

Jürgen Graf, Stefan Krötsch
Viktor Poteschkin, Wenchang Shi

Potentiale der Verwendung von Brettsperrholz-Produktionsabfällen zur Herstellung von Bauteilen im Holzbau – Recycling von Brettsperrholz-Produktionsabfällen

F 3204

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2020

ISBN 978-3-7388-0527-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt

**Potentiale der Verwendung von Brettsperrholz-Produktionsabfällen zur
Herstellung von Bauteilen im Holzbau
Recycling von Brettsperrholz-Produktionsabfällen**

gefördert vom



**Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung**

im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung



ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Förderkennzeichen SWD-10.08.18.7-17.13

Projektleitung: Technische Universität Kaiserslautern
Fachbereich Architektur, Fachgebiet Tragwerk und Material
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Graf
Hochschule Konstanz – Technik, Wirtschaft und Gestaltung
Fachbereich Architektur, Fachgebiet Baukonstruktion und Entwerfen
Prof. Dipl.-Ing. Stefan Krötsch

Sachbearbeiter: Dipl.-Ing. Viktor Poteschkin
Dipl.-Ing. Wenchang Shi

November 2019

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-7.13)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
1. Brettsperrholz-Produktionsabfälle	4
2. Verlegemuster für Endlosplatten als Wand- und Deckenelemente	6
3. Entwicklung standardisierter Wand-, Decken- und Dachstrukturen für Wohn- und Bürogebäude	8
3.1 Entwurfsprinzip – reversible modulare Bauweise	8
3.2 Ökologische Bedeutung	9
3.3 Verbindungen zusammengesetzter Holzbauteile	11
3.3.1 X-Fix	11
3.3.2 Buchen-Furnierschichtholz-Fremdfedern	12
3.3.3 Reversible Schraubverbindungen	13
3.4 Wand- und Deckenentwürfe	14
3.4.1 Standardisiertes Bauteil - Grundmodul	14
3.4.2 Herstellung mit Portalbearbeitungsanlage (PBA)	17
3.4.3 Holzbalkendecke für große Spannweiten	19
3.4.4 Deckenaufbauten	20
3.4.5 Wandaufbauten	22
4. Experimentelle und analytische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Scheiben- und Deckensystemen	26
4.1 Experimentelle Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit der nicht verstärkten und mit Schrauben verstärkten Querkraftstöße	26
4.1.1 Hintergrund – Kraftfluss und Stabwerkmodell	26
4.1.2 Versuchsbeschreibung	29
4.1.3 Untersuchungsergebnisse Querkrafttragfähigkeit	30
4.2 Experimentelle Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit der mit geriffelten Buchen-Rundholzdübeln verstärkten Querkraftstöße	32
4.2.1 Hintergrund	32
4.2.2 Versuchsbeschreibung	33
4.2.3 Untersuchungsergebnisse Querkrafttragfähigkeit	35
4.3 Analytische Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit	39
4.3.1 Hintergrund – Ausklinkungen	39
4.3.2 Entwicklung des Stabwerkmodells	40
4.3.3 Nachweise der Druck- und Zugstreben des Stabwerkmodells	42
4.3.4 Nachweis der Tellerkopfschrauben	46
4.3.5 Strategie zur Querkraftbemessung für Decken aus BSP-Produktionsabfällen	48
4.3.6 Interpretation	49
4.4 Zugversuche mit Fremdfedern aus Buchenfurnierschichtholz	50
4.4.1 Interpretation	52
4.5 Experimentelle und analytische Untersuchungen der Biegetragfähigkeit	53
4.5.1 Untersuchungen an Original-BSP-Platten	54
4.5.2 Untersuchungen an BSP-Restholzträgern mit einer Brettlage als Zugzone	56
4.5.3 Untersuchungen an BSP-Restholzträgern mit zwei Brettlagen als Zugzone	58

4.5.4	Untersuchungen an BSP-Restholzträgern mit Zug- und Druckzone aus jeweils einer Brettlage	59
4.5.5	Strategie zur Biegebemessung für Decken aus BSP-Produktionsabfällen	60
4.5.6	Interpretation	64
5	Zusammenfassung und Ausblick	65
5.1	<i>Zusammenfassung</i>	65
5.2	<i>Ausblick</i>	71
	Anhang A	73
	Anhang B	76
	Anlagen	79
	<i>Abbildungsverzeichnis</i>	79

Vorwort

Brettsperrholz ist ein hoch leistungsfähiges Baumaterial für Wand-, Decken- und Dachelemente aus Massivholz. Es ist sehr formstabil und zuverlässig berechenbar. In der Produktion von Bauteilen fällt viel Verschnitt an, einerseits produktionsbedingt aus der Herstellung und Besäumung der Rohplatten, vor allem aber für Fenster- und Türausschnitte. Die Produktionsabfälle betragen bei vielen Herstellern bis zu 20% des Rohmaterials.

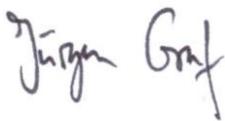
Das Forschungsvorhaben Recycling von Brettsperrholz-Produktionsabfällen untersucht daher Möglichkeiten, aus diesen Ausschnitten neue Decken- und Wandelemente herzustellen, um das hochwertige Material stofflich zu nutzen statt es wie üblich thermisch zu verwerten. Der Fokus der Betrachtung liegt dabei auf Tür- und Fensterausschnitten, die für ein Recycling oder eine Kaskadennutzung besonders geeignet erscheinen, da sie nicht durch eine Optimierung der Plattenherstellung und -ausnutzung vermeidbar sind.

Eigentlich wäre es Aufgabe der Architektur, Ausschnitte in Brettsperrholzplatten durch materialgerechtes Entwerfen überhaupt zu verhindern oder zumindest zu minimieren. Ein schönes Beispiel dafür ist die Olperer-Hütte, deren Fensterreihe im Obergeschoss nicht aus Lochfenstern, sondern nur aus Wand oder Nichtwand besteht. Nachdem jedoch in der Alltagsarchitektur viele Ausschnitte vorhanden sind, will das Forschungsprojekt einen sinnvollen Umgang mit diesem wertvollen Abfall-Rohstoff aufzeigen.

Das Forschungsvorhaben wurde vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung im Rahmen der Forschungsinitiative Zukunft Bau an der Universität Kaiserslautern gefördert (Förderkennzeichen: SWD-10.08.18.7-17.13).

Die Untersuchungen wurden von den Herren Viktor Poteschkin und Wenchang Shi durchgeführt, die auch maßgeblich den Forschungsbericht erstellt, betreut und durchgeführt haben. Der Firma Eugen Decker Holzindustrie AG, Morbach, gilt besonderer Dank für die Bereitstellung der Brettsperrholz-Produktionsabfälle und für die fachliche Begleitung.

November 2019



Prof. Dr.-Ing. Jürgen Graf
Prof. Dipl.-Ing. Stefan Krötsch

1. Brettsperrholz-Produktionsabfälle

Bei der Herstellung von Bauelementen aus Brettsperrholz (BSP) fallen produktionsbedingt große Mengen (bis zu 20%, laut Fa. Eugen Decker, Morbach) an Resten an. Zum Teil handelt es sich um Randabschnitte aus der Plattenproduktion, die durch Besäumung der Brettsperrholztafeln entstehen. Diese werden von den Holzplattenherstellern für den Transport als Kanthölzer und Abstandshalter verwendet. Die beim Zuschnitt der Bauelemente entstehenden großformatigen Tür- und Fensterausschnitte finden dagegen oft keine stoffliche Weiterverwendung. Genau diese Restplatten sind für die Kaskadennutzung von Brettsperrholz-Produktionsabfällen in diesem Forschungsvorhaben von besonderem Interesse.

Zunächst wurden anhand von Eugen Decker Holzindustrie AG zur Verfügung gestellten Projekten Abmessungen und Plattenstärken von BSP-Restholzplatten ermittelt und tabellarisch ausgewertet. Am häufigsten fallen Restplatten mit ca. 2,0 x 0,8m (Türausschnitt) und ca. 1,26 x 0,9 m (Fensterausschnitt) aus 106W-5 BSP-Platten an (Abbildung 1). Es handelt sich um eine 5-schichtige Platte mit 3 Längslagen (Decklagen und Mittellage: Faserrichtung zur Längsseite der Reststücke; je 20 mm) und 2 Querlagen (je 23 mm). Diese zwei gängigsten Restplattengrößen werden als Grundmodule für die Untersuchungen festgelegt. Um aus diesen Resten neue Wand- und Deckenelementen auf einfache und produktionsnahe Weise herstellen zu können, ist eine identische Verzahnung für Wand- und Deckenelemente Grundidee der weiteren Betrachtung.

