trummer (2002) wie folgt definiert: Für die unverstärkten Ausklinkungen wurde als Bruchlast (F_{cr}) die höchste Last definiert, die bei einer Rissauflösung kleiner gleich 3 mm (Mittelwert aus u_1 und u_3) gemessen wurde. Für die HBH-Prüfkörper war die Bruchlast die maximal erreichte Last (F_{max}). Bei Maximallast war die Rissöffnung der BSH-Komponenten der HBH-Prüfkörper meist kleiner als 3 mm, im Maximum 3,5 bis 4,0 mm. Im Vergleich zu unverstärkten Ausklinkungen in BSH konnte für die Ausklinkungen der HBH-Serie 1 ein Laststeigerungsfaktor von 4,3, für HBH-Serie 2 von 4,1 und für HBH-Serie 3 von 5,4 erreicht werden. In Abbildung 6.9 sind die Bruchlasten und deren Mittelwerte aller Prüfkörper gezeigt.

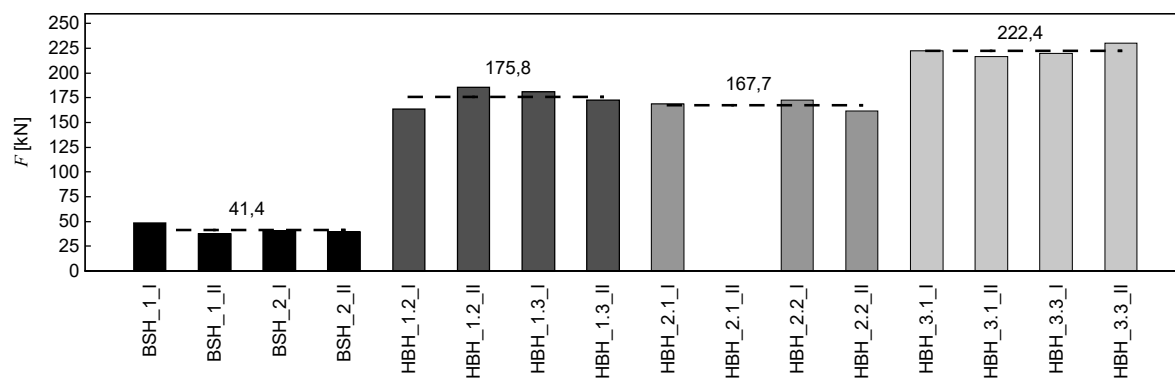


Abbildung 6.9 Vergleich der ermittelten Maximallasten der geprüften Ausklinkungen der BSH- und HBH-Träger

6.3 Durchbrüche

6.3.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Durchbrüchen in HBH wurden runde Durchbrüche mit der maximal zulässigen Durchbruchhöhe für verstärkte Durchbrüche ($d = 0,4 h$) nach DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08 und in Anlehnung an Aicher et al. (2007) und Dröscher et al. (2016) untersucht. Je HBH-Serie wurden zwei Prüfkörper mit jeweils zwei Durchbrüchen und zwei Prüfkörper der BSH-Serie 3 geprüft. Abbildung 6.10 zeigt die Prüfkörpergeometrie und den Versuchsaufbau.

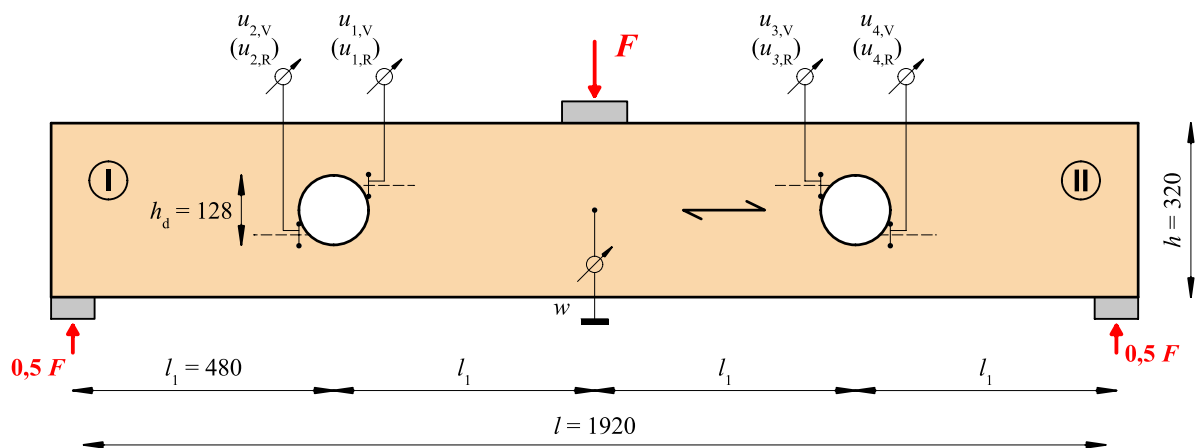


Abbildung 6.10 Versuchsaufbau Durchbrüche; Abmessungen in mm

Die Durchbrüche wurden im auflagernahen, vorwiegend schubbeanspruchten Bereich ($M/V = 1,5 h$) angeordnet. Der Abstand vom Auflager zum Durchbruch und der Abstand vom Lasteinleitungspunkt zum Durchbruch wurden so gewählt, dass der querzuggefährdete Bereich am Durchbruchrand von der Lasteinleitung nicht beeinflusst wird. Die Prüfkörperhöhe (h) betrug 320 mm, die Stützweite (l) 1,92 m. Durch den gewählten Prüfaufbau wurden je Prüfkörper zwei Durchbrüche (I und II) untersucht. Durchbruch I bezeichnet dabei die Stelle des Prüfkörpers, die im Auflagerbereich der Biegeversuche angeordnet war. Dadurch ist mit keinen Vorschädigungen (Mikrorissen etc.) aus den Biegeversuchen zu rechnen, die sich ggf. mindernd auf die Tragfähigkeit auswirken könnten. Je Durchbruch wurden vier induktive Wegaufnehmer im Bereich der zu erwartenden Rissbildung angeordnet (Abbildung 6.10). Weiter wurde die Durchbiegung unter der Lasteinleitung (w) mit einem Seilzugwegaufnehmer aufgezeichnet. Als Lasteinleitungsplatten wurden Stahlplatten mit einer Dicke von 40 mm verwendet. Die Platten erstreckten sich über die gesamte Prüfkörperbreite. Im Laufe der Versuchsdurchführung wurden die Lasteinleitungsbereiche mit Vollgewindeschrauben verstärkt, da es bei den ersten Versuchen zu lokalem Querdrucksagen kam. Die Last wurde mit einem Hydraulikzylinder mit einer maximalen Kraft von 1000 kN eingeleitet. Bei allen Versuchen wurde die Geschwindigkeit des Belastungszyinders so gewählt, dass die geschätzte Höchstlast (F_{est}) innerhalb von $300 \text{ s} \pm 120 \text{ s}$ erreicht wurde. Die Holzfeuchte der BSH-Komponenten wurde an vier unterschiedlichen Lamellen je Prüfkörper ermittelt, der Mittelwert der Holzfeuchte (u_{MW}) der BSH-Komponenten betrug 12,9 % (COV 6,3 %). Die experimentellen Untersuchungen und die erstmalige Auswertung wurden durch eine vom Verfasser betreute Masterarbeit

(Rösch 2019) begleitet.

6.3.2 Herstellung

Die Rohlinge der Probekörper für die experimentelle Untersuchung der Träger mit runden Durchbrüchen, wurden aus den Randbereichen der Biegeprüfkörper der zuvor durchgeführten Biegeversuche gefertigt. Der Abbund der Prüfkörpergeometrie erfolgte durch eine Abbundanlage (Hundegger K2) bei der Firma *Holzbau PERR GmbH* (Abbildung 6.4).

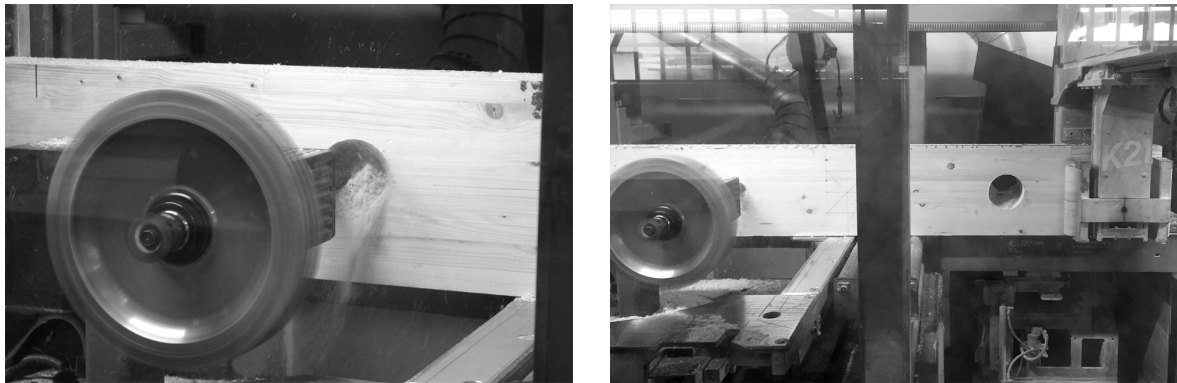


Abbildung 6.11 Fräsen der runden Durchbrüche

Durch die Trägerbreite von 180 mm mussten die runden Durchbrüche von zwei Seiten bearbeitet werden.

6.3.3 Auswertung und Ergebnisse

Der rechte Durchbruch des Prüfkörpers HBH_DB_3_1 wurde aufgrund von Vorschädigungen aus den Biegeversuchen mit geneigten VG-Schrauben verstärkt. Im Bereich der maximalen Querkzugspannungen im Durchbruchsbereich entstanden erste Querkzugrisse, es folgte ein kontinuierlicher Rissfortschritt. Bei beiden Prüfkörpern war eine initiale Querkzugrissbildung im Bereich der Durchbrüche auf einem Lastniveau von ca. 95 bis 97 kN deutlich sichtbar. Die Zeitpunkte der Querkzugrissbildung sind durch ein leichtes Abflachen der Kraft-Verformungslinien (Abbildung 6.12) (a) und durch eine sprunghafte Verformungszunahme der angeordneten induktiven Wegaufnehmer (Abbildung 6.12) (d-g) erkennbar.

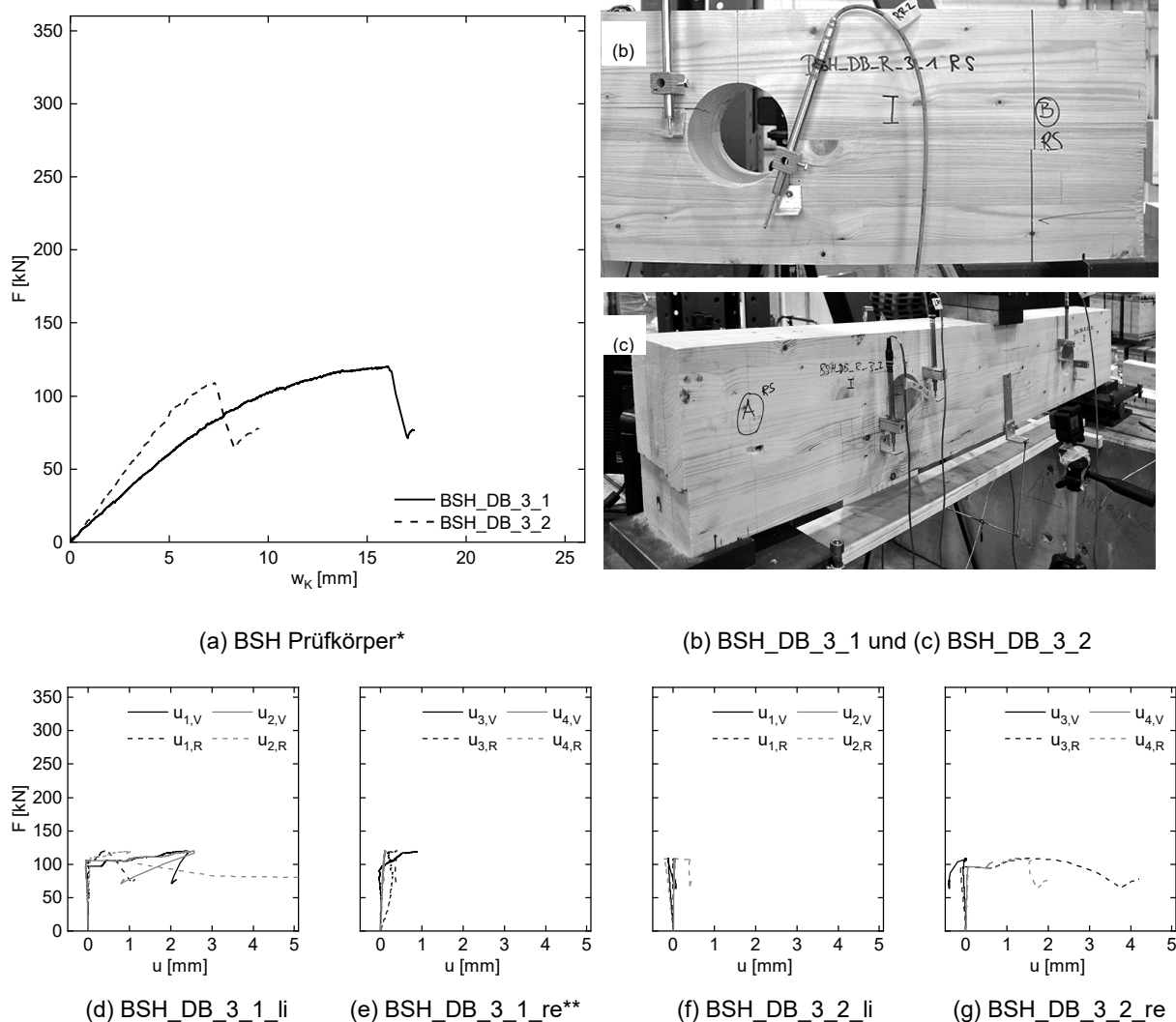
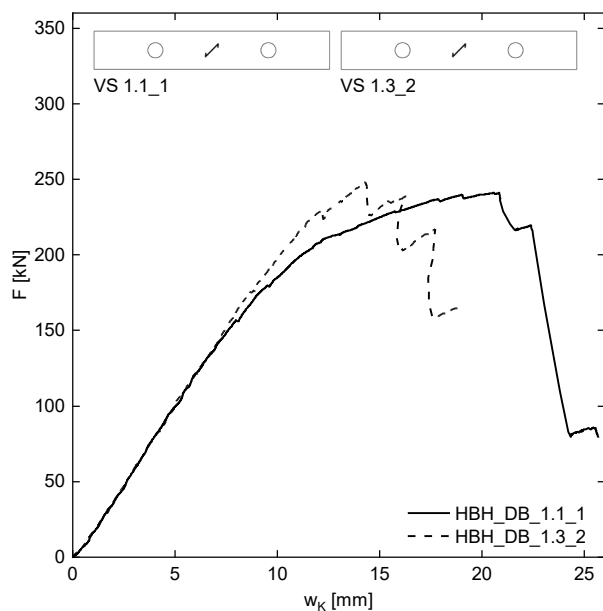


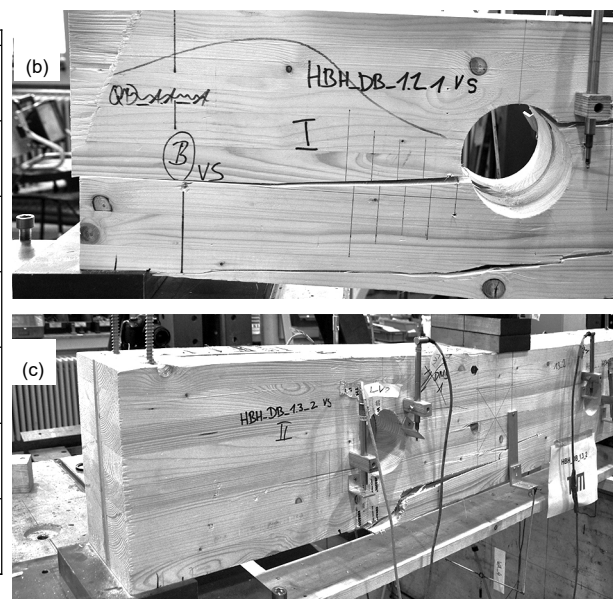
Abbildung 6.12 Durchbrüche BSH (*die Prüfkörperbreite war 161 mm, ** Durchbruch war mit geneigten VG-Schrauben verstärkt)

Die Bauteiltragfähigkeit der beiden Prüfkörper war jeweils durch ein sprödes Schubversagen begrenzt (Abbildung 6.12) (b-c).

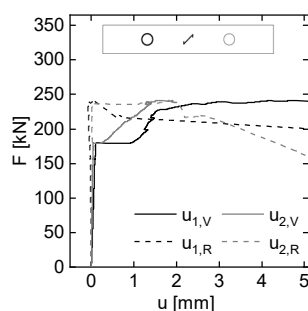
Bei den Prüfkörpern der HBH-Serie 1 entstanden die initialen Querkzugrisse im Durchbruchsbereich jeweils in der BSH-Komponente mit anliegenden steigenden Furnierlagen. Dadurch entstehen Druckspannungen in der Furnierlage ($u_{1,V} / u_{2,V}$ und $u_{3,R} / u_{4,R}$). Diese Furnierlagen erzeugen aus Gleichgewichtsgründen lokale Querkzugspannungen in der BSH-Komponente. Bekommen die Furnierlagen durch ihre Anordnung im Gegensatz dazu Zugspannungen (fallende Furnierlagen), so entstehen in der BSH-Komponente Querkdruckspannungen ($u_{3,V} / u_{4,V}$ und $u_{1,R} / u_{2,R}$) (Abbildung 6.13) (d-g). Die initiale Querkzugrissbildung war auf einem Lastniveau von ca. 150 bis 175 kN deutlich sichtbar und ist durch ein leichtes Abflachen der Kraft-Verformungslinien erkennbar (Abbildung 6.13) (a). Bei beiden Prüfkörpern war ein anschließendes Risswachstum bis zum Auflagerbereich erkennbar. In der Durchbruchsumwandung konnte eine Rissbildung der auf Zug beanspruchten Furnierlagen beobachtet werden.