Datei	69W-3			81W-3			87W-3			106W-5			109W-3			115W-5			133L-5			145L-5			178L-5			220L-7			decke			
	höhe	breite	anzahl	höhe	breite	anzahl	höhe	breite	anzahl	höhe	breite	anzahl	höhe	breite	anzahl	höhe	breite	anzahl	höhe	breite	anzahl	höhe	breite	anzahl	höhe	breite	anzahl	höhe	breite	anzahl				
8810							2100	1100	3																									
8830							800	1000	2							4600	900	1	1000	1200	1										2500	450	1	
							350	1500	2							4900	900	1										2100	900	1				
							2260	900	5							3100	1300	1										12750	140	1				
							2260	500	1							900	750	1																
8841							2040	900	2	1970	900	2																						
							2040	775	1	2040	900	1																						
										2140	1010	2																						
										1260	1510	1																						
8931	2140	1440	1																															
	638	630	1																															
	318	1736	2																															
	2230	1200	2																															
8934	2050	700	1	1476	2174	1				2277	1040	1	1350	1100	1																			
										1280	1100	6	1500	1780	1																			
										1976	1450	2	1280	1100	3																			
										1500	1100	3	1980	1480	1																			
										1269	1100	1	1500	1100	1																			
										2070	1550	1	1100	975	1																			
										1500	2170	1																						
	8957							2020	900	3	820	760	1																					
											1000	1760	1																					
											2140	885	1																					
										1260	1000	1																						
										2140	1000	1																						
										885	1100	1																						
										1260	760	1																						
										2140	1100	1																						
										2020	900	3																						
										1900	900	2																						
										885	1760	1																						
										1000	1760	2																						
8958							2040	900	3	885	1760	3																						
										1260	885	5																						
										1260	1760	4																						
										1260	1010	1																						
										2040	900	5																						
										2100	1010	1																						
										2100	1760	2																						
										1260	1760	1																						
										2040	770	1																						
										500	1760	1																						
9003																			1180	2530	1	1180	2020	1										
9014													1050	990	7																			
													2220	1750	1																			
													2090	900	3																			
9023				2225	1020	1				1415	1010	5													1050	3135	1							
				2165	1020	3				2145	1020	2													1100	900	1							
				2165	895	1				2225	1020	1													1280	2185	1							
										1290	2635	1													750	525	1							
										1340	1510	2																						
9058										1340	1010	2																						
													1000	1000	4																			
													1340	1500	2																			
													2200	1800	1																			
												2025	895	4																				

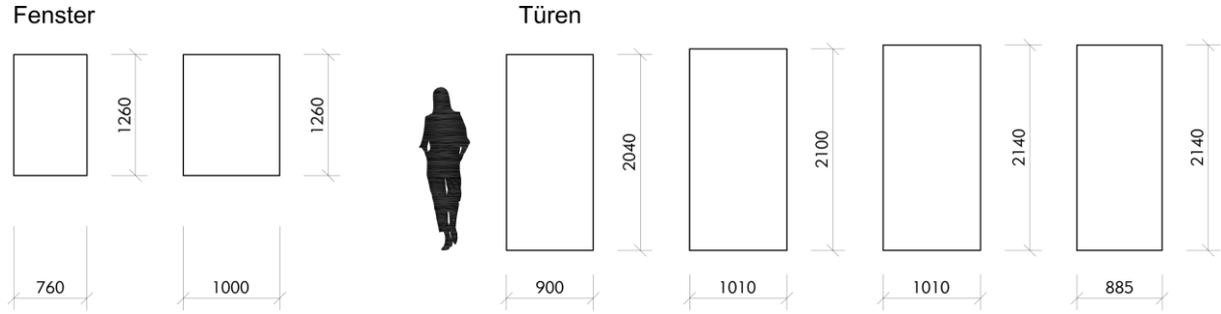


Abbildung 1: Übersicht der bei der Produktion anfallenden Verschnittgrößen von Restholzplatten

2. Verlegemuster für Endlosplatten als Wand- und Deckenelemente

Um die Reste optimal zu nutzen, wurde ein Script geschrieben, das für die gewünschten Decken- und Wandabmessungen die Anzahl und die notwendige Geometrie der einzelnen Elemente anhand von zur Verfügung stehenden BSP-Restholzplatten berechnet. Dieses Script kann an eine Portalbearbeitungsanlage gesendet werden, welche die Grundmodule aus den Tür- und Fensterausschnitten während der Produktion herstellt. Das Script wird ständig mit dem Fortschritt der Untersuchungen und Entwicklungen der Decken- und Wandkonstruktionen aktualisiert und weiterentwickelt.

Das Script für dieses Forschungsprojekt ist mit Grasshopper 3D Plug-in für Rhinoceros entwickelt worden. Grasshopper ist eine visuelle Programmiersprache und -umgebung, die von David Rutten bei Robert McNeel & Associates¹ entwickelt wurde und in der 3D-CAD-Anwendung Rhinoceros 3D ausgeführt wird. Als Plug-In für Rhinoceros ist 3D Grasshopper in eine robuste und vielseitige Modellierungsumgebung integriert, die von Architekt*in, Ingenieur*in und Industriedesigner*in eingesetzt wird. Im Gegensatz zum Rhino-Dokument enthält die Grasshopper-Definition keine tatsächlich vorhandenen Geometrieobjekte. Stattdessen besteht die Grasshopper-Definition aus einer Reihe von Regeln und Anweisungen, die Rhino Aufgaben automatisiert lösen kann. Definitionen werden erstellt, indem Komponenten auf eine Leinwand gezogen werden. Die Ausgänge dieser Komponenten werden dann mit den Eingängen nachfolgender Komponenten verbunden. Grasshopper wird hauptsächlich zum Erstellen von generativen Algorithmen verwendet, zu den fortgeschrittenen Anwendungen von Grasshopper gehören die parametrische Modellierung für die Tragwerksplanung², die parametrische Modellierung für Architektur und Fertigung und der Energieverbrauch von Gebäuden³.

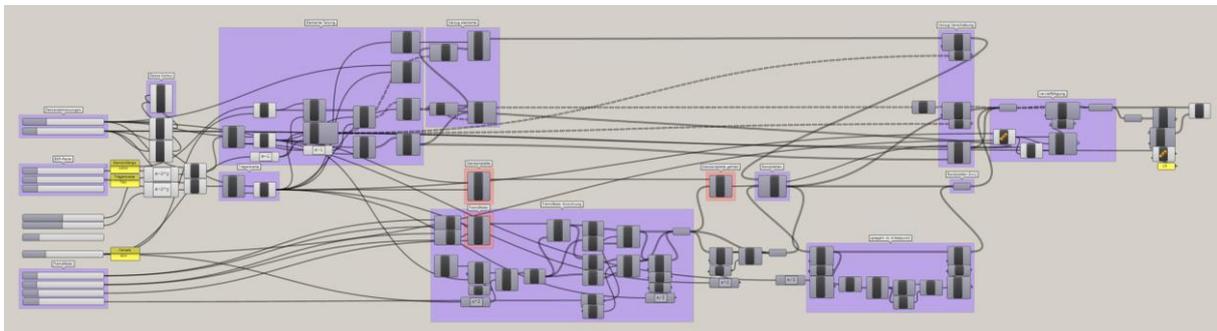


Abbildung 2: Script für die Berechnung des Verlegemusters

¹ Tedeschi, A. (2011): Intervista a David Rutten. In *MixExperience Tools1* (S. 28–29). Naples, Italy: MixExperience.

² Georgiou, O. (2011): Performance Based Interactive Analysis. In *Computational Design Modeling: Proceedings of the Design Modeling Symposium*. Berlin.

³ Willis, D., Braham, W., Muramoto, K., & Barber, D. (2016): *Energy Accounts: Architectural Representations of Energy, Climate, and the Future*. Routledge.

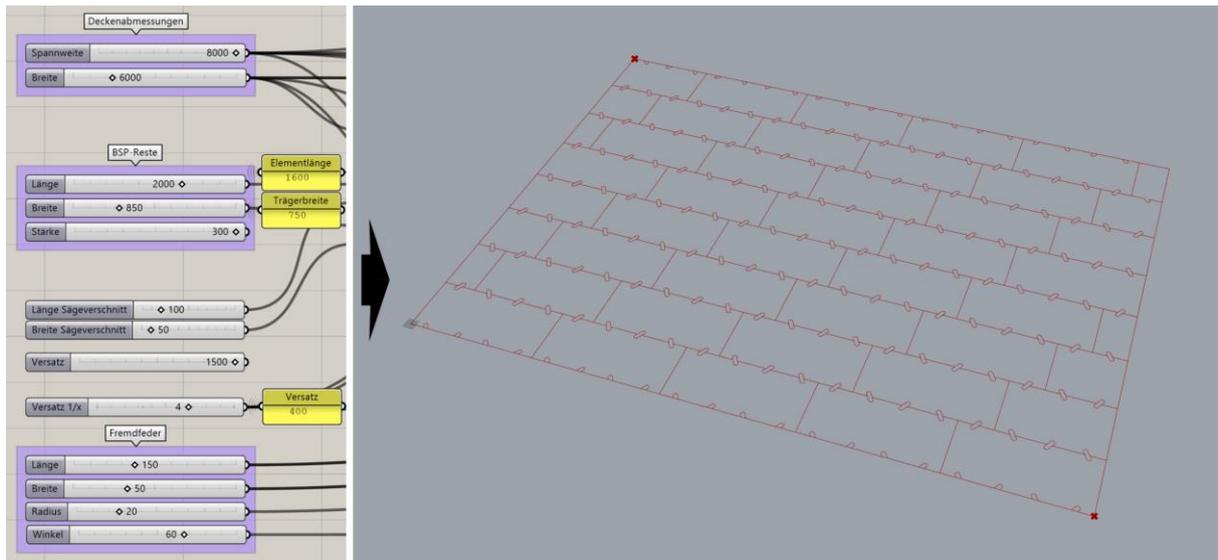


Abbildung 3: Aus Größen der BSP-Restholzplatten werden fertige Bauelemente definiert.