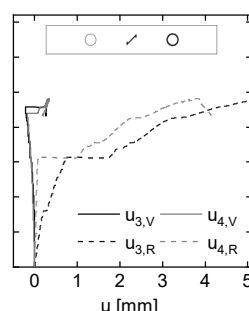
(a) HBH Serie 1



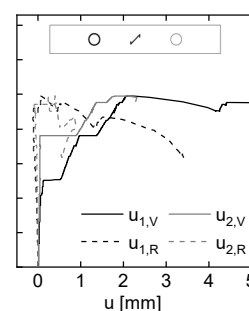
(b) HBH_DB_1.1_1 und (c) HBH_DB_1.3_2



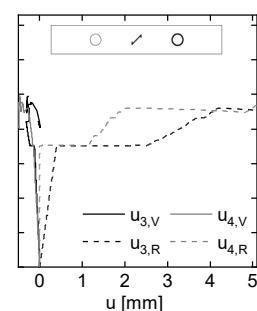
(d) HBH_DB_1.1_1_li



(e) HBH_DB_1.1_1_re



(f) HBH_DB_1.3_2_li



(g) HBH_DB_1.3_2_re

Abbildung 6.13 Durchbrüche HBH Serie 1

Das globale Bauteilversagen wurde ausgelöst durch Biegezugbrüche, die sich teilweise in Feldmitte und im Restquerschnitt des Durchbruchsbereichs ereigneten, sowie durch Schubbrüche in Auflagerichtung (Abbildung 6.13) (b-c). Im Bereich der Durchbrüche waren die

BSH-Komponenten über ihre gesamte Breite gerissen.

Bei den Prüfkörpern der HBH-Serie 2 konnte keine eindeutige Erstrissbildung in der BSH-Komponente mit anliegenden steigenden Furnieren beobachtet werden ($u_{1,V}/u_{2,V}$ und $u_{1,R}/u_{2,R}$) (Abbildung 6.14) (d - g). Die initiale Querszugrissbildung war bei Prüfkörper HBH_DB_2.1_2 ($u_{3,V}$) auf einem Lastniveau von ca. 169 kN und bei HBH_DB_2.3_1 ($u_{3,R}$) auf einem Niveau von ca. 223 kN zu beobachten (Abbildung 6.14) (e, g). In der Durchbruchsumwandung konnte eine Rissbildung der auf Zug beanspruchten Furnierlagen beobachtet werden.

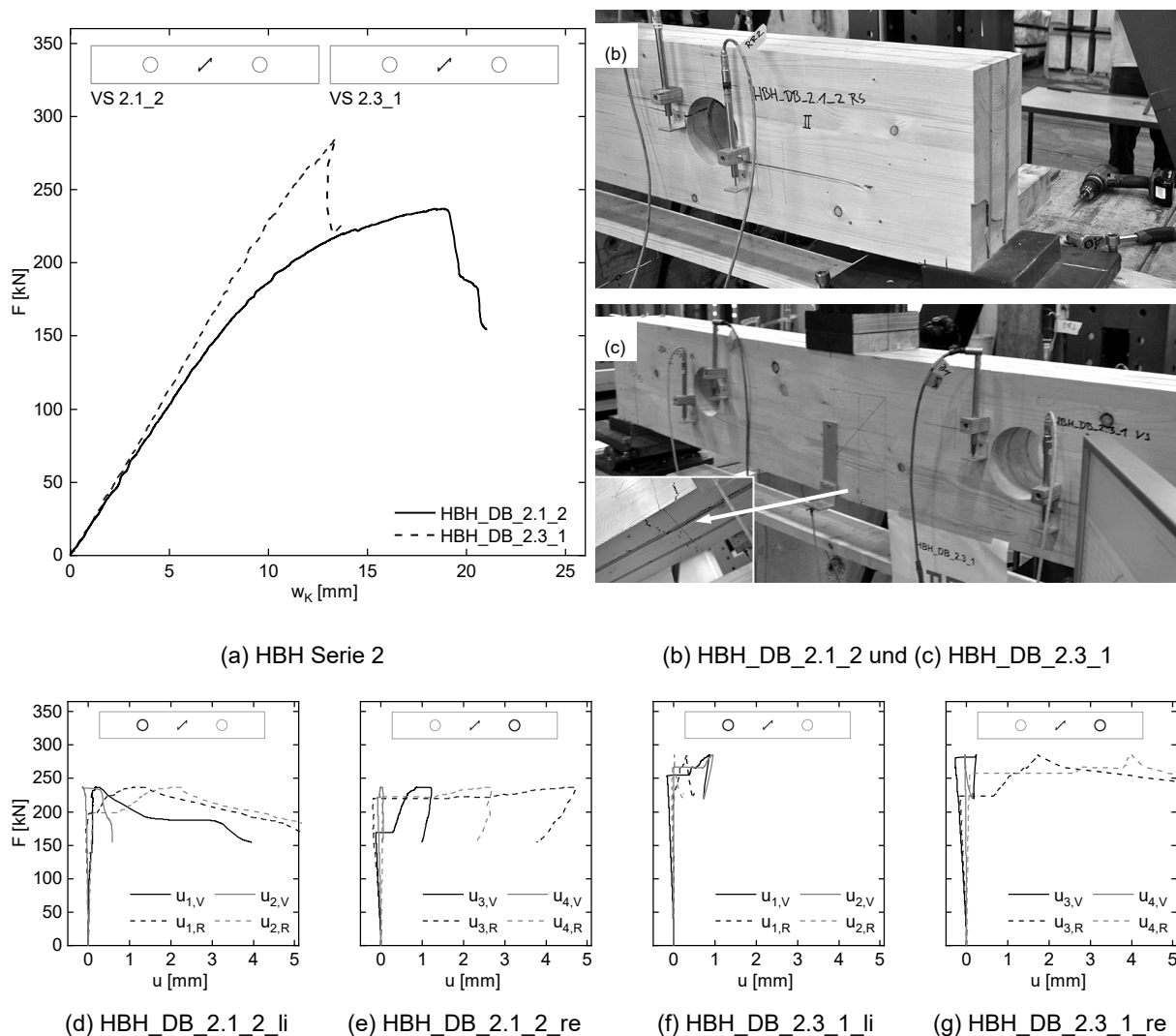


Abbildung 6.14 Durchbrüche HBH Serie 2

Das globale Bauteilversagen von HBH_DB_2.1_2 wurde durch Schubbrüche der drei BSH-Komponenten in Auflagerichtung ausgelöst (Abbildung 6.14) (b). Der Prüfkörper HBH_DB_2.3_1 versagte auf Biegezug in Feldmitte (Abbildung 6.14) (c). Im Bereich der Durchbrüche waren die BSH-Komponenten über ihre gesamte Breite gerissen.

Bei den Prüfkörpern der HBH-Serie 3 konnte ebenfalls keine eindeutige Erstrissbildung in der BSH-Komponente mit anliegenden steigenden Furnieren (Druckspannungen im Furnier und Querkzugspannungen in der BSH-Komponente) beobachtet werden. Die initiale Querkzugrissbildung war bei Prüfkörper HBH_DB_3.1_li ($u_{1,R}$) auf einem Lastniveau von ca. 175 kN (steigende anliegende Furniere) und bei HBH_DB_3.3_2_re ($u_{3,V}$) auf einem Niveau von ca. 190 kN (fallende anliegende Furniere) zu beobachten (Abbildung 6.15) (d, g). Im Bereich der Durchbruchsumwandung zeigten die Furnierlagen keine wahrnehmbaren Risse.

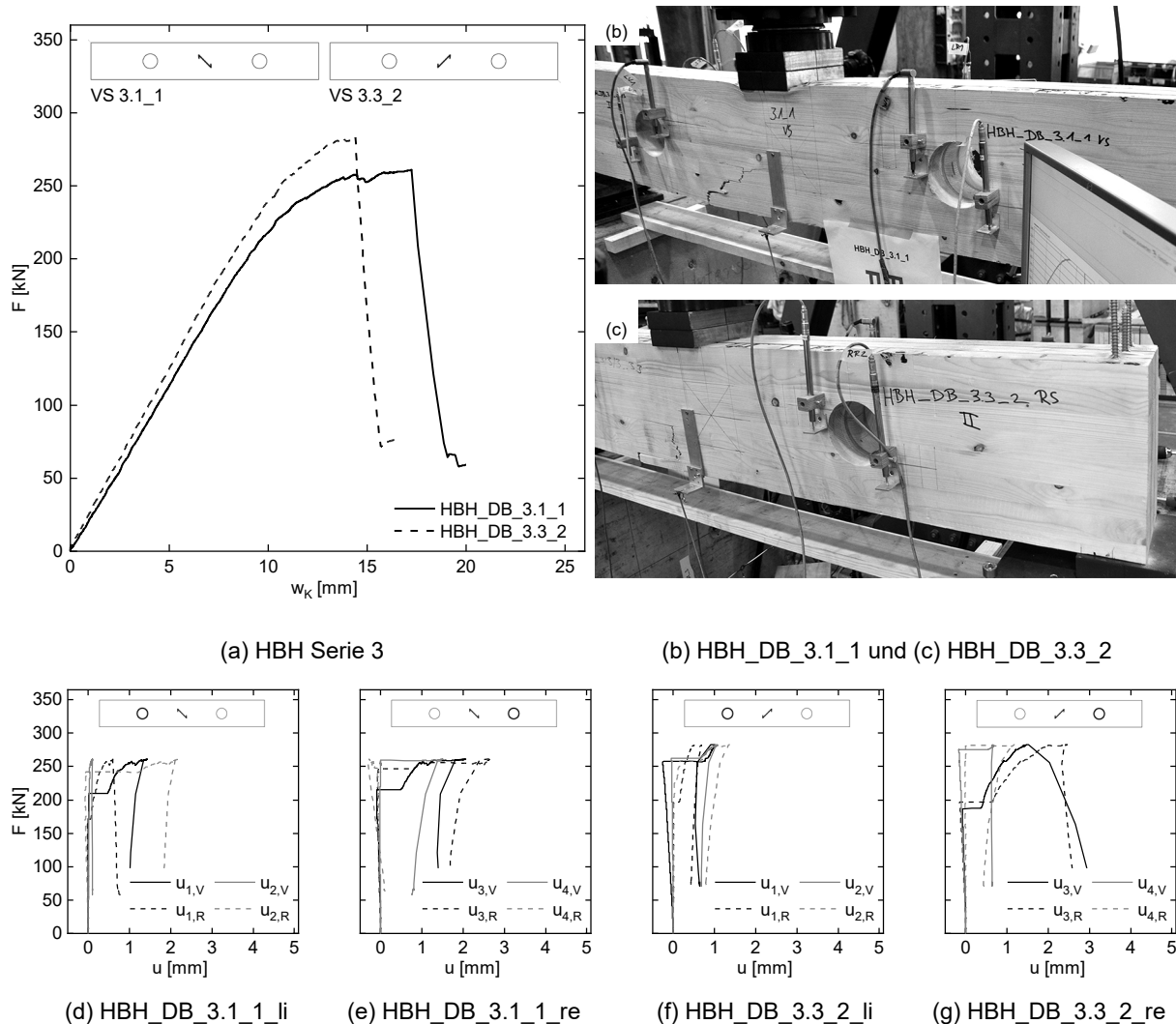


Abbildung 6.15 Durchbrüche HBH Serie 3

Das globale Bauteilversagen der beiden Prüfkörper wurde durch ein Biegezugversagen in Feldmitte begrenzt (Abbildung 6.15) (b, c). In den Furnierebenen konnten Risse im Bereich des Biegezugversagens festgestellt werden.

Das Tragverhalten von runden Durchbrüchen war in allen HBH-Serien durch eine hohe Lastumlagerungsmöglichkeit gekennzeichnet. Die initiale Erstrissbildung (Querkzugrisse) war im Vergleich zu den BSH-Prüfkörpern auf einem um 50 bis 110 % höheren Lastniveau. Auf Maximallastniveau waren im Bereich der Durchbrüche die BSH-Komponenten über ihre Breite

vollständig gerissen. Ebenso zeigten die auf Zug beanspruchten Furnierebenen der HBH-Serie 1 und 2 ein Zugversagen. Ein systematischer Einfluss möglicher Vorschädigungen aus den Biegeversuchen auf die Tragfähigkeit konnte nicht festgestellt werden. Im Vergleich zu unverstärkten runden Durchbrüchen in BSH konnte für die Durchbrüche in HBH-Serie 1 ein Laststeigerungsfaktor von 1,9, für HBH-Serie 2 von 2,0 und für HBH-Serie 3 von 2,1 erreicht werden. Bei den Trägern der HBH-Serie 3 wurde die globale Bauteiltragfähigkeit durch die Durchbrüche nicht begrenzt, die Träger versagten auf Biegezug in Feldmitte. In Abbildung 6.16 sind die Bruchlasten und die Mittelwerte je Serie gezeigt.

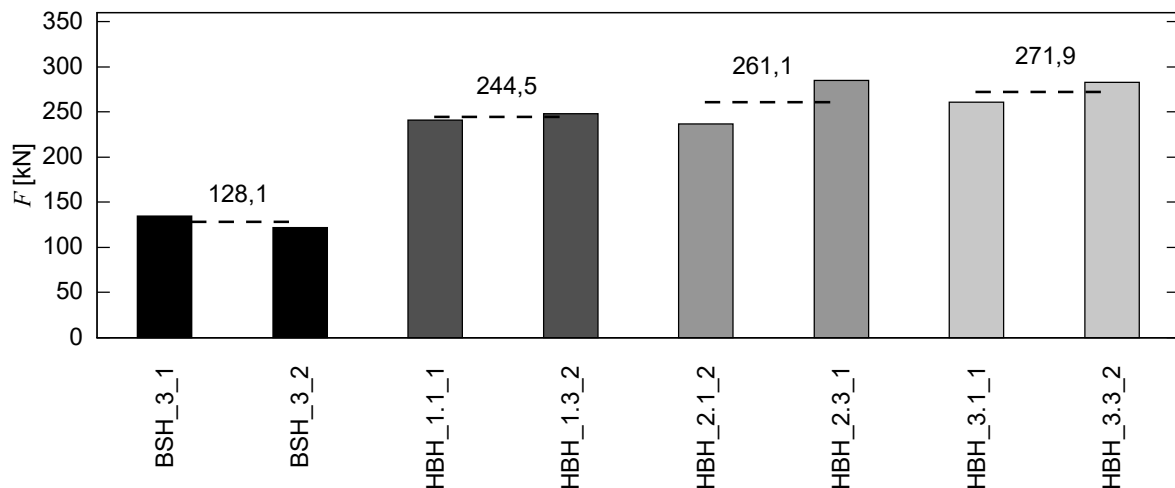


Abbildung 6.16 Vergleich der ermittelten Maximallasten der geprüften BSH- und HBH-Träger mit runden Durchbrüchen

6.4 Queranschlüsse

6.4.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Queranschlüsse mit Stabdübel-Schlitzblechverbindungen in holzbewehrtem Holz untersucht. Dabei wurden zwei Stabdübel ($a_r = 60$ mm) nebeneinander angeordnet (Verbindungsmittelspalten: $m = 2$). In die Prüfkörper der HBH-Serie 1 wurden zwei Schlitzbleche (QA Typ 2), in die Prüfkörper der HBH-Serien 2 und 3 wurde ein Schlitzblech (QA Typ 1) eingebracht. Der lichte Abstand der Schlitzbleche zur Furnierebene betrug bei der HBH-Serie 1 30 mm, bei den zugehörigen BSH-Prüfkörpern 39 mm zur Mittelachse des Trägers. Beim Queranschlusstyp 1 wurde das Stahlblech in Querschnittsmitte angeordnet. Der Versuchsaufbau und die geometrischen Abmessungen sind in Abbildung 6.17 gezeigt. Je BSH-Typ und HBH-QA Typ 2 wurden zwei Anschlüsse geprüft, von den HBH-Serien 2 und 3 jeweils vier Anschlüsse (QA Typ 1). Die Queranschlüsse wurden durch den Verfasser im Handabbund gefertigt. Die Stahlgüte der Bleche war S 235 JR+AR, die der Stabdübel S 355. Die Stahlelemente waren blank (ohne Korrosionsschutz).

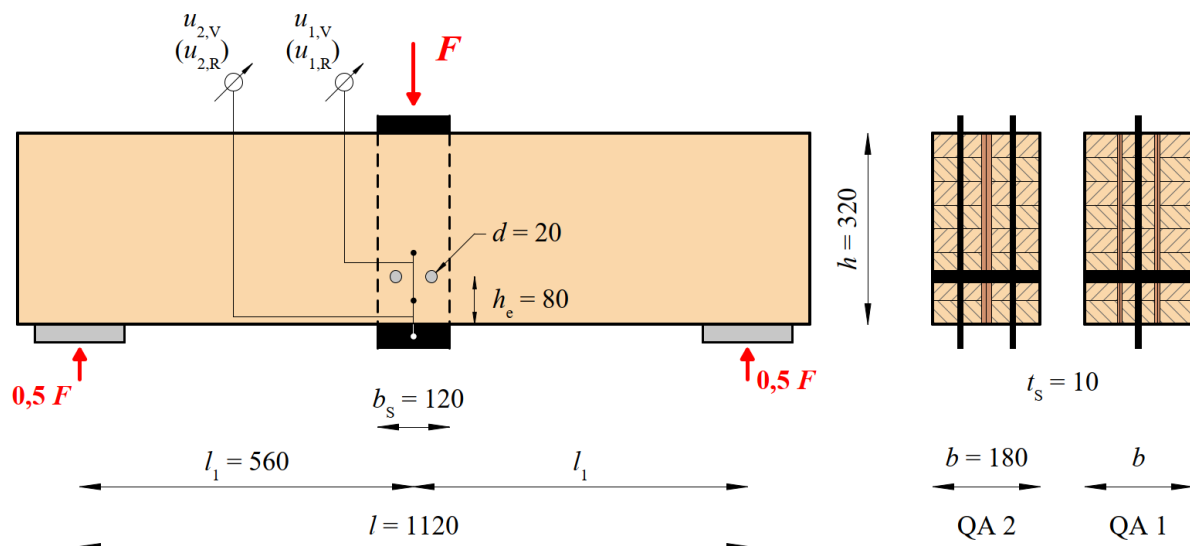


Abbildung 6.17 Versuchsaufbau Queranschlüsse in HBH, Abmessungen in mm

Pro Trägerseite wurden zwei induktive Wegaufnehmer positioniert. Dabei wurde die Rissentwicklung auf Höhe der Stabdübelachse ($u_{1,V}$ und $u_{1,R}$) und die Relativverschiebung zwischen Stahlblech und BSH ($u_{2,V}$ und $u_{2,R}$) aufgenommen. Die Last wurde mit einer hydraulischen Prüfmaschine (Zwick 600 E, $F_{\max} = 600$ kN) aufgebracht. Zur Untersuchung der Queranschlüsse wurde das Belastungsverfahren nach DIN EN 26891:1991-07 angewandt. Dabei wird im ersten Schritt die Last bis auf 40 % der geschätzten Höchstlast gesteigert und für 30 s konstant gehalten. Anschließend wird auf 10 % entlastet und erneut für 30 s konstant gehalten (Abbildung 6.18). Danach wurde die Last gesteigert, bis die Bruchlast oder eine Verschiebung von 15 mm erreicht wurde. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde in Abhängigkeit der aus Vorversuchen ermittelten Höchstlast (F_{est}) eingestellt. Bei einer Belastung bis 70 % von F_{est} wurde die Last kraftgesteuert aufgebracht. Dabei wurde eine konstante Belastungsgeschwindigkeit von $0,2 \cdot F_{est}$ je min (± 25 %) eingehalten. Oberhalb 70 % von F_{est} wurde weggesteuert

mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit gefahren, die eine Bruchlast oder eine Verschiebung von 15 mm in einer zusätzlichen Prüfdauer von 3 bis 5 min erzielt.

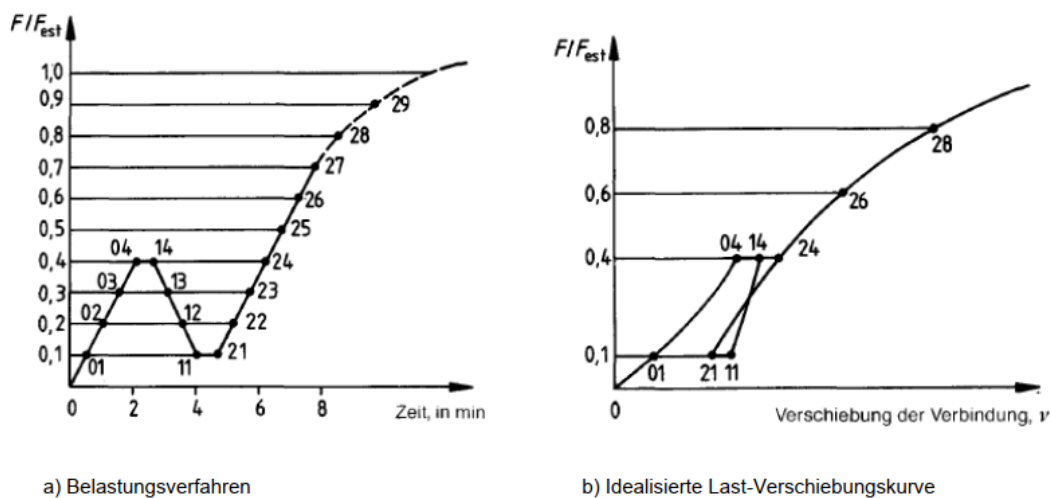


Abbildung 6.18 Belastungsverfahren Queranschlüsse

Die Holzfeuchte der BSH-Komponenten wurde an vier unterschiedlichen Lamellen je Prüfkörper ermittelt, der Mittelwert der Holzfeuchte (u_{MW}) der BSH-Komponenten betrug 14,3 % (COV 2,6 %). Die experimentellen Untersuchungen und die erstmalige Auswertung wurden durch eine vom Verfasser betreute Masterarbeit (Kostner 2020) begleitet.

6.4.2 Herstellung

Die Rohlinge der Probekörper für die experimentelle Untersuchung der Träger mit Queranschlüssen, wurden aus den Randbereichen der Biegeprüfkörper der zuvor durchgeführten Biegeversuche gefertigt. Der Abbund der Prüfkörpergeometrie erfolgte im klassischen Handabbund (Abbildung 6.4).

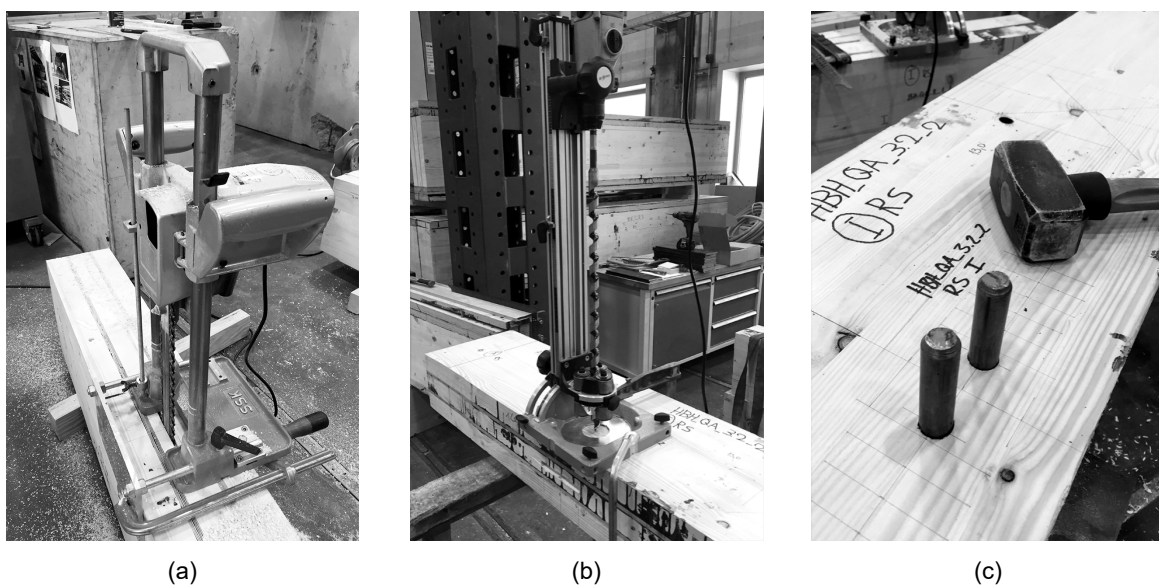


Abbildung 6.19 (a) Schlitten der BSH Komponenten, (b) Bohren der Löcher, (c) Einbringen der Stabdübel

Das zur Verfügung stehende Schlitzgerät (LST-300) hatte eine maximale Schlitzdicke von 6 mm. Die erforderliche Schlitzdicke war 10 mm, deswegen musste zweimal geschlitzt werden. Nach dem ersten Schlitzen wurde eine Holzlamelle der Dicke von 6 mm in den Schlitz eingetrieben. Anschließend wurde versetzt nochmal geschlitzt. Das Eintreiben einer Holzlamelle vor dem zweiten Schlitzen wurde durchgeführt, um einem Verziehen des Blattes vorzubeugen. Nach dem zweiten Schlitzen wurde die Holzlamelle entfernt. Mit dem Schlitzgerät war es nicht möglich, die gesamte Bauteilhöhe in einem Zug zu schlitzen. Der Träger musste umgedreht und von der anderen Seite eingeschlitzt werden. Unebenheiten im Schlitz wurden mit einer Kettensäge ausgeglichen.

6.4.3 Auswertung und Ergebnisse

Die geschätzte Höchstlast (F_{est}) wurde auf Basis von zwei Vorversuchen ermittelt. Dazu wurden ein BSH-Prüfkörper und ein HBH-Prüfkörper der Serie 3 geprüft. Die Prüfkörper wurden mit einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit ($v = 0,05 \text{ mm/s}$) weggesteuert belastet. Beim BSH-Prüfkörper traten die initialen Querkzugrisse auf einem Lastniveau von ca. 40 kN auf Höhe der Stabdübel auf. Anschließend konnte die Last noch auf 66 kN gesteigert werden. Für die Hauptversuche der BSH-Prüfkörper wurde für den ersten geprüften Prüfkörper (BSH_QA_R_2_2_I) die Höchstlast (F_{est}) zu 70 kN angesetzt. Dies verursachte eine zu hohe Belastungsgeschwindigkeit, sodass für die restlichen BSH-Prüfkörper die Höchstlast (F_{est}) zu 40 kN gesetzt wurde. Der HBH-Prüfkörper der Serie 3 zeigte eine erste initiale Querkzugrissbildung auf einem Lastniveau von ca. 62 kN. Die Maximallast betrug 135 kN. Daraus abgeleitet wurde die Höchstlast (F_{est}) für die HBH-Serien zu 120 kN angesetzt.

Der Queranschlusstyp 2 (zwei Schlitzbleche) verursachte in beiden BSH-Prüfkörpern ein Querkzugversagen vor dem Erreichen der Lochleibungsfestigkeit des Brettschichtholzes. Der BSH-Prüfkörper 1_1_I zeigte eine Erstrissbildung auf einem Lastniveau von ca. 27 kN. Dies ist durch einen Verformungssprung der Wegaufnehmer (u_1) zu erkennen (Abbildung 6.20) (b). Die Erstrissbildung von BSH-Prüfkörper 1_1_II entstand auf einem Lastniveau von ca. 18 kN (Abbildung 6.20) (c). Aufgrund eines Fehlers der Prüfmaschine wurde die Prüfung von BSH-Prüfkörper 1_1_I vorzeitig gestoppt. Die bis dahin maximal erreichte Last betrug 44,3 kN. Die maximale Last von BSH-Prüfkörper 1_1_II betrug 35,9 kN. Die Streckgrenze der Stabdübel wurde nicht erreicht, es bildeten sich keine Fließgelenke. Nach Entlastung der Schlitzbleche konnten die Stabdübel aus beiden Prüfkörpern ohne großen Widerstand entnommen werden. Der Queranschlusstyp 2 zeigte im Brettschichtholz ein sprödes Versagen mit Ausbildung von langen Querkzugrissen.

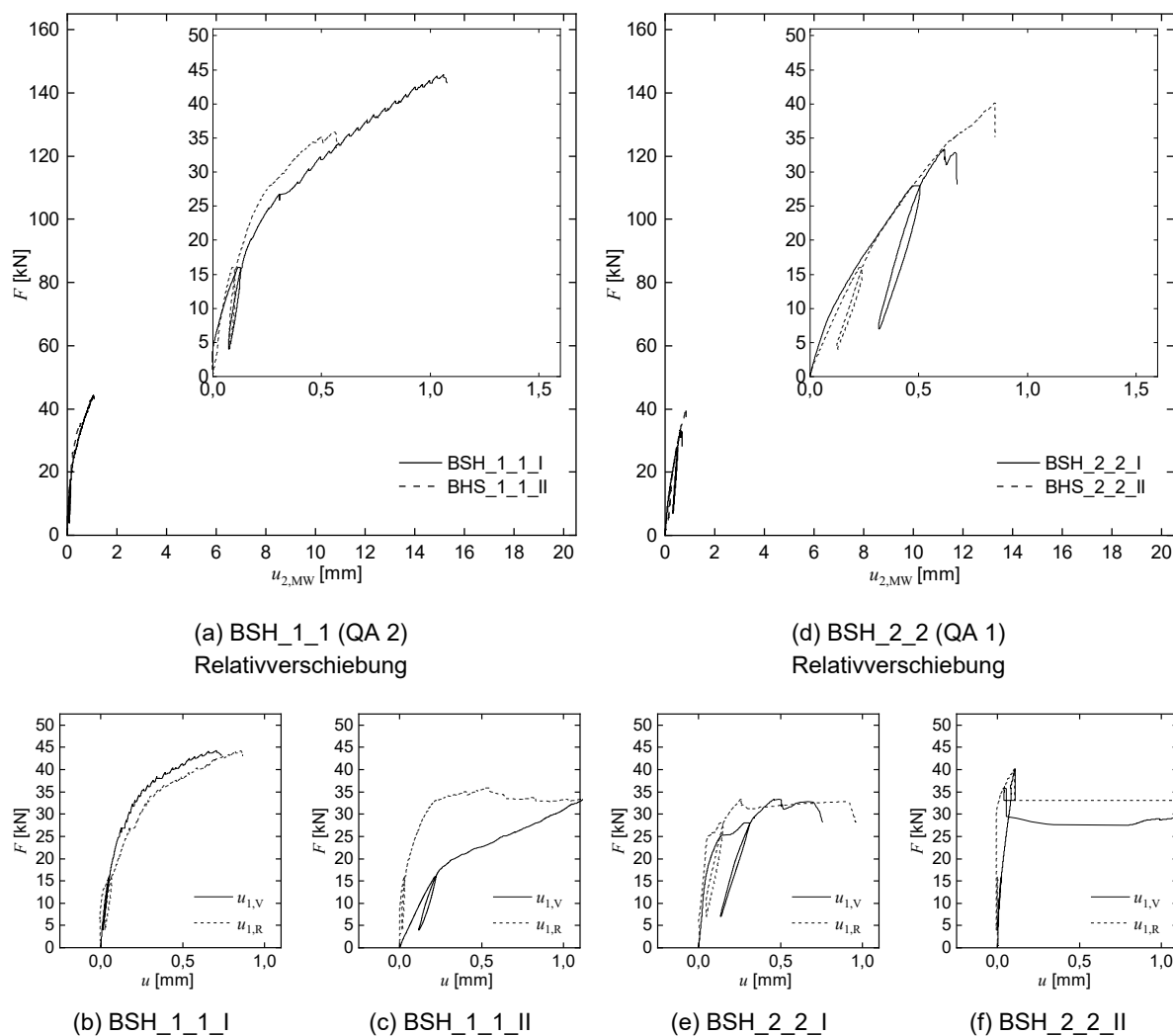


Abbildung 6.20 Last-Verformungskurven der untersuchten Queranschlüsse in BSH, Queranschlusstyp 2 (2 Schlitzbleche), Queranschlusstyp 1 (1 Schlitzblech)

Der Queranschluss mit einem Schlitzblech (QA Typ 1) verursachte in beiden BSH-Prüfkörpern ebenfalls ein Querzugversagen im Brettschichtholz vor dem Erreichen der Lochleibungsfestigkeit von Brettschichtholz. Der BSH-Prüfkörper 2_2_I zeigte eine Erstrissbildung auf einem Lastniveau von ca. 25 kN (Abbildung 6.20) (e). Die Erstrissbildung von BSH-Prüfkörper 2_2_II entstand auf einem Lastniveau von ca. 15 kN (Abbildung 6.20) (f). Der BSH-Prüfkörper 2_2_I zeigte ein schlagartiges Querzugversagen. Dies ist auf die hohe Belastungsgeschwindigkeit aufgrund der geschätzten Höchstlast von 70 kN zurückzuführen. Die maximal erreichte Last betrug dabei mit 33,4 kN nur 47,7 % der geschätzten Höchstlast. Die maximal erreichte Last von BSH-Prüfkörper 2_2_II betrug 40,1 kN. Die Streckgrenze der Stabdübel wurde nicht erreicht, es bildeten sich keine Fließgelenke. Nach Entlastung der Schlitzbleche konnten die Stabdübel aus den Prüfkörpern ohne großen Widerstand entnommen werden. Der Queranschlusstyp 1 zeigte im Brettschichtholz ebenfalls ein sprödes Versagen mit Ausbildung von langen Querzugrissen.

Die HBH-Prüfkörper der Serie 1 zeigten eine deutliche Laststeigerung im Vergleich zu den BSH-Prüfkörpern. Durch Überschreitung der Querkzugfestigkeit der BSH-Komponenten entstand eine Erstrissbildung (Querkzugrisse) auf Höhe der Stabdübelachsen. Der HBH-Prüfkörper 1.1_2_I zeigte eine Erstrissbildung auf einem Lastniveau von ca. 50 bis 55 kN, der HBH-Prüfkörper 1.1_2_II auf einem Lastniveau von ca. 40 bis 42 kN (Abbildung 6.21) (b-c). Anschließend konnte die Last bei HBH-Prüfkörper 1.1_2_I auf 117,1 kN und bei HBH-Prüfkörper 1.1_2_II auf 130,3 kN weiter gesteigert werden. Deutlich zu erkennen ist, dass sich bereits auf einem Lastniveau von 40 % der Maximallast plastische Verformungen in der Anschlusskonstruktion ausbildeten, da sich bei Entlastung auf 10 % eine annähernd vertikale Last-Verformungskurve der Relativverschiebung zwischen Stahlblech und BSH-Komponenten einstellt (Abbildung 6.21) (a). Diese starke Ausprägung ist auf zu hohe Abweichungen in der Fertigung zurückzuführen, da der Bohrer oftmals verlaufen ist. Die Rissöffnung je Trägerseite war bei beiden Prüfkörpern ähnlich ausgeprägt und betrug ca. 6 mm.

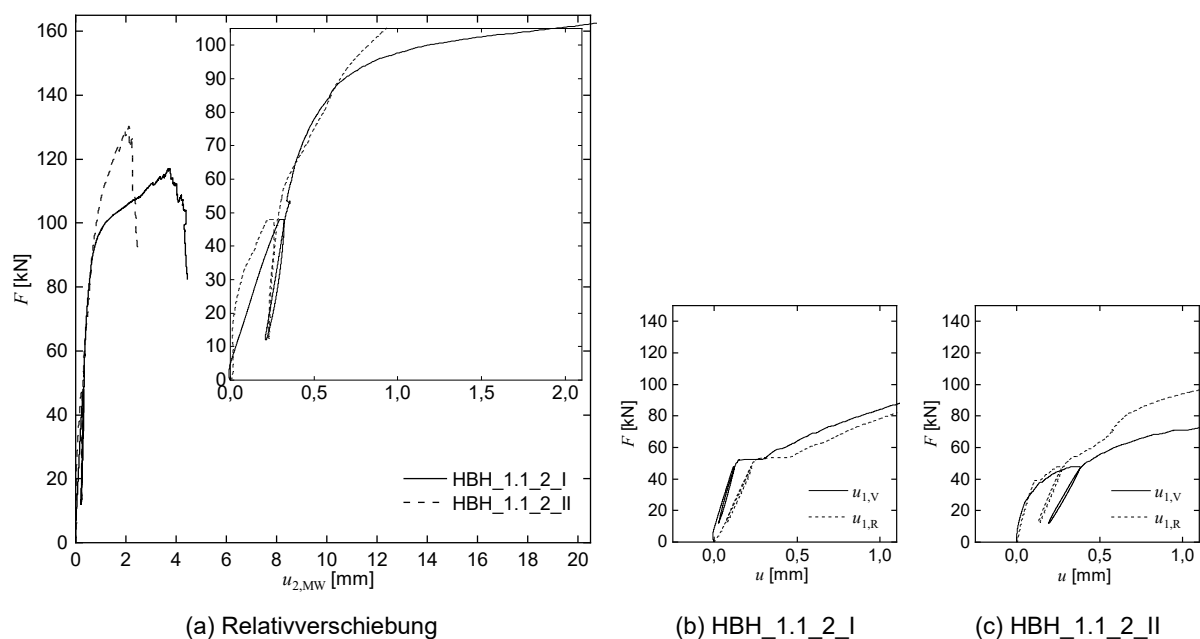
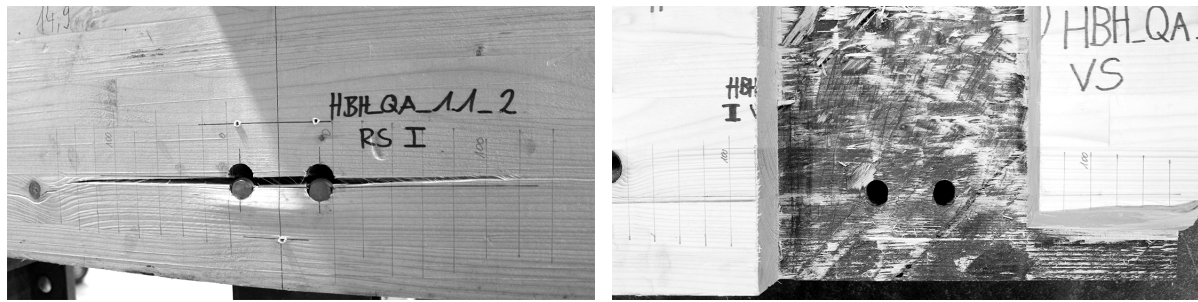


Abbildung 6.21 Last-Verformungskurven der untersuchten Queranschlüsse in HBH-Serie 1, Queranschlüsse, Anschlussstyp 2 (2 Schlitzbleche)

Neben dem klassischen Querkzugriss war auch ein lokales Herauswölben der BSH-Komponenten unter den Stabdübeln zu erkennen (Abbildung 6.22) (a). Auf der Trägerunterseite konnte zudem eine Rissbildung in den Furnierebenen festgestellt werden.