In die Benutzeroberfläche werden die gewünschten Decken- bzw. Wandabmessungen eingegeben und die zur Verfügung stehenden BSP-Reste (Abbildung 3). Zusätzlich dazu gibt es eine Möglichkeit, den produktionsbedingten Verschnitt sowie Mindestabstände für die Werkzeuge einzugeben; diese werden von den Abmessungen der Restplatten abgezogen. Zuletzt bestimmt man den Versatz zwischen den Fugen der Platten und die Verbindungsmittel – in diesem Fall die Fremdfedern aus Buchenfurnierschichtholz. Der Algorithmus berücksichtigt die Eingaben und definiert die Abmessungen und Position der fertigen Elemente. Dabei werden auch die Fräsungen für die Fremdfedern festgelegt. Anschließend werden die fertigen Elemente exportiert und können so in die Steuerungssoftware der Portalbearbeitungsanlage eingelesen werden.

Mit dieser Vorgehensweise werden Bauteile definiert, die nur für die im Script definierte Decke passen. Von Vorteil ist es mit Elementen zu arbeiten, die untereinander austauschbar sind – dies vereinfacht die Produktion und Lagerung, dadurch wird auch ein Nachbestellen der Bauteile vereinfacht. Mit dieser Vorgehensweise können Standardprodukte im Holzbau erstellt werden.

3. Entwicklung standardisierter Wand-, Decken- und Dachstrukturen für Wohn- und Bürogebäude

3.1 Entwurfsprinzip – reversible modulare Bauweise

Das Ziel dieses Forschungsprojektes ist nicht nur die Produktionsreste möglichst effizient in neue Bauteile umzuwandeln, sondern vielmehr eine neue Systematik im Umgang mit der Ressource Holz zu entwickeln. Es genügt nicht mehr nur Holzbauten in konventioneller Bauweise und in linearer Produktwirtschaft zu errichten die nach ihrer Lebenszeit in die thermische Verwertung gehen, weil Recycling in Form der Wiederverwendung und Kreislaufwirtschaft bisher wenig wirtschaftlich ist. Eine Mehrfachverwendung ist sehr oft unmöglich, da Holzbauteile nahezu immer auf ein bestimmtes Projekt zugeschnittene Unikate darstellen und daher die Zerlegbarkeit dieser Bauteile zur Herstellung von Sekundärbauteilen oft nicht gefragt ist. Um dem entgegenzuwirken, müssen Bausysteme entwickelt werden, die auf einheitlichen Systematiken und Materialkombinationen basieren, vor allem im Bereich von Wohn- und Bürogebäuden. Durch den Ersatz von energieaufwändig hergestellten Produkten aus Stahl und Beton durch Holz lassen sich CO₂-Emissionen infolge der stofflichen Substitution und durch die verzögerte Freisetzung vom biogenen Kohlenstoff für die Lebensdauer des Bauwerks einsparen (Abbildung 4). Ein effizienter und ressourcenschonender Umgang mit dem Rohstoff Holz führt zum minimierten Materialeinsatz und somit zu mehr Holzbauprodukten aus der gleichen Menge Holz. Die stoffliche Substitution, als wichtigste CO₂-Senkenwirkung, steigt dadurch effektiv.

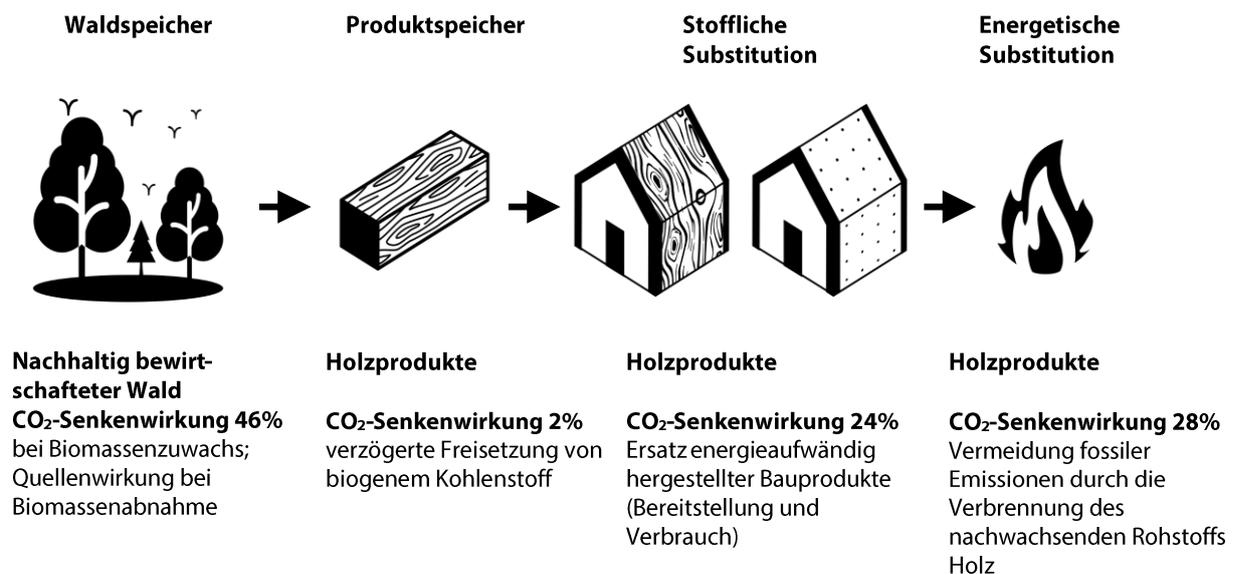


Abbildung 4: Wirkung von Waldspeicher, Produktspeicher, stofflicher Substitution und energetischer Substitution auf die Senkung der Treibhausgasemissionen in Deutschland. Quelle der Speicherwirkungen in %⁴

Um die stoffliche Substitution weiter voran zu treiben und den Anteil von Holz im Bauwesen zu erhöhen, ist ein Umdenken im Umgang mit Holzbauprodukten von Nöten. Wenn man die Gründe des Erfolgs in der Stahl- und Betonfertigteilindustrie betrachtet, wird man feststellen, dass die Wirtschaftlichkeit der beiden Industrien nicht nur durch den geringen Werkstoffpreis oder effizienten Materialeinsatz begründet ist, sondern im hohen Maße in der Standardisierung und Vorfertigung der Bauelemente bis hin zur Verbindungstechnik ihren Ursprung hat. Dieses Potential der Standardisierung hat bisher nur einen

⁴ Bauhus, J. ; Rock, J. ; Spellmann, H. ; Dieter, M. ; Lang, F. ; Richter, K. ; Bolte, A. ; Rüter, S. ; Bösch, M. ; Entenmann, S. 2017: Beiträge der Forst- und Holzwirtschaft zum Klimaschutz. In: AFZ-DerWald 3/2017, Deutscher Landwirtschaftsverlag

untergeordneten Stellenwert im Holzbau. Zwar werden Bauelemente oft vorgefertigt und vor Ort lediglich montiert, doch eine konsequente Standardisierung findet bisher nicht statt. Dieses Forschungsprojekt macht einen Vorschlag für eine reversible modulare Bauweise. Als Grundlage für die Untersuchungen dienen die Reststücke, die in der Produktion von BSP anfallen, die Lösungsansätze sind jedoch so konzipiert, dass ein Transfer der Ergebnisse zurück in die Industrie ermöglicht wird.

Die Modularität ist gefordert durch den Umstand, dass die Produktionsreste unterschiedliche Abmessungen aufweisen und somit optimale Elementabmessungen gefunden werden müssen, um eine möglichst umfangreiche Bandbreite an Resten verwenden zu können. Des Weiteren, wenn die Bauteile gleiche Größe und Anschlussdetails haben, vereinfacht dies die Planung und Logistik. Teile können aus einem Katalog ausgesucht und bestellt werden und genauso im späteren Verlauf, bei Abriss oder Änderung des Gebäudes, wiederverwendet werden. Bauteile müssen ohne großen Aufwand ausgebaut und am neuen Ort eingesetzt werden können.

Die Frage der Wirtschaftlichkeit ist von Bedeutung, denn wenn die Kosten der Wiederverwendung die Produktionskosten für vergleichbare Deckenkonstruktionen übersteigen, werden sich Recyclingprodukte am Markt nicht durchsetzen können.

3.2 Ökologische Bedeutung

Aufgrund der hervorragenden ökologischen Eigenschaften von Holz hat der Anteil von Holzbauten im Bauwesen in den letzten beiden Dekaden kontinuierlich zugenommen. Die Erfindung von Brettsperrholz und die Markteinführungen 1998 in Deutschland und Österreich stellen in diesem Zusammenhang einen Meilenstein dar, denn seit dem können Holzbauten im Wohnungs- und Gewerbebau mit formstabilen, mehrschichtig spannenden und zuverlässig berechenbaren Flachdecken hergestellt werden.

Gesellschaftliches Umdenken und politische Initiativen wie die Holzbauoffensive in Baden-Württemberg werden aller Voraussicht nach dafür sorgen, dass diese Entwicklung weiter anhält. Prognosen gehen davon aus, dass sich die Brettsperrholzproduktion von rund 670.000 m³/a im Jahr 2016 auf etwa 1,2 Mio m³/a im Jahr 2020 verdoppelt haben wird.