(a) Rissbildung von HBH_QA_1.1_2_I

(b) Lochleibungsversagen von HBH_QA_1.1_2_I

Abbildung 6.22 Versagensformen der Queranschlüsse in HBH-Serie 1, Anschlussstyp 2 (2 Schlitzbleche)

Bei beiden Prüfkörpern konnte ein Fließen der Stabdübel ausgeschlossen werden, da sich die VBM nach der Entlastung leicht entfernen ließen und keine plastischen Verformungen festgestellt werden konnten. In der freigelegten Furnierebene konnte ein Lochleibungsversagen festgestellt werden (Abbildung 6.22) (b).

Der HBH-Prüfkörper 2.2_1_I zeigte eine Erstrissbildung auf einem Lastniveau von ca. 85 kN, der HBH-Prüfkörper 2.2_1_II auf einem Lastniveau von ca. 59 kN, der HBH-Prüfkörper 2.3_2_I bei ca. 97 kN und der HBH-Prüfkörper 2.3_2_II auf einem Lastniveau von ca. 80 kN (Abbildung 6.23) (b-e). Aufgrund eines technischen Fehlers der Prüfmaschine wurde die Prüfung des Queranschlusses 2.2_1_I abgebrochen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die maximale Tragfähigkeit aufgrund des starken Lastabfalls bei 128 kN erreicht wurde (Abbildung 6.23) (a). Bei HBH-Prüfkörper 2.2_1_II konnte die Last auf 115,41 kN, bei HBH-Prüfkörper 2.3_2_I auf 122,2 kN und bei HBH-Prüfkörper 2.3_2_II auf 121,9 kN gesteigert werden.

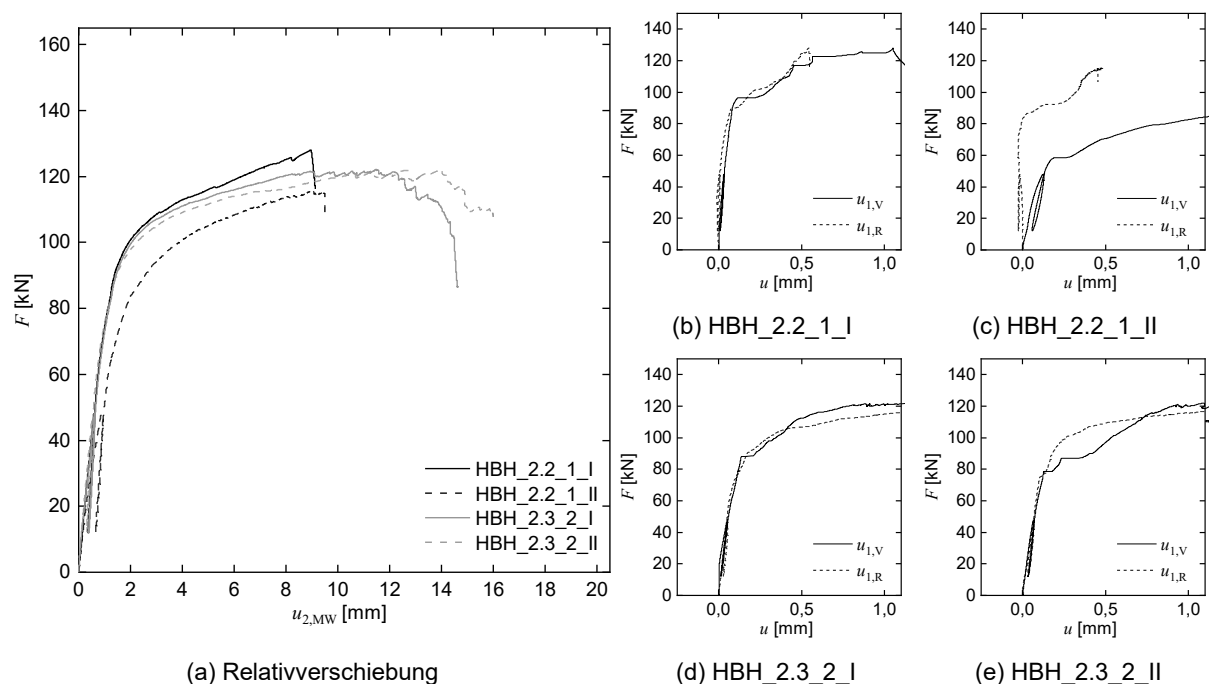


Abbildung 6.23 Last-Verformungskurven der untersuchten Queranschlüsse in HBH-Serie 2, Queranschlüsse, Anschlussstyp 1 (1 Schlitzblech)

Die Queranschlüsse in der HBH-Serie 2 zeigen eine deutliche Laststeigerung im Vergleich zu den Anschlüssen in BSH und der HBH-Serie 1. Die Erstrissbildung war im Vergleich zu den BSH-Prüfkörpern auf ca. 4,1-fach höherem Lastniveau, außer bei Prüfkörper HBH_2.2_1_II (2,8-fach). Dies wird auf Vorschädigungen zurückgeführt. Das höhere Lastniveau der Erstrissbildung der HBH-Serie 2 kann mit den zwei Furnierebenen im Querschnitt begründet werden. Dadurch ist anzunehmen, dass die Breite der BSH-Komponenten noch im Einflussbereich der Furnierebenen liegt. Auf der Trägerunterseite konnte bei allen Prüfkörpern eine Rissbildung in den Furnierebenen festgestellt werden. Zwei der Prüfkörper (HBH_2.2_1_II, HBH_2.2_1_II) zeigten Biegezugrisse in den BSH-Komponenten (Abbildung 6.24).



(a) HBH_QA_2.2_1_II



(b) HBH_QA_2.3_2_II

Abbildung 6.24 Biegezugrisse in den Prüfkörpern der HBH-Serie 2

Das Versagen aller Anschlüsse der Serie 2 war eine Kombination aus klassischem Querzug- und Lochleibungsversagen der BSH-Komponenten und einem Lochleibungsversagen der Furnierebenen. Bei allen Prüfkörpern konnte ein Hineinziehen der Stabdübel beobachtet werden. Ebenso konnte ein Fließen der Stabdübel festgestellt werden, da sich die VBM nach der Entlastung nur sehr schwer entfernen ließen.

Der HBH-Prüfkörper 3.2_1_I zeigte eine Erstrissbildung auf einem Lastniveau von ca. 88 kN, der Prüfkörper 3.2_1_II auf einem Lastniveau von ca. 80 kN, der Prüfkörper 3.2_2_I bei ca. 78 kN und der HBH-Prüfkörper 3.2_2_II auf einem Lastniveau von ca. 76 kN (Abbildung 6.25) (b-e). Aufgrund eines technischen Fehlers der Prüfmaschine wurde die Prüfung des Queranschlusses 3.2_1_I abgebrochen. Die erreichte maximale Last betrug 133,5 kN (Abbildung 6.25) (a).

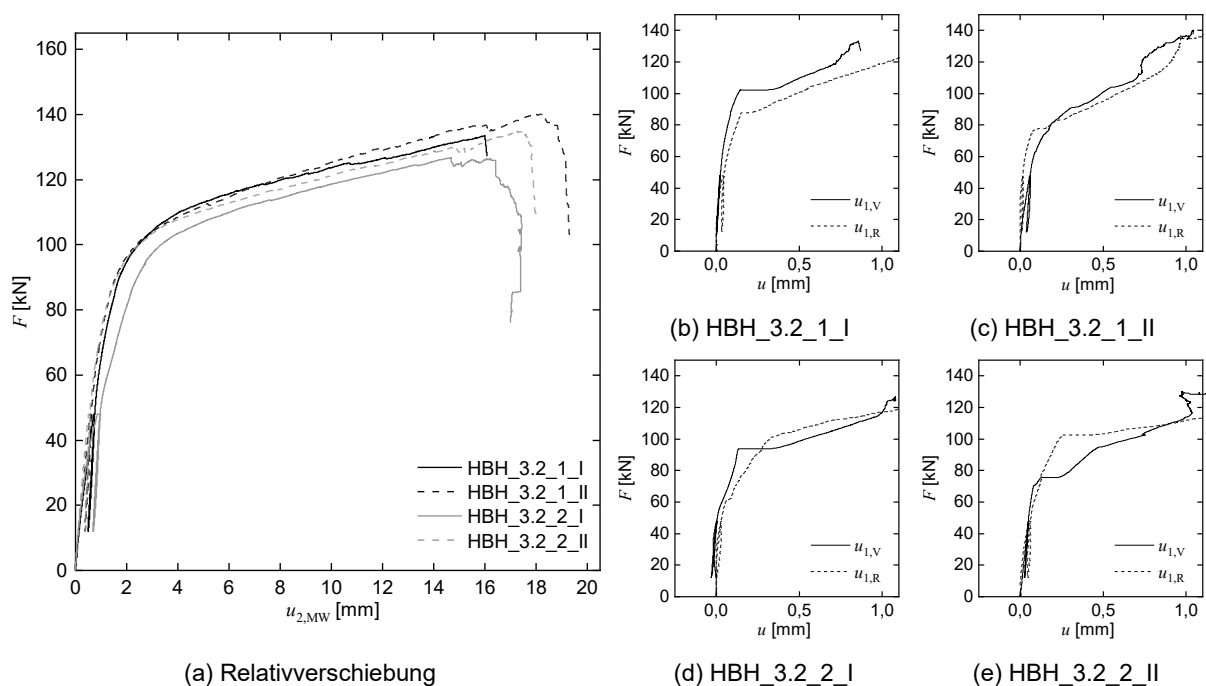


Abbildung 6.25 Last-Verformungskurven der untersuchten Queranschlüsse in HBH-Serie 3, Queranschlüsse, Anschlussstyp 1 (1 Schlitzblech)

Beim HBH-Prüfkörper 3.2_1_II konnte die Last bei einer Verschiebung von ca. 18 mm auf 140,2 kN ($u_{15\text{mm}} = 135,3 \text{ kN}$), bei HBH-Prüfkörper 3.2_2_I auf 126,7 kN und bei HBH-Prüfkörper 3.2_2_II bei einer Verschiebung von ca. 18 mm auf 134,8 kN ($u_{15\text{mm}} = 128,4 \text{ kN}$) gesteigert werden. Die Queranschlüsse in den HBH-Prüfkörpern der Serie 3 erreichten die höchsten Maximallasten. Die Erstrissbildung war im Vergleich zu den BSH-Prüfkörpern auf 3,8-fach höherem Lastniveau und im Vergleich zu HBH-Serie 2 auf etwa dem gleichen Niveau. Auf der Trägerunterseite konnte bei allen Prüfkörpern eine Rissbildung in den Furnierebenen festgestellt werden. Alle Anschlüsse zeigten ein sehr duktiles Tragverhalten. Dies ist auf das Fließen der Stabdübel zurückzuführen. Aus dem HBH-Prüfkörper 3.2_1_I wurden das Stahlblech und die Stabdübel entnommen (Abbildung 6.26) (a). Es konnte ein Biegewinkel der Stabdübel von $12,5^\circ$ ermittelt werden.



(a) HBH_QA_3.2_1_I



(b) HBH_QA_3.2_2_I

Abbildung 6.26 Verformte Stabdübel der Anschlusskonstruktion in HBH-Serie 3

Der Versagensmechanismus der vier Anschlüsse folgte dem Versagensverlauf der HBH-Serie 2. Auf der Trägerunterseite konnten Risse in den Furnierebenen festgestellt werden.

Auf Basis der Messwerte wurden die Anfangsverschiebung (k_i) und das Verschiebungsmodul (k_s) der Anschlusskonstruktion nach DIN EN 26891:1991-07 ermittelt (Tabelle 6.1).

Tabelle 6.1 Anfangsverschiebung und Verschiebungsmodul der Anschlusskonstruktion

Material	Prüfkörper	k_i	k_s	$k_{s,MW}$
		[kN/mm]	[kN/mm]	[kN/mm]
BSH	1_1_I	131,5	98,8	136,6
	1_1_II	181,4	174,3	
	2_2_I	59,5	51,8	57,4
	2_2_II	67,6	63,0	
HBH	1.1_2_I	160,8	142,6	150,2
	1.1_2_II	198,7	157,9	
	2.2_1_I	81,4	80,6	71,6
	2.2_1_II	53,4	48,8	
	2.3_2_I	78,3	72,5	
	2.3_2_II	90,3	84,6	
	3.2_1_I	68,1	63,4	67,9
	3.2_1_II	81,3	77,6	
	3.2_2_I	53,5	45,5	
	3.2_2_II	91,3	85,1	

Im Vergleich zu den Anschlüssen in BSH konnte der Verschiebungsmodul im Mittel für HBH-Serie 1 um 10 %, für HBH-Serie 2 um 25 % und für HBH-Serie 3 um 18 % gesteigert werden. Im Vergleich zu unverstärktem BSH konnte für die HBH-Serie 1 ein Laststeigerungsfaktor für den untersuchten Queranschlusstyp im Mittel von 3,1, für HBH-Serie 2 von 3,3 und für HBH-Serie 3 von 3,6 erreicht werden (Abbildung 6.27).

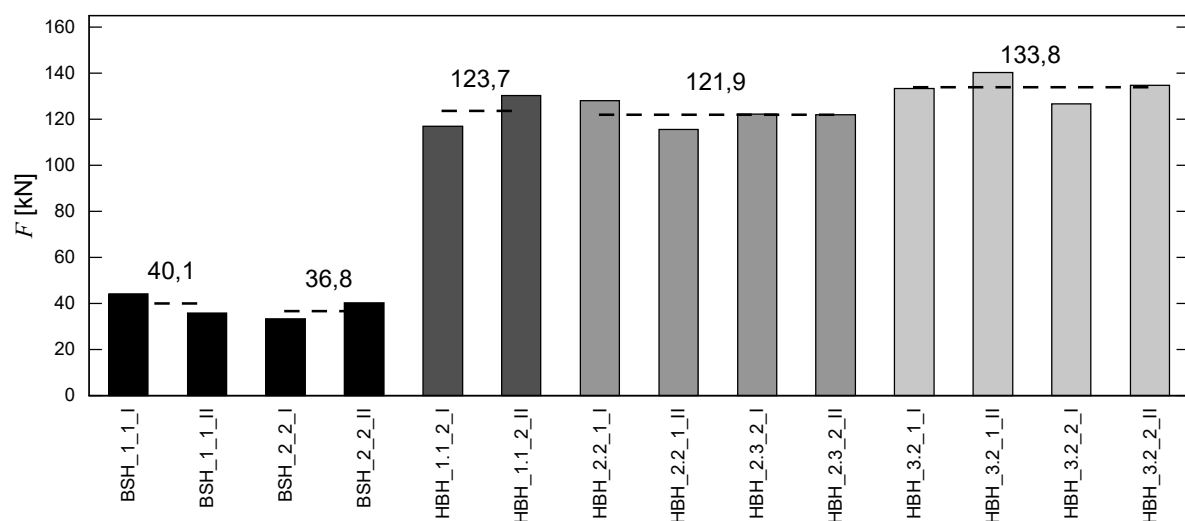


Abbildung 6.27 Vergleich Maximallasten Queranschlüsse in BSH und HBH mit Stabdübel-Schlitzblechanschluss

Nach Franke et al. (2019) und Sandhaas (2012) können die realen Stahlfestigkeiten von der bestellten Festigkeitsklasse abweichen. Die Lieferung höherer Festigkeitsklassen ist gesetzlich erlaubt, da in der Stahlklassifizierung nur Mindest- und keine Höchstfestigkeitsgrenzen festgelegt sind. Zur Sicherstellung eines duktilen Bauteilversagens werden Verbindungen im Holzbau oftmals so ausgelegt, dass sich im Versagensfall die Stahlelemente plastisch verformen und sich somit ein Versagen durch große Verformungen ankündigt. Für die Beurteilung der Versagensarten und der Duktilität des geprüften Queranschlusses in holzbewehrtem Holz wurden deswegen im Nachgang die Stahlgüte der Stabdübel experimentell ermittelt. Die Biegefestigkeit wurde mit einem 3-Punkt-Biegeversuch nach ISO 10984-1:2009-08 bestimmt. Abbildung 6.28 stellt den schematischen Prüfaufbau des 3-Punkt-Biegeversuchs dar.