Unter diesen Umständen wirkt sich der hohe Holzverbrauch von Brettsperrholzkonstruktionen pro Quadratmeter Nutzfläche im Vergleich zu filigranen Holztragwerken negativ aus, denn insgesamt steigt der Nutzungsdruck auf die europäischen Wälder stark an. Gleichzeitig nimmt der Anteil von Nadelhölzern, aus denen Brettsperrholz hergestellt wird, im Zuge eines Waldumbaus, der den Anforderungen des Klimawandels gerecht wird, ab.

Um also der ständig steigenden Nachfrage nach Brettsperrholz (und dessen positiver ökologischer Bedeutung) bei gleichzeitig geringeren zur Verfügung stehenden Ressourcen gerecht zu werden, bietet die stoffliche Nutzung der Produktionsabfälle wie in diesem Forschungsvorhaben vorgeschlagen, eine hervorragende Gelegenheit, die Effizienz der Holz- und Waldnutzung – und damit die Effizienz der Flächennutzung in Deutschland – erheblich zu steigern. Denn nicht nur werden Produktionsabfälle verwendet, die in einer relevanten Industrie mit bis zu 20% des Materials in sehr großer Menge in noch dazu massiven Holzbauteilen anfallen (Abbildung 1). Die Reste können darüber hinaus auf die vorgeschlagene Weise fast vollständig stofflich genutzt werden ohne den Primärinhalt oder den Anteil von Zuschlagsstoffen in nennenswerter Weise zu erhöhen.

Im Vergleich zur Nutzung von Vollholzbrettern zu Herstellung von Brettsperrholztafeln bietet die Nutzung der Produktionsabfälle außerdem eine besonders effiziente Prozesskette, denn die Transportwege sind minimal, nachdem der neue Rohstoff an der Produktionsstätte entsteht. Die Menge des zur Verfügung

stehenden Rohmaterials ist direkt aus dem konventionellen Fertigungsprozess ableitbar, die Qualitätskontrolle der Verleimung ist ebenfalls direkt übertragbar.

Eine quantitative Untersuchung oder eine Ökobilanzierung der untersuchten Bauteile aus Brettsperrholz-Produktionsabfällen ist nicht Gegenstand dieses Forschungsvorhabens. Das besondere ökologische Potential – wie oben beschrieben – ist jedoch offensichtlich und sollte in anschließenden Untersuchungen detailliert begutachtet werden. Grundsätzlich könnte der Fokus dabei auf den folgenden Themen liegen:

- zusätzliches stoffliches Substitutionspotential für nicht-biogene Baustoffe
- CO₂-Speicherungspotential und Global Warming Potential (GWP)
- Reduzierung des Flächenbedarfs biogener Rohstoffherzeugung
- Effizienzsteigerung der Holznutzung

Gelingt es, Wand- und Deckenkonstruktionen mit reversiblen Verbindungen der BSP-Reste auszuführen, sind nach DIN EN 15978:2012-10 außerhalb des Gebäudelebenszyklus weitere Substitutions- und Speicherwirkungen durch die Wiederverwendungs- und Weiterverwertungspotentiale möglich.

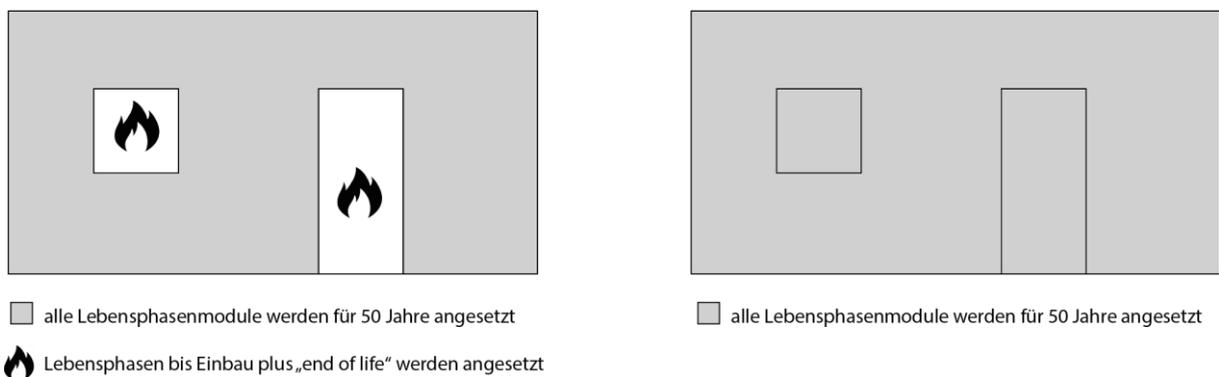


Abbildung 5: Beispiel für ein mögliches Bilanzierungsmodell

Der Bewertung der Weiterverwertung (Kaskadennutzung) des BSP-Verschnitts kommt eine besondere Bedeutung zu. Die Verwertung als Baumaterial bedeutet, dass das im Material gebundene CO₂ nicht, wie bei der thermischen Verwertung freigesetzt, sondern im Bauteil gebunden über die Lebensdauer des jeweiligen Bauteils bzw. Gebäudes gehalten wird (Abbildung 5). Dieser Effekt wäre mutmaßlich bilanziell positiv zu bewerten. Es bleibt zu klären, ob übliche Bilanzierungsmodelle (BNB / DGNB) sowie die verfügbaren Datensätze die tatsächliche ökobilanzielle Wirkung abbilden können.

Der Vergleich verschiedener Konstruktionen dient der Einordnung der Ergebnisse und deren Interpretierbarkeit. Durch den Vergleich wird es möglich, Einsparungen, die durch die Verwendung des BSP-Restes erzielt werden können, auszuweisen und zu bewerten. Eine Einsparung bzw. das bauliche Binden von CO₂ ist gesamtökologisch zielführend.

Die Ökobilanzierung orientiert sich an der DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044. Ausgewiesen wird mindestens das Global Warming Potenzial (GWP) sowie der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf (Pe). Die zu berücksichtigenden Lebensphasenmodule sowie der Betrachtungszeitraum wird während des Bilanzierungsprozesses im Kontext mit der Fragestellung sowie der Datengrundlage festgelegt. Der Betrachtungszeitraum beträgt mindestens 50 Jahre. Als Datengrundlage dienen die EPD-Datensätze der ÖKOBAUDAT sowie bei Bedarf ergänzende Datensätze des BSP-Herstellers und weiterer Datenbanken.

3.3 Verbindungen zusammengesetzter Holzbauteile

Die Verwendung von Holz-Holz-Verbindungen wie Versätze, Nut- und Feder oder auch Überblattungen hat sich über Jahrhunderte bewährt und ist auch in heutigen Zeiten vorteilhaft. Da die Verbindungen nahezu immer über Formschluss funktionieren, können diese nicht nur in ihrer Primärfunktion für die Kraftübertragung verwendet werden, sondern auch zum Ausrichten der Bauteile vor der Fügung. Zusätzlich bieten auch Holzdübel, Schwalbenschwanzverbindungen usw. die Möglichkeit einer Weiterverarbeitung der zusammengesetzten Bauteile, ohne Beschädigung der Bearbeitungswerkzeuge. Alternative zu den reinen Holzverbindungen sind mechanische Verbindungen mit Schrauben und Stabdübel.

3.3.1 X-Fix



Abbildung 6: X-fix C - Schwalbenschwanzförmiger Holz-Holz-Verbinder in Keilform von Hasslacher Norica Timber

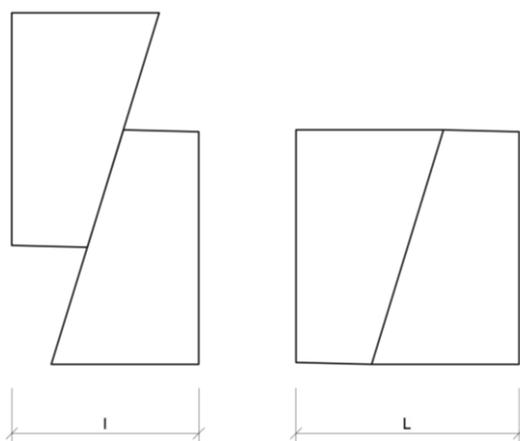


Abbildung 7: Veränderung der Breite beim Einbringen des Verbinders

Laut Herstellerangaben ist „X-fix C ein punktförmiger, selbstspannender Holz-Holz Verbinder für schub- und zugfeste Verbindungen von Brettsperrholz-Decken und Brettsperrholz-Wände. X-fix C ist ein

schwalbenschwanzförmiger Holz-Holz-Verbinder in Keilform. Die Montage von X-fix C funktioniert durch das Einlegen des ersten Teiles in die vorgefertigte Fräsung, dann Einlegen des zweiten Teiles und fixieren durch Einschlagen mit einem Hammer. Die X-fix C Keilform zieht auch großformatige Deckenplatten oder Wandteile selbstständig, formschlüssig zusammen.“ (<http://www.x-fix.at>)

Aus Buchenfurnierschichtholz hergestellt, funktioniert dieser Holzverbinder durch die Veränderung der Schwalbenschwanzbreite beim Einschlagen ins Holz. Dabei entstehende Spannungen ziehen die beiden Teile zusammen, so dass sich die Bauteilfuge schließt. Bei der Montage wird in der Regel zur Lagesicherungszwecken die schräge Fläche des Verbinders mit Klebstoff versehen, um das Herausrutschen der Schwalbenschwanzhälften zu verhindern. Die Tragfähigkeit der X-fix-Verbinder beträgt 28kN für die Zug- und Schubkraftübertragung. Eine Reversibilität ist infolge der hohen Einspannung und der Verklebung der Schrägfläche nur bedingt möglich.

3.3.2 Buchen-Furnierschichtholz-Fremdfedern

Als eine Alternative wurde von Schmidt und Blaß am KIT⁵ eine Verbindung entwickelt, die mit rechteckigen bzw. keilförmigen Fremdfedern aus Buchenfurnierschichtholz (Buchen-FSH) Bauteile schubfest miteinander verbindet (Abbildung 8). Buchen-FSH eignet sich durch hohe Scherfestigkeit aufgrund des Homogenisierungseffektes für die Übertragung der Schubkräfte in der Plattenebene. Untersuchungen zu mit Buchendübeln längsschubverstärkten Verbindungen wurden bereits von Schmidt und Blaß am KIT durchgeführt⁶. Die dort untersuchte Verbindung (S6 in Abbildung 6) mit zwei zueinander angeordneten Fremdfedern wird als Grundlage für die längsschub- und zugbeanspruchten Verbindungen der BSP-Restholzplatten angewandt. Im Kapitel 3.4 wird auf die Funktion und Wirkungsweise dieser Schubdübel näher eingegangen.

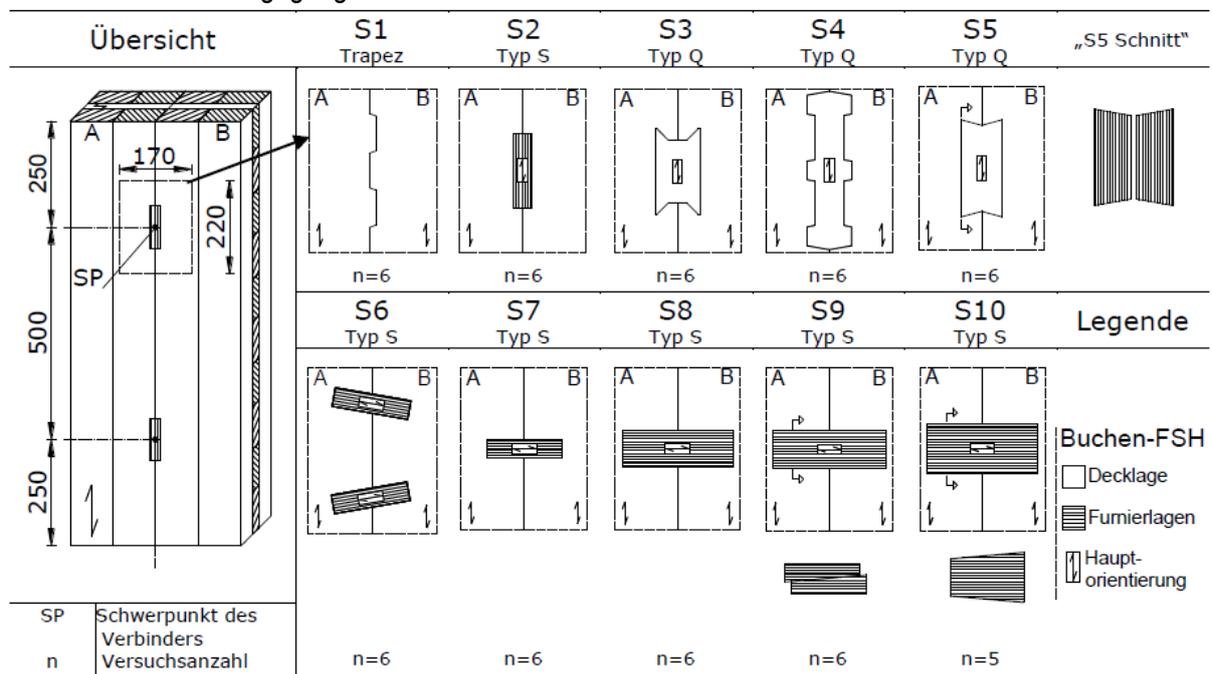


Abbildung 8: Längsschubverbindungen mit Buchenfurnierschichtholz⁶

⁵ Schmidt, T. und Blaß, H. (2015). Längsschubverbindungen in den Schmalseiten von Brettsperrholzelementen. 21. Internationales Holzbau-Forum IHF

⁶ Schmidt, T. und Blaß, H. (2015). Längsschubverbindungen in den Schmalseiten von Brettsperrholzelementen. 21. Internationales Holzbau-Forum IHF

3.3.3 Reversible Schraubverbindungen

Stabdübel- und Schraubverbindungen aus Voll- oder Teilgewindeschrauben sind tragfähige Verbindungen im Holzbau. Stabdübelverbindungen sind im Normalfall nicht reversibel, da sie passgenau im Holz verankert werden müssen, sich durch die Scherbeanspruchungen verdrehen und infolge Quellens nicht mehr aus dem Holzkörper zerstörungsfrei lösen können. Voll- oder Teilgewindeschrauben eignen sich jedoch auch nur bedingt für mehrmaliges Verbinden an derselben Stelle – das Schraubengewinde schneidet sich jedes Mal neu ein und die Holzfasern werden immer mehr beschädigt. Hinzu kommt noch, dass die Verbindungen in der Plattenebene bei einschichtigem Aufbau sich als besonders schwierig erweisen. Die Schrauben müssen aufwändig diagonal an den Verbindungsfugen eingebracht werden. Des Weiteren werden sie linienförmig eingesetzt, in einer Vielzahl pro Meter, was die Montage/Demontage erschwert. Somit sind Voll- oder Teilgewindeschrauben kein passendes Verbindungsmittel, um Bauteile für dieses Forschungsprojekt miteinander schnell, reversibel und zuverlässig zu verbinden. Für reversible Verbindungen sind metrische Schrauben und Gewindestangen mit entsprechenden Unterlagscheiben sinnvoller. In das Holz eingelassen (vertikaler Schlitz von Deckenoberseite), ermöglichen sie eine schnelle punktuelle Montage und Demontage und können wiederverwendet werden (Abbildung 9).

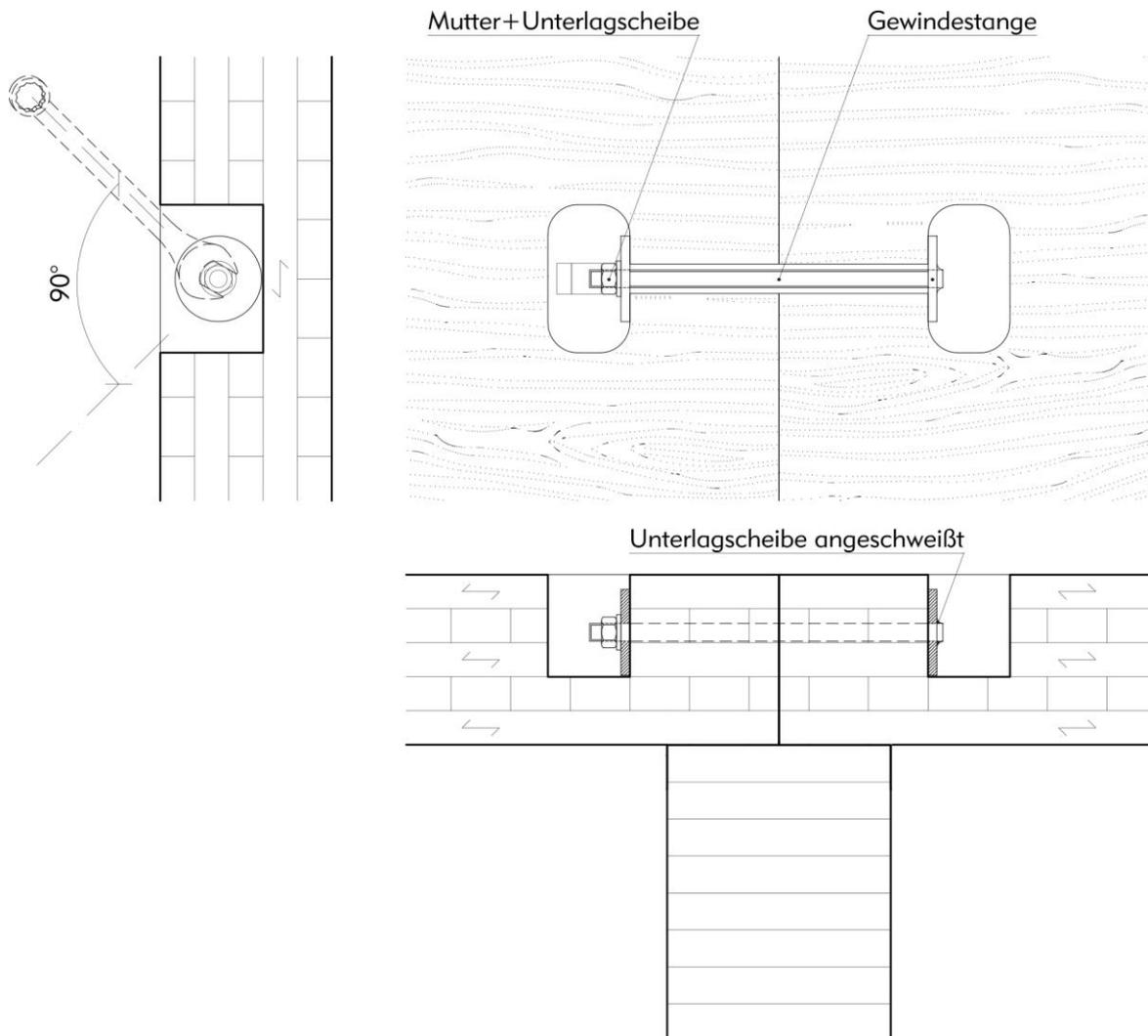


Abbildung 9: Grundprinzip einer reversiblen Schraubverbindung mit Gewindestange am Beispiel einer Balkendeckenkonstruktion

3.4 Wand- und Deckenentwürfe

3.4.1 Standardisiertes Bauteil - Grundmodul

Nachfolgend werden Entwürfe von Wand- und Deckenelementen dargestellt. Grundmodul der standardisierten Bauteile stellen BSP-Restholzplatten mit Fremdfedern aus Buchenfurnierschichtholz dar.