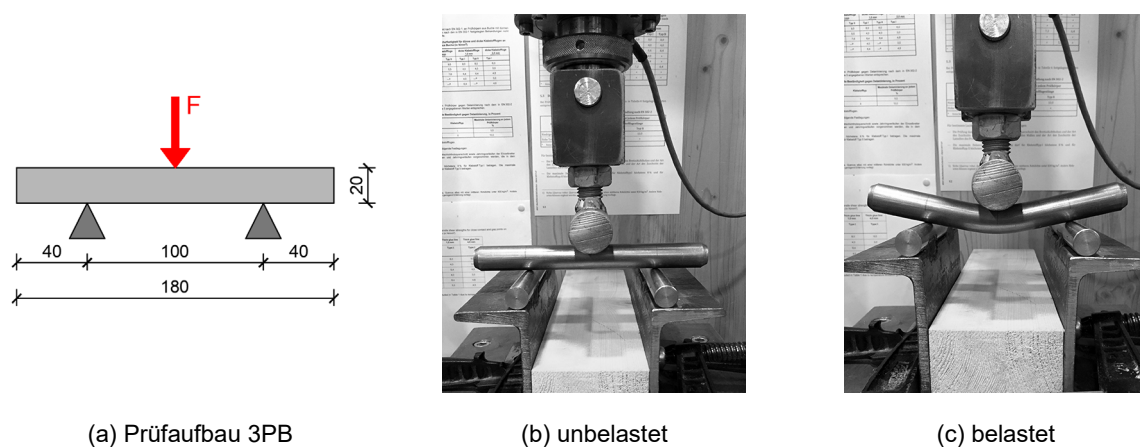


Abbildung 6.28 Bestimmung der Materialeigenschaften der verwendeten Stabdübel

Anhand der Prüfergebnisse wurde das Fließmoment M_y nach ISO 10984-1:2009-08 nach Gleichung (6-1) bestimmt. Die Streckgrenze $f_{y,m}$ wurde nach Gleichung (6-2) berechnet.

$$M_y = \frac{F_y \cdot l}{4} \quad [\text{N/mm}] \quad (6-1)$$

$$f_y = \frac{6 \cdot M_y}{d^3} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (6-2)$$

Die Berechnung der charakteristischen Werte erfolgte nach DIN EN 14358:2016-11. In Abbildung 6.29 sind die Last-Verformungslinien gezeigt, in Tabelle 6.2 die Ergebnisse der Prüfung.

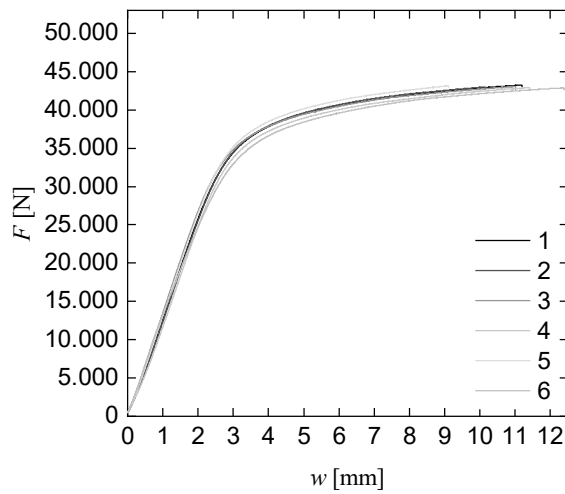


Abbildung 6.29 Ergebnisse Stabdübel

Tabelle 6.2 Versuchsergebnisse Stabdübel

Prüfkörper	Stabdübel	
n	[-]	6
l/d	[mm]	180/20
$M_{y,mean}$	[Nmm]	934.858
$f_{y,mean}$	[N/mm ²]	703
$f_{y,k}$	[N/mm ²]	678
COV	[%]	1,53

Die experimentell ermittelte charakteristische Streckgrenze der Stabdübel ist um 91 % höher als die zu erwartende Streckgrenze von Stabdübeln der Festigkeitsklasse S 355.

7 Verhalten von holzbewehrtem Holz bei Feuchteänderungen (AP5)

7.1 Allgemein

7.1.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Im Oktober 2019 wurden 18 Prüfkörper ($l/b/h = 500/180/400$) in einer Klimakammer des MPA-BAU der TU München platziert (Abbildung 7.1). Je HBH-Serie (1-3) wurden drei Prüfkörper positioniert.



(a) BSH- und HBH-Prüfkörper



(b) Luftentfeuchter

Abbildung 7.1 BSH- und HBH- Prüfkörper in der Klimakammer

Zusätzlich wurden jeweils drei Prüfkörper von zwei weiteren HBH-Serien mit 90° orientierten Furnierlagen (HBH_I_90 und HBH_II_90) und einem Bewehrungsgrad von 10 % eingestellt. Untersucht wurden auch ein BSH-1-Prüfkörper und zwei BSH-2-Prüfkörper (Abbildung 5.1). Die Hirnholzflächen der Prüfkörper wurden mit einem selbstklebenden luftdichten Aluminium Kleband (Stärke 0,1 mm) versiegelt. Die relative Luftfeuchtigkeit (rLF) wurde bei konstanter Raumtemperatur um 5 % pro Monat reduziert, bis ein Niveau von 30 % rLF erreicht war. Wöchentlich wurde die Holzfeuchte der Prüfkörper mit dem Verfahren der Widerstandsmessung in unterschiedlichen Tiefen (15, 25, 40 und 70 mm) bestimmt, die Volumenänderungen wurden gemessen (Abbildung 7.2) (a) und auftretende Risse aufgezeichnet. Diese Vorgehensweise folgt Danzer et al. (2020). Um den Rissfortschritt visuell nachvollziehen zu können wurden die Oberflächen der Prüfkörper wöchentlich fotografiert (Abbildung 7.2) (b).



(a) Messprinzip der Verformungsänderung an eingedrehten Messschrauben

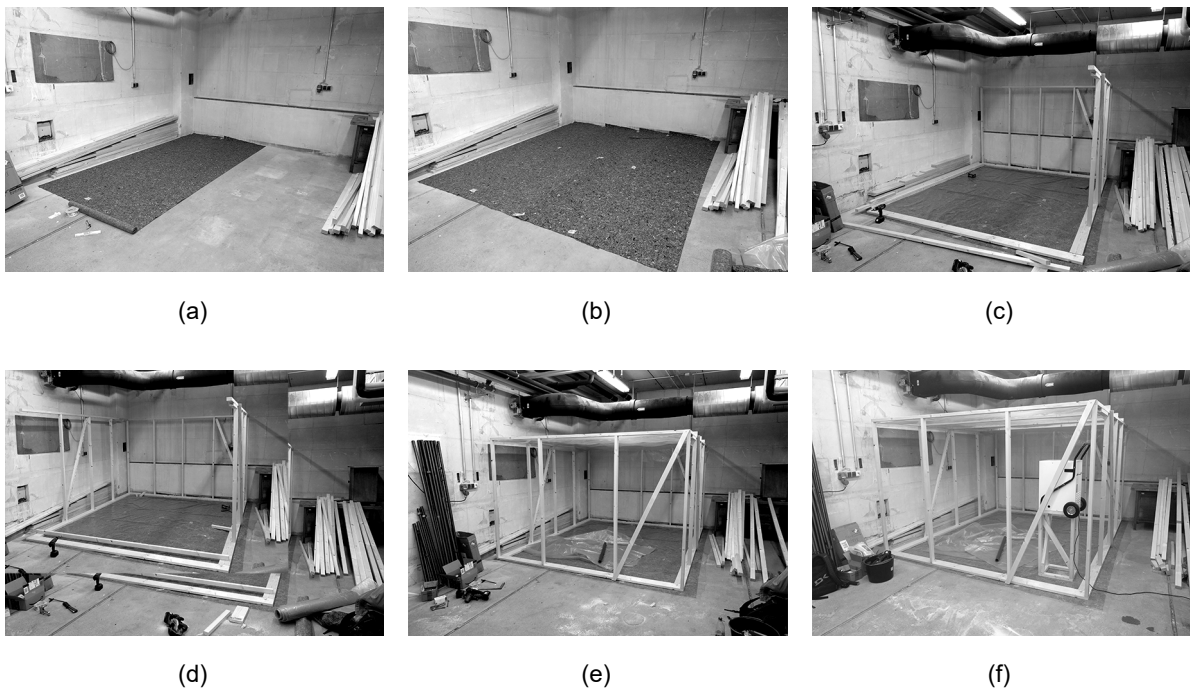
(b) Fotodokumentation

Abbildung 7.2 Messtechnik und Fotohalterung zur Untersuchung der Schwindverformung der BSH- und HBH-Prüfkörper in der Klimakammer

Aufbau und Beginn der experimentellen Untersuchung wurde durch eine vom Verfasser betreute Masterarbeit (Rieder 2019) begleitet.

7.1.2 Herstellung

Für die Durchführung der Klimaversuche wurde eine temporäre Klimakammer gebaut (Abbildung 7.3). Dazu wurde aus einer Konstruktion aus Latten mit einer dampfdichten Polyethylen-Folie (PE-Folie) ein luftdichter Raum erstellt. Der Raum hatte eine lichte Breite von 3,04 m, eine lichte Länge von 3,66 m und eine lichten Höhe von 1,99 m.



(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Abbildung 7.3 Bau der Klimakammer (a-f)

Die Klimakammer wurde in einem konstant auf ca. 22 °C temperierten Raum aufgebaut.

7.1.3 Auswertung und Ergebnisse

Zu Beginn des Klimaversuchs wurde die Holzfeuchte der BSH-Komponenten mittels Einschlaagelektroden in einer Tiefe von ca. 15 mm bestimmt. Der Mittelwert ($u_{\text{mean},15 \text{ mm}}$) der Ausgangsfeuchte der BSH-Komponenten betrug 13,8 % (COV 3,4 %). Anschließend wurden die Prüfkörper in den ersten drei Monaten konditioniert und der Betrieb der Klimakammer optimiert. Danach wurde die relative Luftfeuchtigkeit erstmalig gesenkt (Januar 2020, Abbildung 7.4). Die wöchentlichen Spitzen der Kurven wurden durch das Betreten der Klimakammer verursacht. Der verwendete Luftentfeuchter konnte eine minimale relative Luftfeuchtigkeit von 35 bis 37 % in der Klimakammer erzeugen. Die oberflächennahe Holzfeuchte ($u_{15 \text{ mm}}$) wurde im Mittel in sechs Monaten um ca. $\Delta u_{\text{mean}} = 4,7 \text{ %}$ reduziert. In Abbildung 7.5 sind die Ergebnisse der Holzfeuchtemessungen in den BSH-Komponenten unterschiedlicher Tiefe (15, 25, 40 und 70 mm) zu Beginn des Untersuchungszeitraums im Vergleich zu den Ergebnissen bei Versuchsende abgebildet.

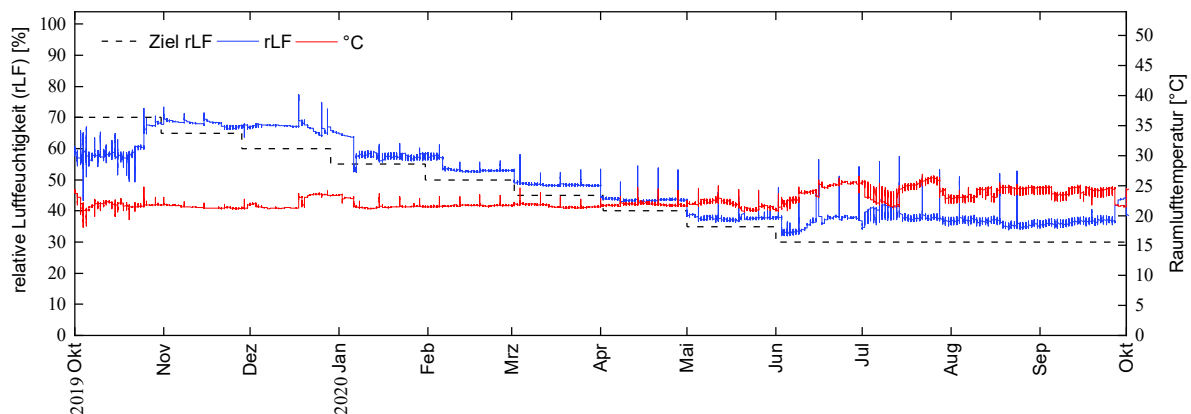


Abbildung 7.4 Verlauf von relativer Feuchte und Temperatur in der Klimakammer

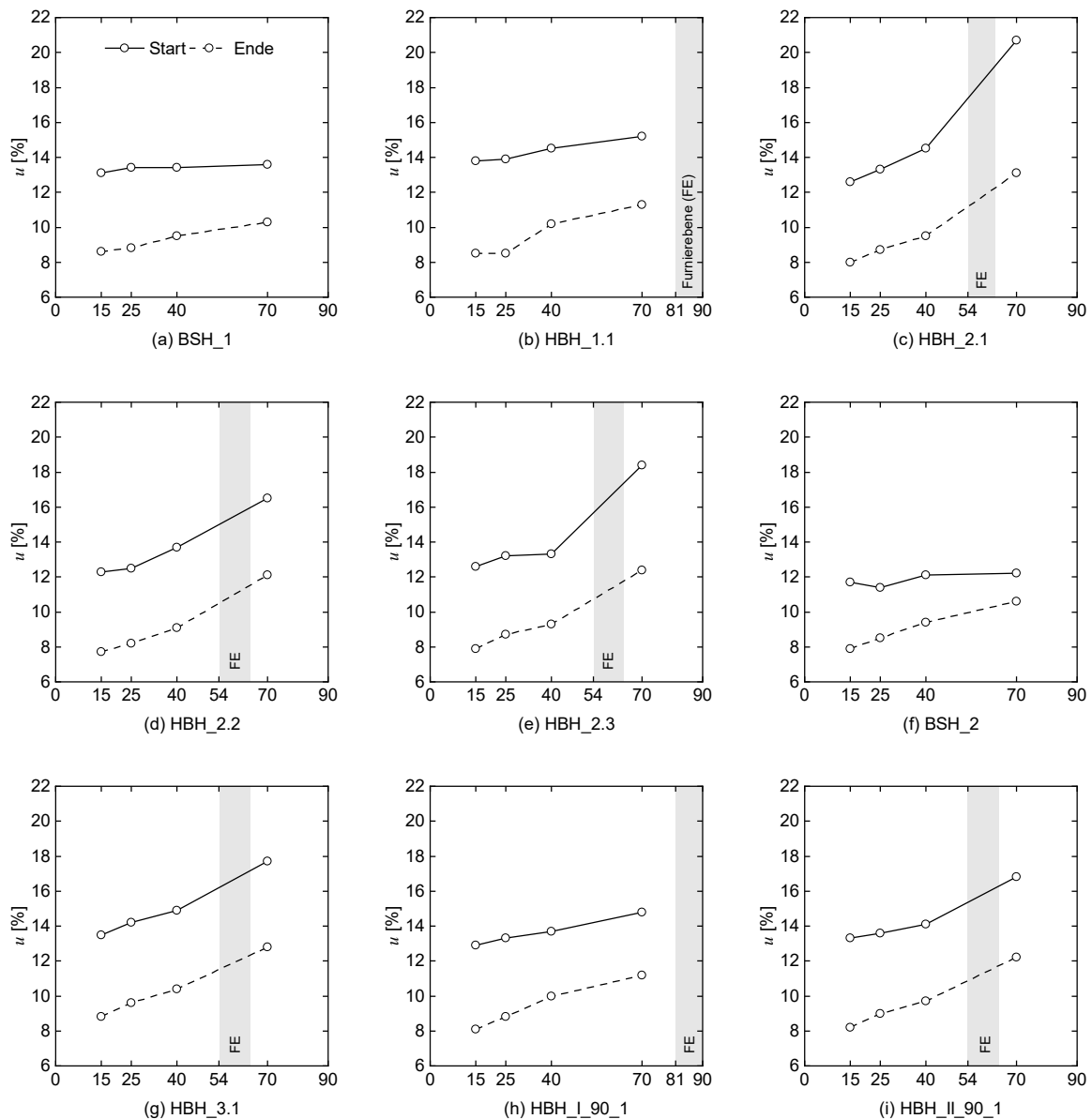


Abbildung 7.5 Vergleich der Holzfeuchte in unterschiedlichen Tiefen der BSH und HBH Prüfkörpern zu Beginn und am Ende des Untersuchungszeitraums, gemessen mit dem elektronischen Widerstandsverfahren, die Lage der Furnierebene ist grau gekennzeichnet.

Bei den BSH- und HBH-Prüfkörpern mit nur einer Furnierebene verläuft die Gradienten der interpolierten Messstellen wesentlich flacher als bei den HBH-Prüfkörpern mit zwei Furnierebenen. Ein Einfluss auf das Austrocknungsverhalten in Abhängigkeit der Anzahl der Furnierebenen zeichnet sich ab (Abbildung 7.5). Der Austrocknungsprozess der mittleren BSH-Komponente bei HBH-Prüfkörpern mit zwei Furnierebenen wurde durch die Furnierebenen verzögert. Ein Einfluss des verzögerten Trocknungsverhaltens auf die Rissbildung war nicht feststellbar.

Die initiale Querszugrissbildung entsteht maßgeblich durch die Holzfeuchtedifferenz im oberflächennahen Bereich. Für die ausgewählten Prüfkörper mit Messelektroden wurde die Holzfeuchtedifferenz bei Erstrissbildung in einer Tiefe von 15 mm ermittelt (Tabelle 7.1).

Tabelle 7.1 Erstrissbildung der BSH und HBH Prüfkörper in Abhängigkeit der Holzfeuchteänderung sowie Darstellung der maximalen Risstiefen bei Versuchsende

Prüfkörper	$\Delta u_{15\text{mm}}$ [%]	max. Risstiefe [mm]	Durchriss über PK Länge [-]
BSH_1	3,6	2	nein
HBH_1.1	1,8	22	nein
HBH_2.1	3,6	19	ja
HBH_2.2	2,0	3	nein
HBH_2.3	3,3	19	nein
BSH_3	2,5	20	nein
HBH_3.1	2,4	52	ja
HBH_I_90_1	3,0	78	ja
HBH_II_90_1	2,2	37	ja

Die initiale Rissbildung entstand oftmals im Bereich von Ästen und Klebefugen, an den Rändern der eingedrehten Messschrauben, durch die Löcher der Einschlagelektroden und bei Faserabweichungen der BSH-Lamellen zur Klebefuge (Abbildung 7.6) (a-c).