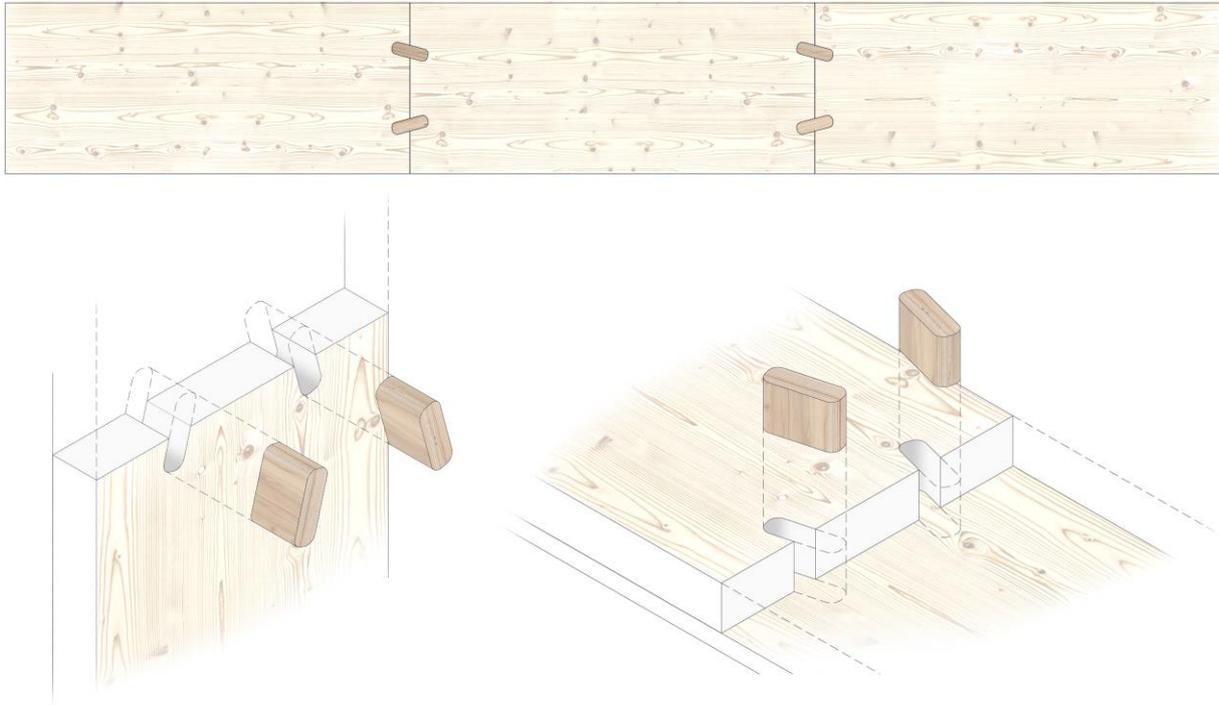


Abbildung 10: Grundmodul standardisierter Wand-, Decken- und Dachelemente



Abbildung 11: Modell M 1:5 standardisierter Wand-, Decken- und Dachelemente

Der Unterschied von Decken- und Wandelementen liegt in der Lastabtragung. Außenwände werden als Platten biege- und querkraftbeansprucht und als Scheiben normalkraftbeansprucht. Biege- und Normalkraftbeanspruchungen überlagern sich. Innenwände werden als Scheiben normalkraftbeansprucht. Deckenkonstruktionen werden hoch biege- und querkraftbeansprucht. Sollen die Decken als horizontale Aussteifungsebenen dienen, sind sie zusätzlich als Deckenscheiben normalkraftbeansprucht. Die Anzahl und Länge der Elemente richtet sich nach den geforderten Spannweiten und den BSP-Restholzlängen. Bei Wand- und Deckenspannweiten, die größer sind als die Längen der BSP-Reste, müssen kraftübertragende Bauteilstöße eingesetzt werden (Abbildung 21 und Kapitel 4). Grundsätzlich wird die Druckzone aus der Biegebeanspruchung über Kontaktstoß der BSP-Restholzplatten und die Zugzone über eine oder mehrere zusätzliche verklebte Brettlagen sichergestellt (Abbildung 12). Die Richtspannweite für Decken mit Brettlagen in der Zugzone beträgt 4,5 – 6m, die Höhe der Wandelemente 2,5 – 3,5m. Die mit hoher Drucknormalkraft und geringer Biegung beanspruchten Wandbauteile können auch ohne zusätzliches Herstellen einer Zugzone ausgebildet werden (Abbildung 23 bis Abbildung 25). Die Querkraftübertragung erfolgt mit einer verzahnten Ausbildung der Kontaktstöße der BSP-Restholzplatten.

Die Decken- und Wandkonstruktionen werden projektabhängig im Werk als transportfertige Paneele von 80 cm bis 2,50 m Breite vorgefertigt und auf der Baustelle zu Wänden und Decken zusammengesetzt. Ein Decken- bzw. Wandstreifen besteht aus BSP-Restholzplatten, die nach der Bearbeitung in der Portalbearbeitungsanlage mit Fremdfedern aus Buchen-FSH ausgerichtet werden. Durch die abwechselnd verschränkte Anordnung der Fremdfedern entsteht eine Keilwirkung, die die Fugen zwischen den Elementen formschlüssig schließen soll, was für die Druckkraftübertragung innerhalb der Elemente von größter Bedeutung ist. Anschließend wird bei der Deckenvariante mit zusätzlichen Brettlagen in der Zugzone der Deckenstreifen mit einer oder mehreren Brettlagen im Pressbett verklebt (Abbildung 12).

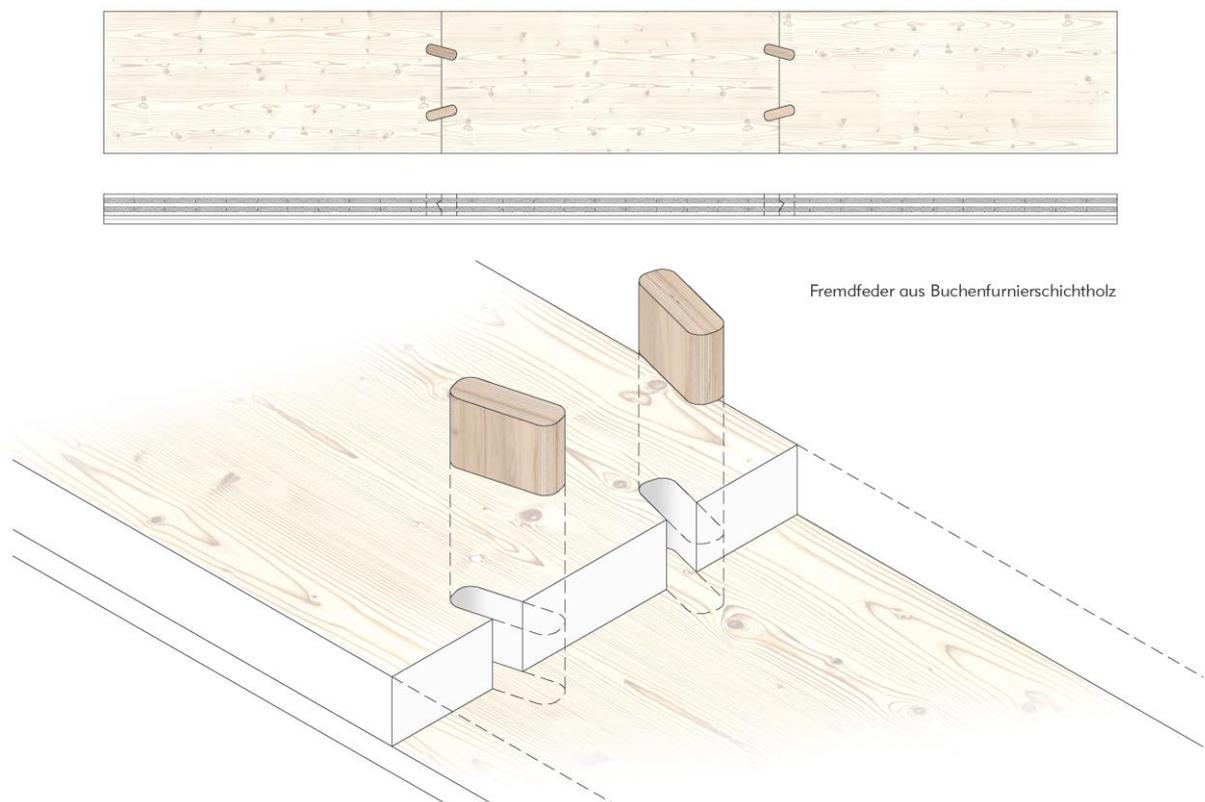


Abbildung 12: Deckenträger aus BSP-Restholzplatten und zusätzlicher Brettlage in der Zugzone