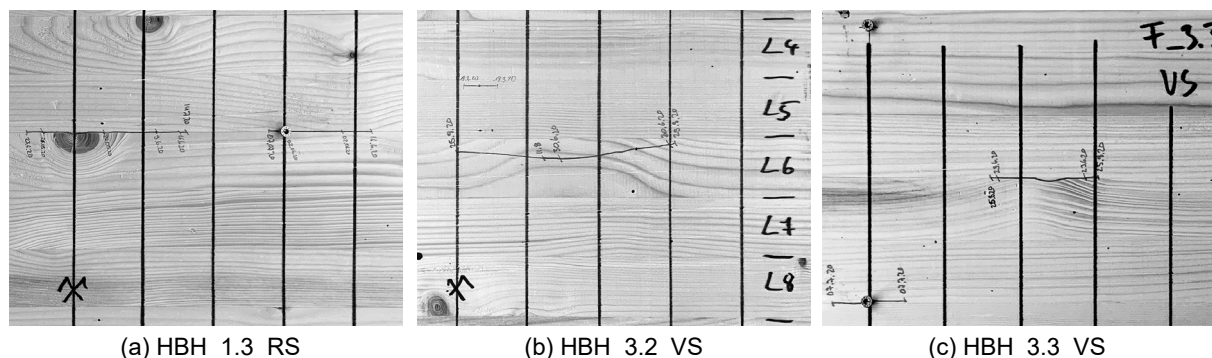


Abbildung 7.6 Typische Bereiche der Erstrissbildung in den BSH Komponenten der HBH Prüfkörpern

Die BSH-Prüfkörper zeigten die geringsten Querszugrisse, gefolgt von HBH-Serie 1. Keiner der drei Prüfkörper der HBH-Serie 1 zeigte einen Durchriss über die gesamte Prüfkörperlänge ($l = 500 \text{ mm}$). Die Risslängen betrugen bis zu 300 mm bei einer maximalen Tiefe von bis zu 30 mm. Im Gegensatz dazu zeigte einer der HBH-Prüfkörper der Serie 2 einen Durchriss. Die restlichen Prüfkörper zeigten eine verstreute Rissentwicklung mit maximalen Risslängen von 40 bis 210 mm und Risstiefen von bis zu 19 mm. Bei zwei HBH-Prüfkörpern der Serie 3 erfolgte ebenfalls ein Durchriss. Die maximalen Risstiefen betrugen bis zu 52 mm. In den BSH-Komponenten der HBH-Prüfkörper mit einer 90° orientierten Furnierlage entstanden bei allen drei Prüfkörpern Durchrisse über die Prüfkörperlänge mit einer Tiefe von bis zu 78 mm. Einer der Prüfkörper mit zwei Furnierebenen und 90° Orientierung hatte einen Durchriss, die restlichen zwei Prüfkörper zeigten Risse mit einer Länge von 350 und 400 mm bei einer Tiefe von 30 und 38 mm. In Abbildung 7.7 sind Rissbilder der Prüfkörper bei Versuchsende gezeigt.

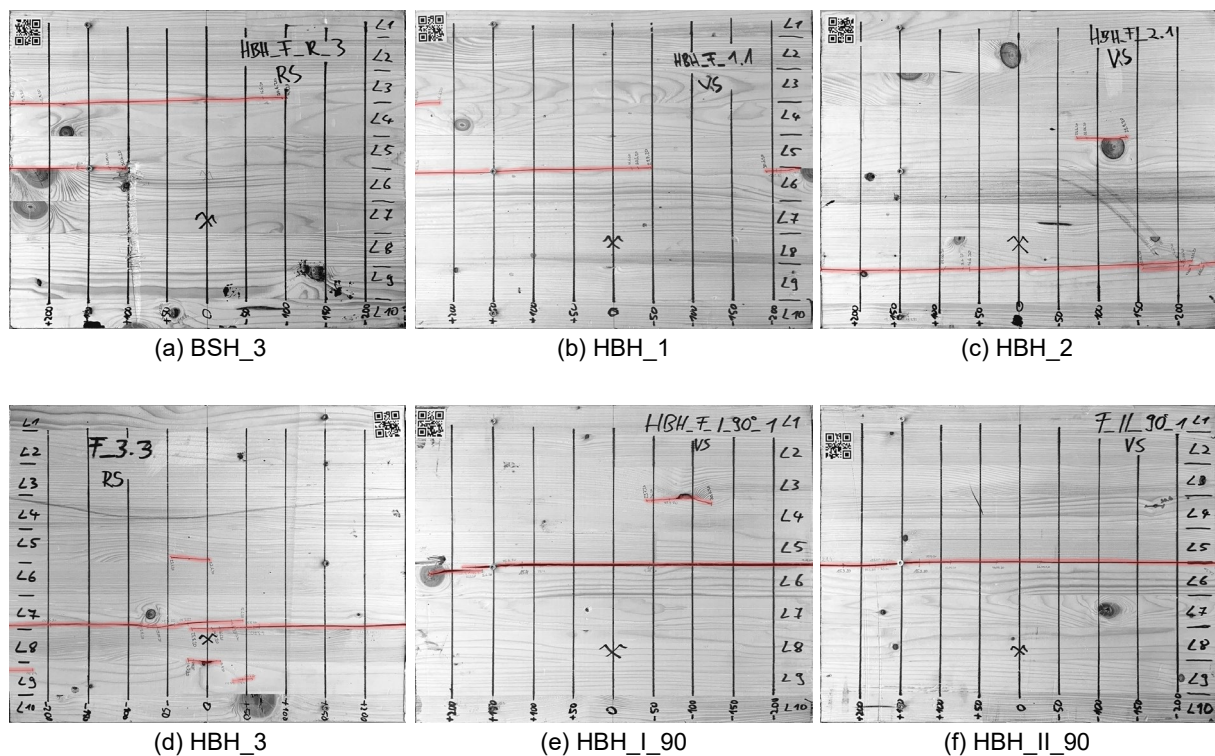


Abbildung 7.7 Rissbildung der BSH-Komponenten der HBH-Prüfkörper bei Versuchsende

Es zeichnet sich ab, dass der Neigungswinkel der Furnierlagen auf die Rissbildung der BSH-Komponenten einen wesentlichen Einfluss hat (Sperreffekt). Nach der Erstrissbildung auf einer Prüfkörperseitenfläche wurde die gegenüberliegende Prüfkörperfläche entlastet, sodass meist nur auf einer Seitenfläche tiefe Risse entstanden. Allgemein wurde ein sehr starker Einfluss der Rissbildung durch Äste und die dadurch verursachten Faserabweichungen der Lamellen im Bereich der Klebefugen festgestellt.

8 Rechen- und Bemessungsmodelle für holzbewehrtes Holz (AP6)

8.1 Konstruktionsempfehlungen

Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen können die folgenden Konstruktionsempfehlungen für holzbewehrtes Holz gemacht werden. In Abhängigkeit der Schubsteifigkeit der Furnierebene wird die Querkraft anteilig von der Furnierebene und den BSH-Komponenten abgetragen. Die Schubsteifigkeit der Furnierebene sollte mindestens 50 % der Schubsteifigkeit der BSH-Komponenten betragen (Lechner 2019). Die Breite der BSH-Komponenten (b_1) sollte nach aktuellem Kenntnisstand auf 100 mm begrenzt werden. Bei einer gegenläufigen Anordnung der Furnierlagen unter $\pm 45^\circ$ hat sich ein Mindestbewehrungsgrad von 10 % als geeignet herausgestellt. Die Furnierlagen der Furnierebene können auch aus anderen Holzarten außer Buche gefertigt werden. Der E-Modul längs zur Faser ($E_{0,FL}$) sollte dabei mindestens 10.000 N/mm² betragen. In Abbildung 8.1 sind erzielbare Schubsteifigkeiten einer gegenläufigen Furnierebene in Abhängigkeit der Neigung der Furnierlagen für Buchenschäl furniere abgebildet (Lechner 2019).

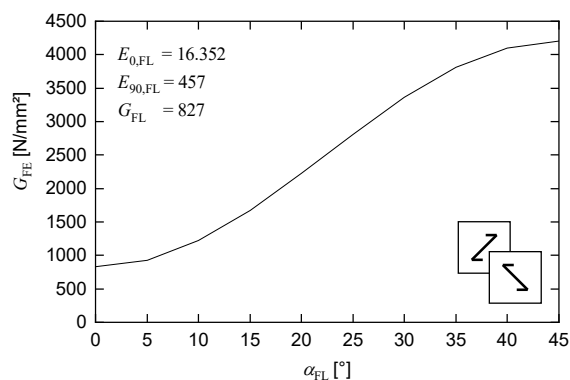


Abbildung 8.1 Mit Buchenfurnieren erzielbare Schubsteifigkeiten der Furnierebene bei einer gegenläufigen Anordnung für variierende Neigungswinkel der Furnierlagen, Steifigkeitskennwerte in N/mm² (Lechner 2019)

Die Lasteinleitung quer zur Stablängsachse sollte möglichst direkt in die Furnierebenen erfolgen. Die Holzfeuchte der BSH-Komponenten bei der Produktion sollte maximal um 3 % höher liegen als die zu erwartende Ausgleichsfeuchte der späteren Nutzung.

8.2 Numerisches Berechnungsmodell

Die Prüfkörper der Biegeversuche wurden numerisch abgebildet. Dazu wurde ein Volumenmodell mit einem linear-elastischen orthotropen Materialmodell erstellt, analog zu Kapitel 3. Die Steifigkeiten der Furnierlagen wurden proportional zu dem in Kapitel 4 ermittelten Elastizitätsmodul ($E_{0,F}$) für einen vierlagigen, PRF-verklebten Aufbau auf Basis der Zulassung (Z-9.1-838) angepasst. Tabelle 8.1 zeigt die für die Simulation angesetzten Steifigkeiten.

Tabelle 8.1 Steifigkeitskennwerte für die numerische Simulation

Komponente	E_x	E_y	E_z	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}	G_{xy}	G_{yz}	G_{xz}
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
BSH, GL28h	12.600	300	300	0,016	0,33	0,016	650	65	650
Furnierlage, PRF-verklebt	16.352	457	457	0,016	0,33	0,016	827	419	827

Für die Berechnung der Biegezugspannung wurden die Querschnittsabmessungen jedes Prüfkörpers aufgenommen und im FEM-Modell abgebildet. Der Vergleich der geprüften Biegefestigkeiten ($f_{m,netto}$) mit den berechneten Biegezugspannungen ($\sigma_{m,FEM}$) bei Simulation mit zugehöriger Maximallast zeigt eine sehr gute Übereinstimmung (Abbildung 8.2).

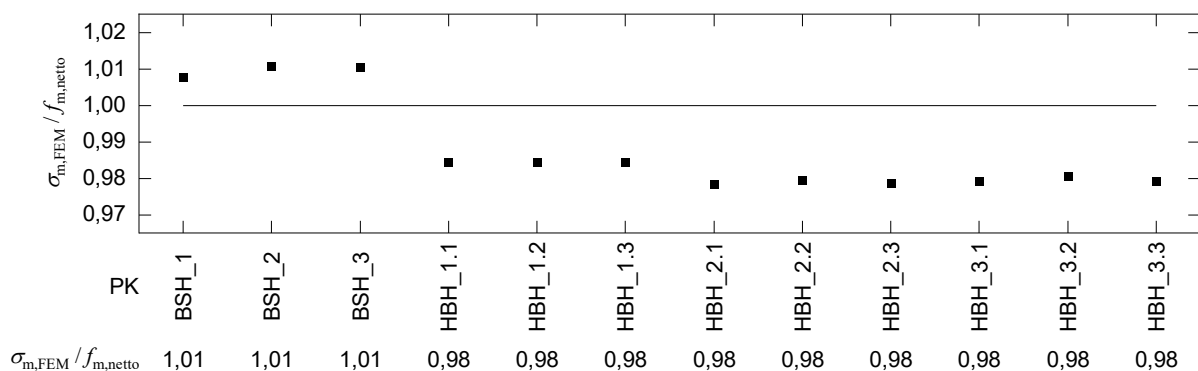


Abbildung 8.2 Vergleich der ermittelten Biegefestigkeiten ($f_{m,netto}$) mit den berechneten Biegespannungen ($\sigma_{m,FEM}$) aus dem FEM-Modell

Die berechneten Biegezugspannungen der BSH- und HBH-Prüfkörper haben eine Abweichung von maximal 2 %. Der Vergleich der Durchbiegung in Feldmitte (w_{gl}) des numerischen Modells mit den gemessenen Verformungen zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung (Abbildung 8.3). Dabei wurden die Querschnittsabmessungen im FEM-Modell von BSH- und je HBH-Serie jeweils aus den Mittelwerten der geprüften Prüfkörper angesetzt.

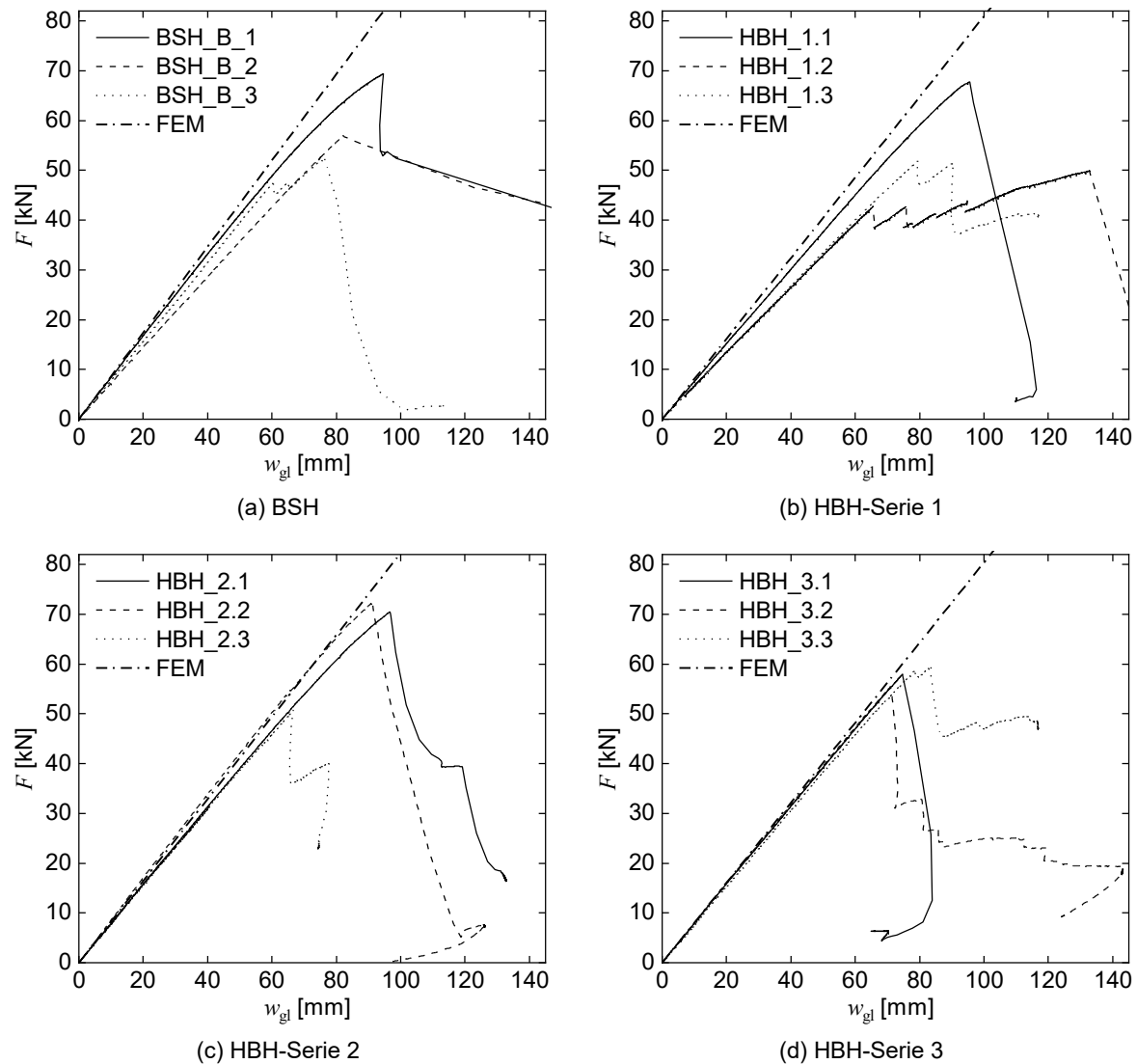


Abbildung 8.3 (a-d) Vergleich der Durchbiegung in Feldmitte (w_{gl}) der FEM-Berechnung mit den gemessenen Verformungen aus den Versuchen für BSH und die HBH Serien 1 bis 3

Die Prüfkörper der 3PB- und 4PB-Versuche wurden ebenfalls analog den Biegeversuchen numerisch abgebildet. Die angesetzten Steifigkeiten des Simulationsmodells sind in Tabelle 8.2 zusammengestellt.

Tabelle 8.2 Steifigkeitskennwerte für die numerische Simulation

Komponenten	E_x	E_y	E_z	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}	G_{xy}	G_{yz}	G_{xz}
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
BSH - GL28h	12.600	300	300	0,016	0,33	0,016	650	65	650
Furnierlage, 4 × 1,5 mm (PRF verklebt)	16.352	457	457	0,016	0,33	0,016	827	419	827
FSH aus Buche	15.142	424	424	0,016	0,33	0,016	766	388	766

Die als Querdruckverstärkungen verwendeten Vollgewindeschrauben wurden im Volumenmodell vollständig abgebildet. Anders (2008) entwickelte ein Verfahren, um den nachgiebigen

Verbund zwischen der VG-Schraube und dem Holz linear berechnen zu können. Dafür wird eine zylindrische bzw. röhrenartige Schicht, deren Innenradius dem Kerndurchmesser und deren Außenradius dem Gewindedurchmesser entspricht, modelliert (Abbildung 8.4).

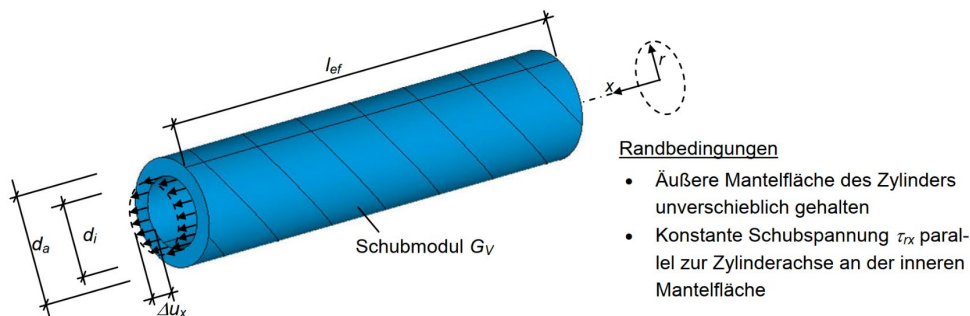


Abbildung 8.4 Modellbildung von VG-Schrauben, Verbundschicht – geometrische Zusammenhänge (Mestek 2011)

Die Relativverschiebung (nachgiebiger Verbund) zwischen Schraube und dem umschließenden Holzquerschnitt wird dadurch wesentlich vom Schubmodul der Verbundschicht beeinflusst. Unter Annahme einer reinen Schubverformung des Zylinders von Schraube und Verbundschicht kann nach Gleichung (8-1) die Relativverschiebung Δu_x zwischen den Mantelflächen berechnet werden.

$$\Delta u_x = \frac{\tau_{rx}}{G_v} \cdot \frac{d_i}{2} \cdot \ln \left(\frac{d_a}{d_i} \right) \quad [\text{mm}] \quad (8-1)$$

Unter der Voraussetzung, dass die Relativverschiebung der Schraube zur Holzoberfläche durch die Verformung der Verbundschicht entsteht, kann der Schubmodul G_v der Verbundschicht nach Gleichung (8-2) ermittelt werden.

$$G_v = \frac{K_{ax}}{2 \cdot \pi \cdot l_{ef}} \cdot \ln \left(\frac{d_a}{d_i} \right) = \frac{k_{ax}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{d_a}{d_i} \right) \quad [\text{mm}] \quad (8-2)$$

Der Verschiebungsmodul (K_{ax}) wurde in mehreren experimentellen Untersuchungen ermittelt. In Tabelle 8.3 ist eine Auswertung der Ansätze der zugehörigen Veröffentlichungen für die Berechnung des Verschiebungsmoduls der verwendeten VG-Schrauben ($d_a = 12,0 \text{ mm}$, $d_i = 7,5 \text{ mm}$, und $\rho_k = 450 \text{ kg/m}^3$) gezeigt.