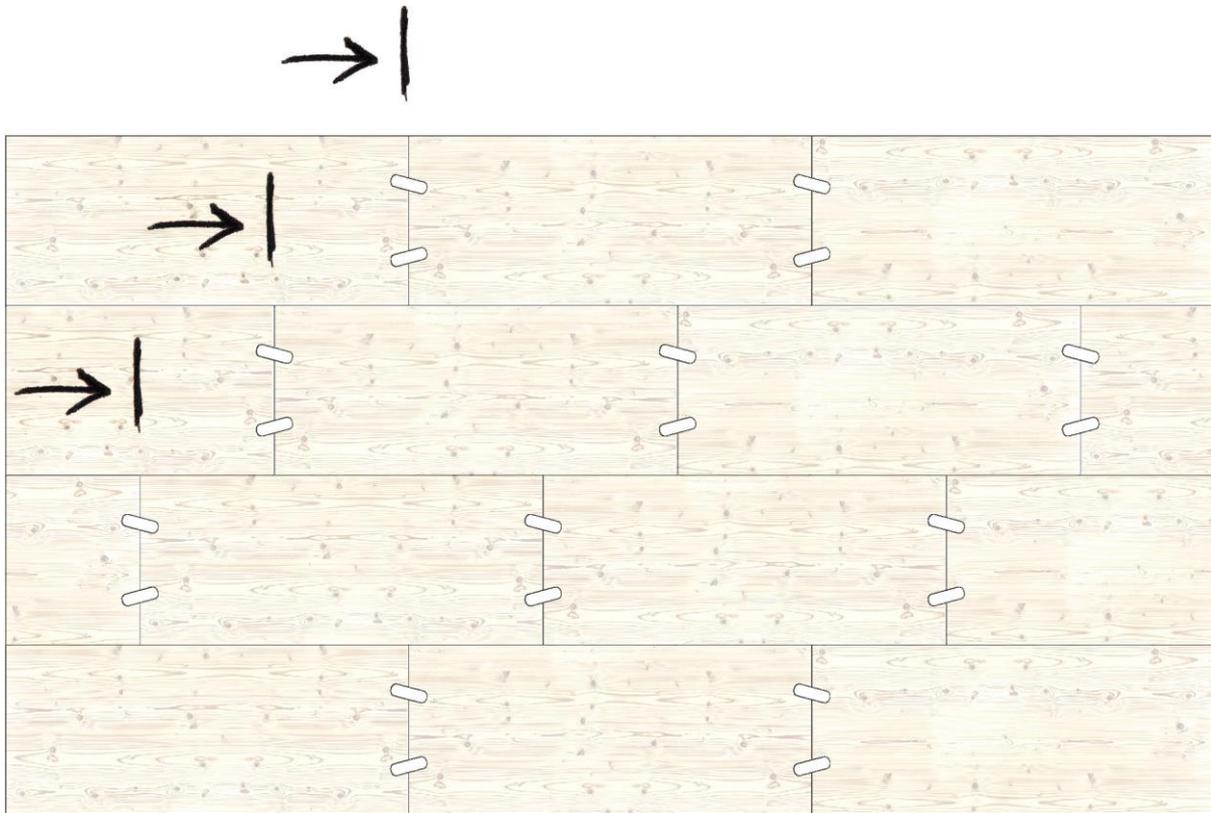


Abbildung 13: Stoßfugenversatz in den Deckenplatten

Da der Stoß der einzelnen BSP-Reststücke im Deckenträger eine Schwachstelle darstellt, wird die Lage der Stöße zwischen den Trägern so verschoben, dass die Fugen nicht nebeneinander in einer Linie liegen.

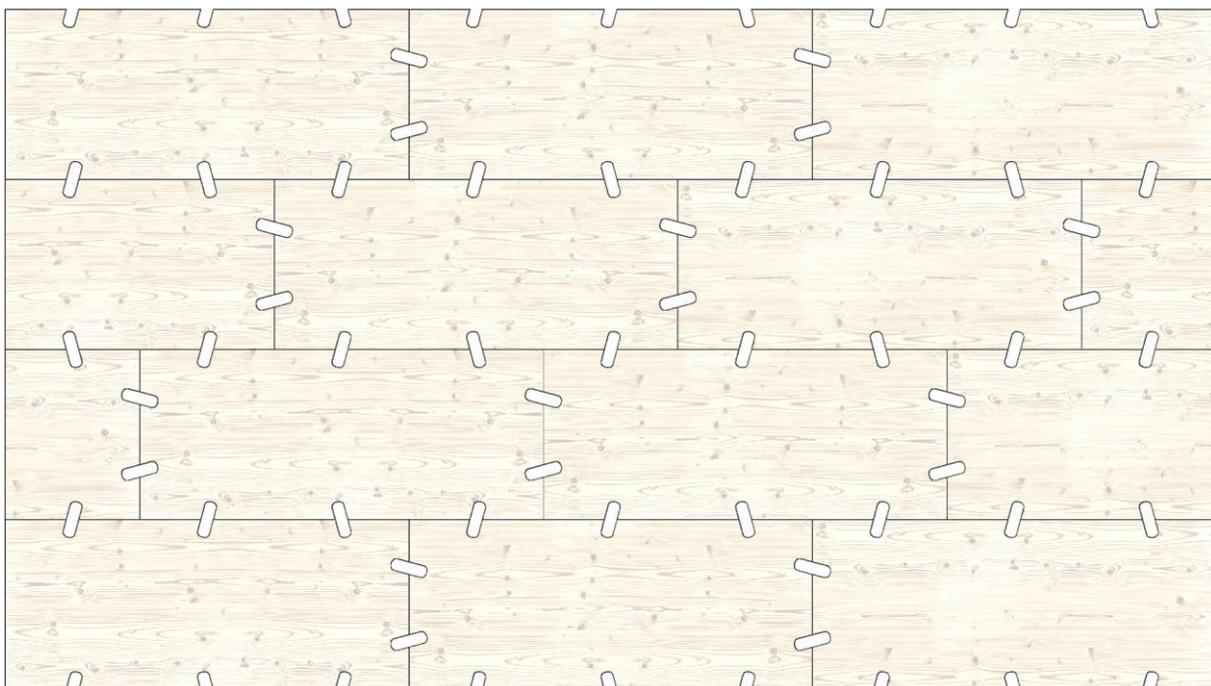


Abbildung 14: Fräsbild für Längsschubverstärkung mithilfe von Fremdfedern aus Buchen-FSH bei Wänden und aussteifenden Decken

Zur Übertragung der Längsschubkräfte und somit zur Erzielung einer Scheibentragwirkung, werden Fremdfedern entlang der seitlichen Ränder eingebracht. Diese Art der Verstärkung wurde bereits von Schmidt und Blaß am KIT untersucht (s. Fußnote 6 Seite 12). Die wesentlichen Ergebnisse werden nachfolgend angegeben.

- Mit den derzeitigen Verbindungstechniken, wie schräg eingedrehten Vollgewindeschrauben oder Fremdfedern mit stiftförmigen Verbindungsmitteln, werden lediglich 10 – 20% der Schubtragfähigkeit des BSP erreicht.
- Die Schertragfähigkeit der Verbindungen, wie sie auch in diesem Forschungsprojekt Verwendung finden (Abbildung 10), ist duktil. Das Last-Verformungsverhalten der Verbindungen wurde bestimmt, indem kleinformative Druckscherversuche mit jeweils 4 Verbindungen auf eine Probenlänge von 1 m (Verbindungsmittelabstand 25 cm) durchgeführt wurden. Dazu wurde der Prüfkörper um 10° zur Vertikalen geneigt und damit zusätzlich querdruckbeansprucht.
- Die so ermittelte Schubtragfähigkeit der keilförmig eingebrachten Kontaktverbindungen mit Fremdfedern aus B-FSH übersteigt die Schubtragfähigkeit des Bruttoquerschnitts eines ungeschwächten BSP-Elementes. Auf dem Niveau von 5 %-Quantilwerten ist die Tragfähigkeit der Verbindung rechnerisch höher, als die des Werkstoffes (112% der charakteristischen Schubtragfähigkeit im Bruttoquerschnitt des BSP)⁶. Als Erklärung für die erhöhte Schubtragfähigkeit nennen Schmidt und Blaß die sich laststeigernd auswirkende Schmalseitenverklebung der Längslagen aus optischen Gründen, die allerdings nicht tragend angesetzt werden darf⁷.

3.4.2 Herstellung mit Portalbearbeitungsanlage (PBA)

Für die effiziente Aufbereitung der Produktionsabfälle, schlagen wir vor, diese direkt während der Herstellung der eigentlichen Wandelemente zu bearbeiten. Um ein Aufspannen des Werkstücks zu ersparen, wird zuerst das brauchbare Reststück, während es noch mit dem BSP-Paneel verbunden ist, mit allen Merkmalen wie Querkraftverzahnungen und Taschen für die Fremdfedern versehen. Anschließend wird das Reststück freigeschnitten – die Bearbeitung in der PBA für das weitere Recycling ist somit abgeschlossen. Als letzter Arbeitsschritt wird die Herstellung der eigentlichen Tür- bzw. Fensteröffnung durchgeführt (Abbildung 15 bis Abbildung 18).