Tabelle 8.3 Vergleich der Ansätze zur Berechnung des Verschiebungsmoduls und daraus resultierend das Schubmodul der Verbundschicht

Ansätze	l_{ef} [mm]	K_{ax} [N/mm]	k_{ax} [N/mm ²]	G_v [N/mm ²]
Blaß 2006	400	14.339	35,8	2,7
Mestek 2011	400	57.356	143,4	10,7
Danzer 2017	400	65.016	162,5	12,2
Blaß, Steige 2018 (Gl. 33)	400	90.200	225,5	16,9
Blaß, Steige 2018 (Gl. 34)	400	79.007	197,5	14,8
Spax ETA 12/0114	400	120.000	300,0	22,4

Für die Modellierung der Verbundschicht wurde ein einheitliches Schubmodul (G_v) von 20 N/mm² angesetzt.

Durch den hohen Schubmodul der Furnierebene werden im ungestörten Trägerbereich planmäßig Querkräfte durch die Furnierebene abgetragen. Die Höhe der anteiligen Querkkräfte der HBH-Komponenten ist dabei abhängig vom Verhältnis der Schubmodule der Furnierebene (G_{FE}) und der BSH-Komponente (G_{BSH}):

$$n = \frac{G_{FE}}{G_{BSH}} \quad [-] \quad (8-3)$$

Die Querkraftanteile in der BSH-Komponente und der Furnierebene können nach Gleichung (8-4) und (8-5) (Lechner 2019) bestimmt werden.

$$V_{BSH} = V \frac{b_{BSH}}{b_{BSH} + n \cdot t_{FE}} \quad [N] \quad (8-4)$$

$$V_{FE} = V \frac{n \cdot t_{FE}}{b_{BSH} + n \cdot t_{FE}} \quad [N] \quad (8-5)$$

Mittels der FEM-Volumenmodelle wurden für jeden Prüfkörper bei Bruchlast die maximalen Schubspannungen der BSH-Komponenten und der Furnierlagen im Bereich der maximalen Querkräfte ermittelt und mit den analytisch berechneten Spannungen verglichen (Abbildung 8.5).

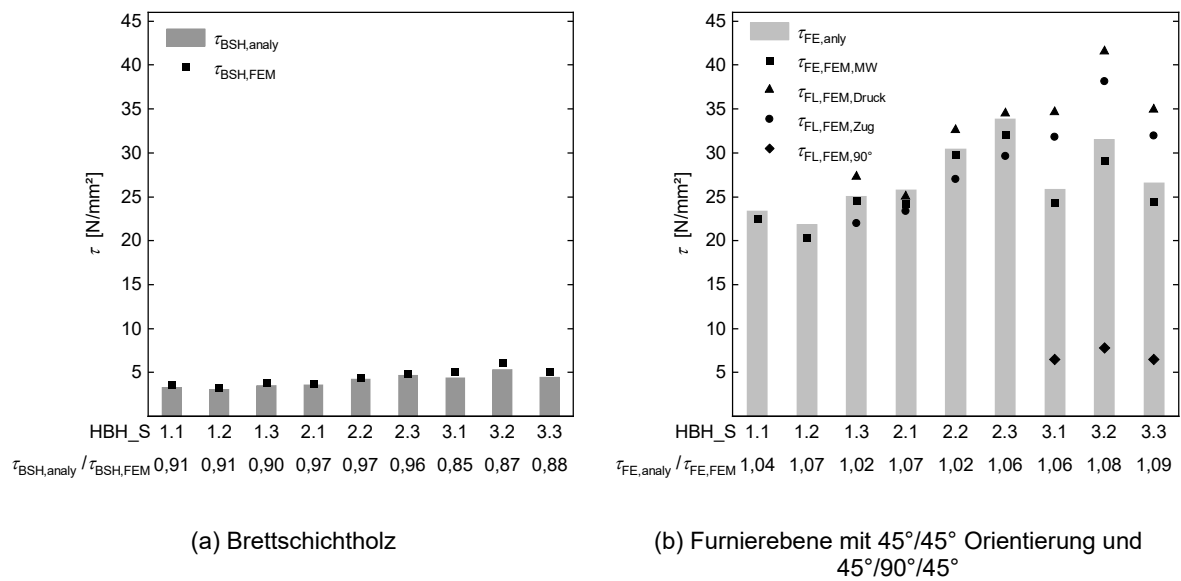


Abbildung 8.5 Numerisch und analytisch berechnete Schubspannungen in den BSH-Komponenten und der Furnierebene von HBH (Lechner 2019)

Die analytisch berechneten Schubspannungen in den BSH-Komponenten der HBH-Serie 1 sind ca. 10 %, der HBH-Serie 2 ca. 3 % und der HBH-Serie 3 ca. 13 % niedriger als die numerisch ermittelten Spannungen. Im Vergleich dazu liegen die analytisch berechneten Schubspannungen der Furnierebene über alle HBH-Serien um 2 bis 9 % über den numerischen Ergebnissen. Die beiden Berechnungsansätze zeigen eine gute Übereinstimmung und ergeben plausible Spannungswerte.

Das vorgestellte numerische FEM-Volumenmodell ermöglicht die Berechnung der Biege- und Schubspannungen der HBH-Komponenten. Die Entwicklung eines praxistauglichen und analytischen Berechnungs- und Bemessungsansatz ist Gegenstand weiterer Untersuchungen (Lechner 2019).

9 Zusammenfassung

Holzbewehrtes Holz (HBH) ist ein neuartiges Holzbauprodukt auf Basis von Brettschichtholz aus Fichte und Furnieren aus Buche. Mit HBH wird ein neuer Werkstoff mit deutlich verbesserten Eigenschaften senkrecht zur Faser und in Scherung zur Verfügung stehen. Die Hauptergebnisse, dieses Forschungsvorhabens sind:

- Bei mehreren faserparallel verklebten Furnierschichten steigt die Festigkeit und es ist ein deutlicher Homogenisierungseffekt zu erkennen. Es können Zugfestigkeiten $f_{t,0,k}$ bis zu 100 N/mm² erreicht werden. Die Mittelwerte des Elastizitätsmoduls $E_{0,F}$ liegen auf dem Niveau üblicher Laubholzprodukte (BauBuche).
- Die Biegefestigkeit von HBH wird durch den Bewehrungsgrad $\Sigma t_{FE}/b$ reduziert. Die mittlere Biegesteifigkeit von HBH Serie 2 und 3 liegt etwa auf dem Niveau von BSH.
- Der 3PB-Prüfaufbau ist für die Bestimmung der Schubfestigkeit von HBH nicht geeignet. Mit dem 4PB-Prüfaufbau konnte für einen HBH-Prüfkörper der Serie 3 ein Schubversagen herbeigeführt werden. Die Querkraft konnte im Vergleich zum unbewehrten BSH um 67 % erhöht und der Schubmodul um bis zu 50 % gesteigert werden (HBH Serie 2).
- Die Tragfähigkeit von Ausklinkungen konnte im Vergleich zu unbewehrtem BSH um den Faktor fünf erhöht, bei runden Durchbrüchen verdoppelt und bei Queranschlüssen verdreifacht werden. Holzbewehrtes Holz zeigt bei allen drei Beanspruchungssituationen eine sehr hohe Fähigkeit zur Lastumlagerung. Nach anfänglicher Rissbildung in den BSH-Bauteilen konnten die Lasten weiter gesteigert werden.
- Geneigte Furniere verursachen im Vergleich zu 90° orientierten Furnieren weniger Risse durch Schwindbeanspruchung in den BSH-Komponenten von HBH. Erste Rissbildungen können bei oberflächennahen Holzfeuchteunterschieden von $\Delta u = 2,0 - 3,0$ % auftreten. Äste und die daraus resultierenden Faserablösungen der Lamellen begünstigen eine Initiatorrissbildung im Bereich der Klebstoffugen. Um die Sperrwirkung der Furnierebenen auf die BSH-Komponenten zu reduzieren, sollten kleinere Neigungen der Furniere angestrebt werden. Die Holzfeuchte bei der Herstellung der BSH-Bauteile sollte der zu erwartenden Ausgleichsfeuchte während der Nutzung entsprechen.

Holzbewehrtes Holz erweist sich als effektive Alternative für die Verstärkung von Holzbauteilen mit Geometrien, in denen hohe Schubspannungen und/oder Querkzugspannungen auftreten. Der nächste Schritt ist die Entwicklung eines praxistauglichen Bemessungsmodells und eines wirtschaftlichen Herstellungsverfahrens für HBH.

Mitwirkende

Das Forschungsvorhaben wurde mit finanzieller Unterstützung der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Förderkennzeichen 10.08.18.7-18.21) durchgeführt. Herzlich danken wir den Förderern für die Unterstützung und Hilfe bei der Durchführung der Arbeiten.

Weiter danken wir den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für die finanzielle, materielle, personelle und ideelle Unterstützung des Forschungsvorhabens:

- Schaffitzel Holzindustrie GmbH + Co. KG, Schwäbisch Hall, Jürgen Schaffitzel
- OWI GmbH, Lohr am Main, Matthias Fischer
- Dynea AS, Lillestrøm (Norwegen), Ronny Bredesen, Martin Emmert
- BBI Bauer Beratende Ingenieure GmbH, Landshut, Dr.-Ing. Norbert Burger
- IngPunkt Ingenieurgesellschaft für das Bauwesen, Augsburg, Markus Bernhardt
- Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V., Wuppertal, Dr.-Ing. Tobias Wiegand
- Ulrich Lübbert Warenhandel GmbH und Co. KG, Henstedt-Ulzburg, Ulrich Lübbert

Weiter bedanken wir uns für die materielle Unterstützung des Forschungshabens bei:

- Firma Holzbau PERR GmbH (Abbund Ausklinkungen und runde Durchbrüche), Simon Perr
- SPAX International GmbH & Co.KG (VG-Schrauben), Micha Hochstrate
- Pollmeier Massivholz GmbH & Co. KG (BauBuche), Dr.-Ing. Markus Enders-Comberg

Ihre wertvollen und hilfreichen Beiträge trugen maßgebend zum Erfolg des Projektes bei.

Bei der Durchführung von Bauteilversuchen und deren Auswertung haben die Mitarbeiter des MPA BAU der TU-München sowie die wissenschaftlichen Hilfskräfte Manuel Uphoff und Sebastian Koch des Lehrstuhls für Holzbau und Baukonstruktion tatkräftig und engagiert mitgeholfen. Allen Förderern, Mitarbeitern und den wissenschaftlichen Hilfskräften möchten wir hiermit herzlich danken.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sind mehrere Bachelor- und Masterarbeiten am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion verfasst worden. Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind in diesen Abschlussbericht mit eingeflossen, und haben so zu den Ergebnissen des Projektes beigetragen. Es handelt sich um die folgenden Arbeiten:

Bachelorarbeiten:

Brunner (2019) *Furniere für tragende Zwecke im Holzbau – Stand der Technik*, Bachelorthesis, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München.

Ludwig (2019) *Faserverbundstrukturen, ein Vorbild für den Holzbau?*, Bachelorthesis, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München.

Masterarbeiten:

Wallner (2018) *Holzbewehrtes Holz - Laubholzurniere als Schub- und Querverstärkung für Brettschichtholzträger*, Masterthesis, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München.

Kaps (2019) *Tragfähigkeitsuntersuchungen an holzbewehrtem Holz mit Ausklinkungen*, Masterthesis, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München.

Rieder (2019) *Verhalten von holzbewehrtem Holz bei Feuchteänderung*, Masterthesis, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München.

Rösch (2019) *Tragfähigkeitsuntersuchungen an holzbewehrtem Holz mit Durchbrüchen*, Masterthesis, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München.

Kostner (2020) *Tragfähigkeitsuntersuchungen von Queranschlüssen in holzbewehrtem Holz*, Masterthesis, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München.

Den Verfassern dieser Arbeiten sei an dieser Stelle herzlich für ihre Mitarbeit, vor allem auch für den hohen Einsatz und die engagierte Unterstützung bei der Prüfkörperherstellung, gedankt.



Literaturverzeichnis

Veröffentlichungen

- Aicher, S., Höfflin, L., Reinhardt, H.-W. (2007) Runde Durchbrüche in Biegeträgern aus Brettschichtholz – Teil 2: Tragfähigkeit und Bemessung. Bautechnik 84 (12), 867–880.
- Anders, E. K. (2008) Einzellasten auf Decken aus Brettspertholz – FE-Modellierungen. Diplomarbeit. Technische Universität München.
- Aydin, I., Colak, S., Colakoglu, G., Salih, E. (2004) A comparative study on some physical and mechanical properties of Laminated Veneer Lumber (LVL) produced from Beech (*Fagus orientalis* Lipsky) and Eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis* Dehn.) veneers. Holz als Roh- und Werkstoff 62 (3), 218–220. <https://doi.org/10.1007/s00107-004-0464-3>.
- Basler, K., Mueller, J., Thurlimann, B., Yen, B. (1960) Web buckling tests on welded plate girders. Overall introduction and part 1: the test girders. WRC Bulletin, 64, (September 1960), Reprint No. 165 (60-5)". Fritz Laboratory Reports. Paper 66.
- Bejtka, I. (2011) Cross (CLT) and diagonal (DLT) laminated timber as innovative material for beam elements. Karlsruhe, KIT Scientific Publishing.
- Blaß, H. J., Frese, M. (2010) Schadensanalyse von Hallentragwerken aus Holz. Karlsruhe, KIT Scientific Publishing.
- Brandner, R., Gattering, W., Schickhofer, G. (2012) Determination of Shear Strength of Structural and Glued Laminated Timber Växjö, Sweden, Conference: International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 - Timber Structures, 2012.
- Buchelt, B., Wagenführ, A. (2008) The mechanical behaviour of veneer subjected to bending and tensile loads. European Journal of Wood and Wood Products 66 (4), 289–294. <https://doi.org/10.1007/s00107-008-0235-7>.
- Buddenberg, H. (2015) Steigerung der Holzausbeute und Qualität von Buchenschäl furnieren für die Herstellung von Furnierspertholz. Vortrag. Technische Universität München.
- Danzer, M., Dietsch, P., Winter, S. (2020) Shrinkage behaviour of reinforced glulam, Proceedings of INTER – Meeting, 2020.
- Dietsch, P. (2012) Einsatz und Berechnung von Schubverstärkungen für Brettschichtholzbauteile. Dissertation. Technische Universität München.
- Dietsch, P., Winter, S. (2018) Structural failure in large-span timber structures. A comprehensive analysis of 230 cases. Structural Safety 71, 41–46.
- Dröscher, J., Schickhofer, G., Augustin, M. (2016) Prüftechnische Untersuchungen unterschiedlicher Verstärkungsmethoden für BSH- und BSP-Träger mit großen runden Durchbrüchen. Institut für Holzbau und Holztechnologie TU Graz, holz.bau forschungs gmbh.

- Dunky, M., Niemz, P. (2002) Holzwerkstoffe und Leime. Technologie und Einflussfaktoren. Berlin, Springer.
- Ehrhart, T. (2014) Materialbezogene Einflussparameter auf die Rollschubeigenschaften in Hinblick auf Brettspertholz. Masterarbeit. Technische Universität Graz.
- Ehrhart, T. (2019) European Beech Glued Laminated Timber. Dissertation. ETH Zurich. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000402805>.
- Flaig, M. (2013) Biegeträger aus Brettspertholz bei Beanspruchung in Plattenebene. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie.
- Flemming, M., Roth, S. (2003) Faserverbundbauweisen Eigenschaften. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- Franke, S., Franke, B., Heubuch, S., Frangi, A., Jockwer, R. (2019) Anschlüsse in Buchenholz. Ermittlung von Grundlagen zur Bemessung von Anschlüssen für die Marktimplementierung in der Schweiz. Berner Fachhochschule. Bern.
- Gehri, E. (2010) Shear problems in timber engineering - analysis and solutions. Proceedings of the 11th world conference on timber engineering WCTE, pp 20–24, 2010.
- Hearmon, R. F. S. (1966) Theory of the vibration testing of Wood. Forest Products Journal Volume 16 (Issue 8), pp. 29-40.
- Hirschmann, B. (2011) Ein Beitrag zur Bestimmung der Scheibenschubfestigkeit von Brettspertholz. Institut für Holzbau und Holztechnologie. Technische Universität Graz. Masterarbeit.
- Hollinsky, K. (1985) Querkzugbelastbarkeitserhöhung von Brettschichtholz mit in Reaktionsharz eingeleimten glasfaserverstärkten Polyesterstäben. Dissertation. Wien, Technische Universität Wien.
- Jockwer, R. (2014) Structural behaviour of glued laminated timber beams with unreinforced and reinforced notches. Dissertation. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH Zürich).
- Kollmann, F. F. P., Kuenzi, E. W., Stamm, A. J. (1975) Principles of wood science and technology. Milton Keynes UK/Berlin/Heidelberg/New York, Lightning Source UK Ltd; Springer-Verlag.
- Koronev, B. G., Rabinovic, I. M. (1980) Baudynamik. (Übersetzung aus dem Russischen von W.O. Beyer). Berlin, VEB-Verlag für Bauwesen.
- Lechner, M. (2019) Holzbewehrtes Holz. Entwicklung eines furnierverstärkten stabförmigen Holzprodukts für tragende Zwecke. Dissertationsvorhaben, Status: laufend. Technische Universität München.
- Martínez-Martínez, J. E., Alonso-Martínez, M., Rabanal, F. P. Á., Del Díaz, J. J. C. (2018) Finite Element Analysis of Composite Laminated Timber (CLT). Proceedings 2 (23), 1454. <https://doi.org/10.3390/proceedings2231454>.

- Mestek, P. (2011) Punktgestützte Flächentragwerke aus Brettsperrholz (BSP) – Schubmessung unter Berücksichtigung von Schubverstärkungen. München, Technische Universität München, Diss., 2011. München, Universitätsbibliothek der TU München.
- Niemz, P., Sonderegger, W. U. (2017) Holzphysik. Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. München, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.
- Pollmeier, R. (2014) Produktion und Weiterverarbeitung von Buchen-Furnierschichtholz. Garmisch, 20. Internationales Holzbau-Forum 2014, 2014.
- Sandhaas, C. (2012) Mechanical behaviour of timber joints with slotted-in steel plates. Dissertation.
- Schickhofer, G. (2001) Determination of Shear Strength Values for GLT using Visual and Maschine Graded Spruce Laminations Venezia, Italy, Conference: International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 - Timber Structures, 2001.
- Schickhofer, G., Obermayr, B. (1998) Development of an optimised test configuration to determine shear strength of glued laminated timber Savonlinna, Finnland, Conference: International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 - Timber Structures, 1998.
- Schürmann, H. (2007) Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Staudacher, R. (2015) Ausgewählte mechanische Eigenschaften von Furnier der Holzarten Fichte, Birke und Buche. Masterthesis. Technische Universität Graz.
- Trummer, A. (2002) Verstärkung von Brettschichtholz durch schräg zur Faserrichtung aufgeklebte Glasfasergewebe. Experimentelle und rechnerische Untersuchung. Dissertation. Universität für Bodenkultur Wien.
- Trummer, A., Bergmeister, K., Kernbichler, K. (2004) Verstärkung konstruktiver Details von Brettschichtholzträgern mit Glasfasergewebe. Bautechnik 81 (3), 163-171.
- Zeppenfeld, G., Grunwald, D. (2005) Klebstoffe in der Holz- und Möbelindustrie. 2. Aufl. Leinfelden-Echterdingen, DRW-Verl. Weinbrenner.

Normen und Zulassungen

- DIN 16945:1989-03 Reaktionsharze, Reaktionsmittel und Reaktionsharzmassen; Prüfverfahren, 1989. Berlin.
- DIN 68330:2016-06 Furniere – Begriffe, 2016. Berlin.
- DIN EN 14080:2013-09 Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen, 2013. Berlin.
- DIN EN 14358:2016-11 Holzbauwerke – Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte, 2016. Berlin.

- DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08 Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau, 2013. Berlin.
- DIN EN 26891:1991-07 Holzbauwerke; Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln; Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens (ISO_6891:1983), 1991. Berlin.
- DIN EN 301:2018-01 Klebstoffe, Phenoplaste und Aminoplaste, für tragende Holzbauteile – Klassifizierung und Leistungsanforderungen, 2018. Berlin.
- DIN EN 302-2:2017-11 Klebstoffe für tragende Holzbauteile – Prüfverfahren – Teil 2: Bestimmung der Delaminierungsbeständigkeit, 2017. Berlin.
- DIN EN 408:2012-10 Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften, 2012. Berlin.
- EN 13183-1:2012 Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz, Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren, 2012. Berlin.
- ISO 10984-1:2009-08 Holzbauwerke – Stiff förmige Verbindungsmittel – Teil 1: Bestimmung des Fließmoments, 2009.
- JCSS (2006) JOINT COMMITTEE ON STRUCTURAL SAFETY: JCSS probabilistic model code – Part 3: resistance models – 3.5 properties of timber. 2006.
- Z.9.1-1.840 Herstellung tragender Holzbauteile und Verklebungen von Verbindungen mit dicker Klebstoff fugendicke unter Verwendung des Phenol-Resorcinharz-Klebstoffs Prefere 4094 mit dem Härter Prefere 5827, 2019.
- Z-9.1-679 BS-Holz aus Buche und BS-Holz Buche-Hybridträger, 2019.
- Z-9.1-838 Furnierschichtholz aus Buche zur Ausbildung stabförmiger und flächiger Tragwerke, 2018.

Vom Verfasser betreute Bachelor- und Masterarbeiten

- Brunner, S. (2019) Furniere für tragende Zwecke im Holzbau – Stand der Technik. Bachelorthesis. Technische Universität München.
- Kaps, C. (2019) Tragfähigkeitsuntersuchungen an holzbewehrtem Holz mit Ausklinkungen. Masterthesis. Technische Universität München.
- Kostner, M. (2020) Tragfähigkeitsuntersuchungen von Queranschlüssen in holzbewehrtem Holz. Masterthesis. Technische Universität München.
- Ludwig, Q. (2019) Faserverbundstrukturen, ein Vorbild für den Holzbau? Bachelorthesis. Technische Universität München.
- Rieder, G. (2019) Verhalten von holzbewehrtem Holz bei Feuchteänderung. Masterthesis. Technische Universität München.
- Rösch, M. (2019) Tragfähigkeitsuntersuchungen an holzbewehrtem Holz mit Durchbrüchen. Masterthesis. Technische Universität München.

Wallner, J. (2018) Holzbewehrtes Holz. Laubholzfurniere als Schub- und Querverstärkung für Brettschichtholzträger. Masterthesis. Technische Universität München.

Sonstiges

Fritz Becker GmbH & Co. KG (2017). Online verfügbar unter www.becker-brakel.de (abgerufen am 12.10.2017).

Fritz Kohl GmbH & Co. KG (2017). Online verfügbar unter www.fritz-kohl.de (abgerufen am 29.09.2017).

Initiative Furnier + Natur e.V. (2017). Online verfügbar unter www.furnier.de (abgerufen am 29.09.2017).

Quicker, P. (2016) Carbonfasern. RWTH Aachen. www.itad.de.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1	Aufbau von holzbewehrtem Holz am Beispiel einer innenliegenden Furnierebene mit zwei gegenläufigen Furnierlagen	10
Abbildung 1.2	Definition Neigungswinkel (α_{FL}) einer Furnierlage von -90° bis $+90^\circ$	11
Abbildung 1.3	Anordnungsmöglichkeit von Furnierebenen (FE) für holzbewehrtes Holz	12
Abbildung 1.4	Bezeichnungen HBH Querschnitt	13
Abbildung 1.5	Übersicht der Untersuchungsmethodik und Arbeitspakete	14
Abbildung 2.1	Verfahren zur Furnierherstellung, (Wallner 2018) nach (Pollmeier 2014) und (Fritz Kohl GmbH & Co. KG 2017)	15
Abbildung 2.2	Herstellungsarten von Messer- und Schäl furnieren und deren Ergebnisse, (Wallner 2018) nach (Fritz Kohl GmbH & Co. KG 2017)	17
Abbildung 2.3	Herstellungsprozess von Furnieren - Zuschnitt der Stämme; Entrinden der Stämme; Lagerung unter Wasserbeaufschlagung; Kochen/Dämpfen; Rundschälen; Trocknen/Sortieren (Initiative Furnier + Natur e.V. 2017), (Fritz Becker GmbH & Co. KG 2017)	18
Abbildung 2.4	Fasern, Matrix und Schlichte (Quicker 2016)	21
Abbildung 2.5	Schematische Darstellung der Kettenstruktur von Polymeren, a) linearer amorpher Thermoplast, b) linearer teilkristalliner Thermoplast, c) chemisch vernetzter Elastomer, d) chemisch vernetzter Duroplast (Schürmann 2007)	23
Abbildung 2.6	Vergleich einer Steifigkeitsmatrix rhombische Anisotropie (links) mit einer Steifigkeitsmatrix transversale Isotropie (rechts) (Drechsler und Hartmann 2018)	25
Abbildung 3.1	FEM-Aufbau zur Untersuchung des Einflusses der Furniere auf die Zugspannungen senkrecht zur Faser im Brettschichtholz, Auswertepunkt auf der Brettschichtholzoberfläche (roter Punkt), Darstellung Querschnitt	28
Abbildung 3.2	Einfluss des Furnierwinkels und der Furnierdicke auf die Zugspannungen senkrecht zur Faser in den BSH-Komponenten von HBH mit einer Furnierebene	28
Abbildung 3.3	Einfluss des Neigungswinkels des Neigungswinkels der Furnierlagen auf die Biege- und Schubspannungen in der BSH-Komponenten von HBH	29
Abbildung 4.1	Versuchsaufbau der Zugversuche der Buchenfurniere, Abmessungen in mm	31
Abbildung 4.2	Bruchbilder der Zugversuche von IV lagig faserparallel verklebten Furnierlagen	32
Abbildung 4.3	Zugfestigkeit parallel zur Faser (f_t , 0, FL) mehrlagig faserparallel verklebter Buchenfurniere, 05ND und 05LND sind die 5 %-Quantile von Normal- und Lognormalverteilungen	33
Abbildung 4.4	Elastizitätsmodul parallel zur Faser (E_t , 0, FL) mehrlagig faserparallel verklebter Buchenfurniere, 05ND und 05LND sind die 5 %-Quantile von Normal- und Lognormalverteilungen	33
Abbildung 5.1	Querschnitte der HBH-Prüfkörper für die experimentellen Untersuchungen (Maße in mm)	34
Abbildung 5.2	Nomenklatur der Prüfkörperbezeichnung	34
Abbildung 5.3	Produktionsschritte der HBH Prüfkörperherstellung	36
Abbildung 5.4	Prüfaufbau der 4-Punkt-Biegeversuche nach DIN EN 408:2012-10 für die Bestimmung der Biegefestigkeit und des Elastizitätsmoduls, $h = 320$ mm	38

Abbildung 5.5	Auflager und Lasteinleitung	38
Abbildung 5.6	Rohdichte und Holzfeuchte der BSH und HBH Prüfkörper	39
Abbildung 5.7	Bruchverhalten der BSH und HBH 1 Biegeprüfkörper	40
Abbildung 5.8	Bruchverhalten der HBH 2 und 3 Biegeprüfkörper	41
Abbildung 5.9	Biegefestigkeit der BSH- und HBH-Prüfkörper	42
Abbildung 5.10	Ermittelte globale und lokale Elastizitätsmodule der BSH- und HBH-Prüfkörper	43
Abbildung 5.11	Berechnete Elastizitätsmodule auf Basis der gemessenen Eigenfrequenzen	45
Abbildung 5.12	Prüfaufbau der 3-Punkt-Biegeversuche zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit von HBH mit Angabe des Querkraft und Momentenverlaufs	47
Abbildung 5.13	Prüfaufbau der 4-Punkt-Biegeversuche zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit von HBH mit Angabe des Querkraft und Momentenverlaufs	48
Abbildung 5.14	Realisierter 3PB-Versuchsaufbau zur Bestimmung der Schubtragfähigkeit von HBH	49
Abbildung 5.15	Realisierter 4PB-Versuchsaufbau zur Bestimmung der Schubtragfähigkeit von HBH	49
Abbildung 5.16	(a) Einschnitt der FSH-Biegezug- und Biegedruckverstärkung, (b) FSH-Streifen unter der Lasteinleitungsplatte zur direkten Lasteinleitung in die Furnierebenen, (c) Querdrukverstärkungen mit VG-Schrauben, (d) Messkreuz zur Bestimmung des Schubmodus	50
Abbildung 5.17	Versagensarten der HBH- und BSH-Schubprüfkörper	52
Abbildung 5.18	Querschnittsabmessungen und Schubspannungsverlauf der Schubprüfkörper	53
Abbildung 5.19	Realisierter Prüfaufbau	54
Abbildung 6.1	Aufteilung der Biegeprüfkörper zur experimentellen Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens von Ausklinkungen, Durchbrüchen und Queranschlüssen in holzbewehrtem Holz	56
Abbildung 6.2	Übersicht der für die Versuche zu Ausklinkungen, Durchbrüche und Queranschlüsse verwendeten Prüfkörper	57
Abbildung 6.3	Versuchsaufbau Ausklinkungen in HBH, Abmessungen in mm	58
Abbildung 6.4	(a) Fräsen der Ausklinkungen (b) fertige Ausklinkung	59
Abbildung 6.5	Ausklinkungen in BSH	60
Abbildung 6.6	Ausklinkungen in HBH Serie 1	61
Abbildung 6.7	Ausklinkungen in HBH Serie 2 (*Durch eine Fehlfunktion der Prüfmaschine wurde die Ausklinkung HBH_AK_2.1_1_II zu schnell belastet und es erfolgte keine Messdatenaufzeichnung)	62
Abbildung 6.8	Ausklinkungen in HBH Serie 3	63
Abbildung 6.9	Vergleich der ermittelten Maximallasten der geprüften Ausklinkungen der BSH- und HBH-Träger	64
Abbildung 6.10	Versuchsaufbau Durchbrüche; Abmessungen in mm	65
Abbildung 6.11	Fräsen der runden Durchbrüche	66
Abbildung 6.12	Durchbrüche BSH (*die Prüfkörperbreite war 161 mm, ** Durchbruch war mit geeigneten VG-Schrauben verstärkt)	67
Abbildung 6.13	Durchbrüche HBH Serie 1	68
Abbildung 6.14	Durchbrüche HBH Serie 2	69

Abbildung 6.15	Durchbrüche HBH Serie 3	70
Abbildung 6.16	Vergleich der ermittelten Maximallasten der geprüften BSH- und HBH-Träger mit runden Durchbrüchen	71
Abbildung 6.17	Versuchsaufbau Queranschlüsse in HBH, Abmessungen in mm	72
Abbildung 6.18	Belastungsverfahren Queranschlüsse	73
Abbildung 6.19	(a) Schlitzten der BSH Komponenten, (b) Bohren der Löcher, (c) Einbringen der Stabdübel.....	73
Abbildung 6.20	Last-Verformungskurven der untersuchten Queranschlüsse in BSH, Queranschlusstyp 2 (2 Schlitzbleche), Queranschlusstyp 1 (1 Schlitzblech)	75
Abbildung 6.21	Last-Verformungskurven der untersuchten Queranschlüsse in HBH-Serie 1, Queranschlüsse, Anschlusstyp 2 (2 Schlitzbleche)	76
Abbildung 6.22	Versagensformen der Queranschlüsse in HBH-Serie 1, Anschlusstyp 2 (2 Schlitzbleche)	77
Abbildung 6.23	Last-Verformungskurven der untersuchten Queranschlüsse in HBH-Serie 2, Queranschlüsse, Anschlusstyp 1 (1 Schlitzblech)	77
Abbildung 6.24	Biegezugrisse in den Prüfkörpern der HBH-Serie 2.....	78
Abbildung 6.25	Last-Verformungskurven der untersuchten Queranschlüsse in HBH-Serie 3, Queranschlüsse, Anschlusstyp 1 (1 Schlitzblech)	79
Abbildung 6.26	Verformte Stabdübel der Anschlusskonstruktion in HBH-Serie 3	79
Abbildung 6.27	Vergleich Maximallasten Queranschlüsse in BSH und HBH mit Stabdübel-Schlitzblechanschluss.....	80
Abbildung 6.28	Bestimmung der Materialeigenschaften der verwendeten Stabdübel	81
Abbildung 6.29	Ergebnisse Stabdübel.....	82
Abbildung 7.1	BSH- und HBH- Prüfkörper in der Klimakammer	83
Abbildung 7.2	Messtechnik und Fotohalterung zur Untersuchung der Schwindverformung der BSH- und HBH-Prüfkörper in der Klimakammer.....	84
Abbildung 7.3	Bau der Klimakammer (a-f).....	84
Abbildung 7.4	Verlauf von relativer Feuchte und Temperatur in der Klimakammer	85
Abbildung 7.5	Vergleich der Holzfeuchte in unterschiedlichen Tiefen der BSH und HBH Prüfkörpern zu Beginn und am Ende des Untersuchungszeitraums, gemessen mit dem elektronischen Widerstandsverfahren, die Lage der Furnierebene ist grau gekennzeichnet.....	86
Abbildung 7.6	Typische Bereiche der Erstrissbildung in den BSH Komponenten der HBH Prüfkörpern	87
Abbildung 7.7	Rissbildung der BSH-Komponenten der HBH-Prüfkörper bei Versuchsende	88
Abbildung 8.1	Mit Buchenfurnieren erzielbare Schubsteifigkeiten der Furnierebene bei einer gegenläufigen Anordnung für variierende Neigungswinkel der Furnierlagen, Steifigkeitskennwerte in N/mm ² (Lechner 2019)	89
Abbildung 8.2	Vergleich der ermittelten Biegefestigkeiten (f_m , netto) mit den berechneten Biegespannungen (σ_m , FEM) aus dem FEM-Modell	90
Abbildung 8.3	(a-d) Vergleich der Durchbiegung in Feldmitte (w_{gl}) der FEM-Berechnung mit den gemessenen Verformungen aus den Versuchen für BSH und die HBH Serien 1 bis 3	91
Abbildung 8.4	Modellbildung von VG-Schrauben, Verbundschicht – geometrische Zusammenhänge (Mestek 2011).....	92

Abbildung 8.5	Numerisch und analytisch berechnete Schubspannungen in den BSH-Komponenten und der Furnierebene von HBH (Lechner 2019).....	94
---------------	---	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1	Mechanische Kennwerte und Rohdichte von Einzelfurnieren und Furnierschichtholz aus Buche, Mittelwerte nach verschiedenen Untersuchungen, Zusammenstellung von Wallner (2018)	18
Tabelle 2.2	Gängige Klebstoffsystem für tragende Zwecke im Holzbau zusammengestellt von Wallner (2018)	20
Tabelle 2.3	Vergleich von Glas-, Kohlenstoff- und Aramidfaser nach Ludwig (2019).....	22
Tabelle 2.4	Überblick über die gebräuchlichsten Duroplaste, Thermoplaste und Elastomere (Drechsler et al., 2019)	24
Tabelle 3.1	Steifigkeitskennwerte für die numerische Simulation	27
Tabelle 5.1	Ergebnisse der Delaminierungsversuche	37
Tabelle 5.2	Berechnete und gemessene erste und zweite Eigenfrequenz der Biegeprüfkörper	45
Tabelle 5.3	Ermittelte Schubmodule aus den Biegeversuchen und den Schwingungsmessungen.....	46
Tabelle 5.4	Querkraft- und Momentenverhältnisse der drei gewählten Versuchsaufbauten.....	48
Tabelle 5.5	Hauptabmessungen und Konfiguration der Prüfkörper zur Bestimmung der Schubtragfähigkeit	51
Tabelle 5.6	Versuchsergebnisse Buchen-FSH.....	54
Tabelle 5.7	Querkräfte und Schubspannungen aus den 3PB und 4PB Versuchsaufbauten	55
Tabelle 6.1	Anfangsverschiebung und Verschiebungsmodul der Anschlusskonstruktion	80
Tabelle 6.2	Versuchsergebnisse Stabdübel	82
Tabelle 7.1	Erstrissbildung der BSH und HBH Prüfkörper in Abhängigkeit der Holzfeuchteänderung sowie Darstellung der maximalen Risstiefen bei Versuchsende.....	87
Tabelle 8.1	Steifigkeitskennwerte für die numerische Simulation	90
Tabelle 8.2	Steifigkeitskennwerte für die numerische Simulation	91
Tabelle 8.3	Vergleich der Ansätze zur Berechnung des Verschiebungsmoduls und daraus resultierend das Schubmodul der Verbundschicht.....	93