Falls die Verzögerung der Produktion durch die zusätzlichen Arbeitsschritte aus wirtschaftlichen Gründen unzulässig ist, schlagen wir vor, die Bearbeitung von Reststücken mit einem Roboterarm außerhalb der PBA zu erledigen (s. Abbildung 19). Dies wird allerdings zusätzlichen Aufwand durch das Aufspannen und Positionierung der Produktionsabfälle bedeuten.

Die Wirtschaftlichkeit der beiden Lösungen hängt sehr stark von den Produktionsbedingungen und Möglichkeiten der jeweiligen BSP-Hersteller ab und muss separat untersucht werden.

⁷ ETA-11/0210. (gültig bis 5. Juli 2016). Massives plattenförmiges Holzbauelement zur Verwendung als tragendes Bauteil in Bauwerken. Merkle BSP, Nersingen-Oberfahlheim.

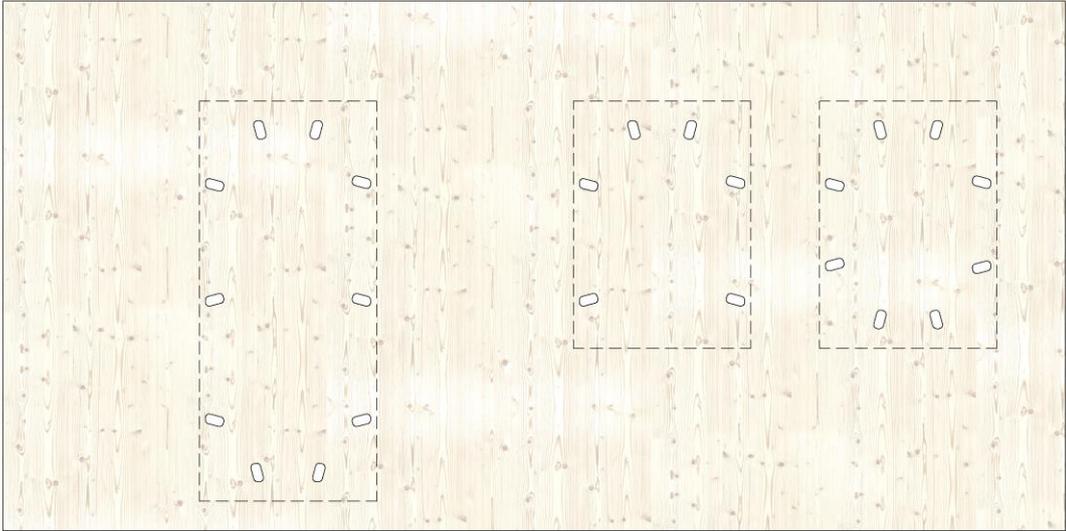


Abbildung 15: Schritt 1: Fräsen der Taschen für die Fremdfedern (Schubkraftübertragung)

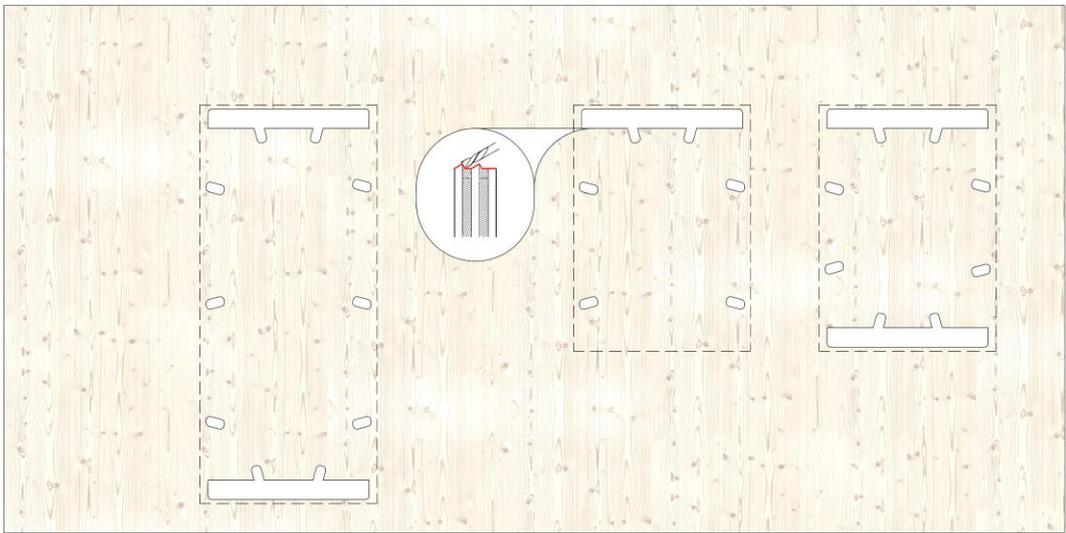


Abbildung 16: Schritt 2: Fräsen der Verzahnung für die Querkraftübertragung

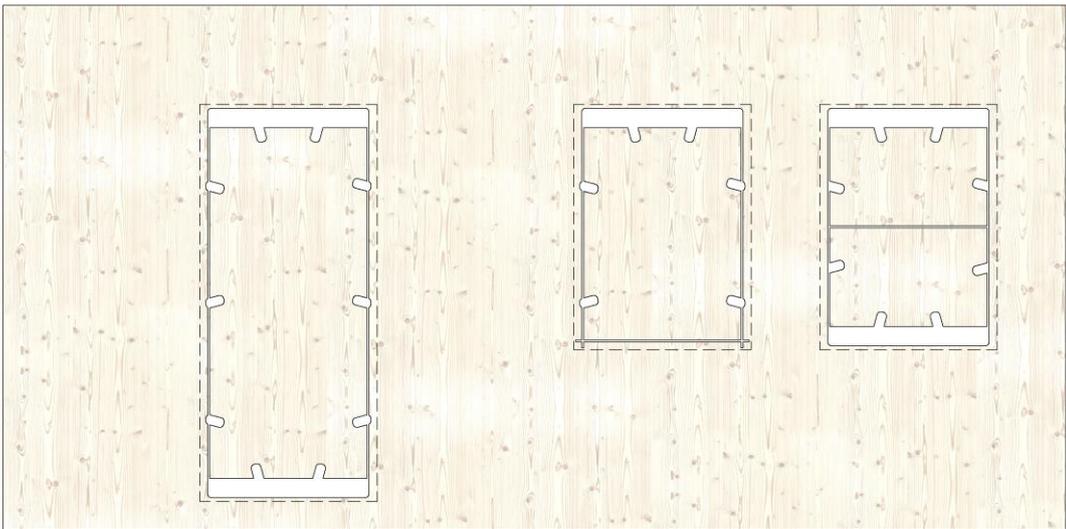


Abbildung 17: Schritt 3: Sägen - Freischneiden von wiederverwendbaren Bauteilen

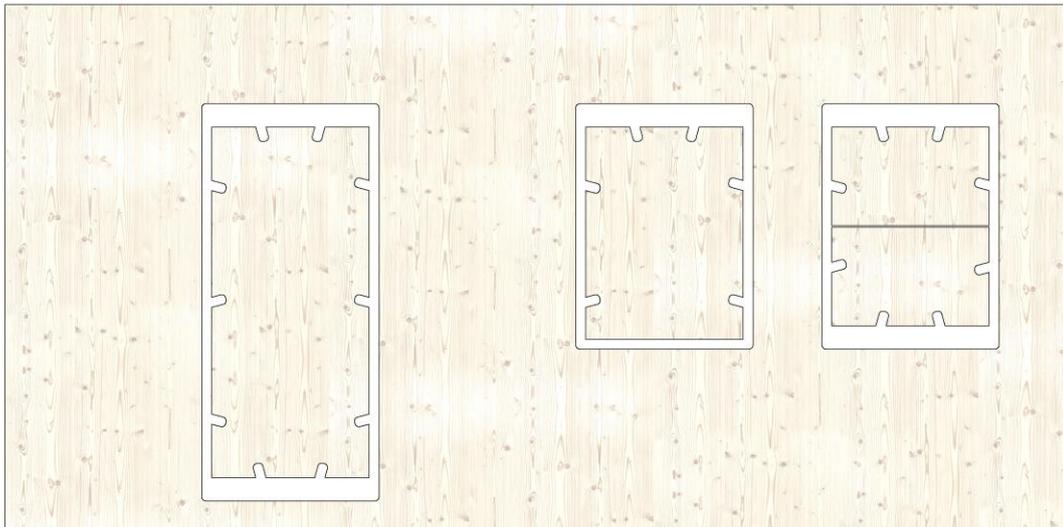


Abbildung 18: Schritt 4: Fräsen/Sägen - Herstellen der eigentlichen Tür/Fensteröffnungen



Abbildung 19: Bearbeitung mit Roboterarm (alternativ)

3.4.3 Holzbalkendecke für große Spannweiten

Für Deckenspannweiten über 6,5 m werden Holzbalkendecken untersucht (Abbildung 20). Die Balken aus Brettschichtholz (BSH) werden oberseitig zur Fixierung und Auflagerung der BSP-Restholzplatten ausgeklinkt. Mit Hilfe von Holzkeilen aus Buchen-FSH werden die BSP-Platten auf die BSH-Balken schubfest aufgeschraubt. Damit werden die BSP-Platten zur Lastabtragung mit herangezogen. Gleichzeitig erhöht sich die Gesamtsteifigkeit der Decken. Das Tragverhalten kann durch die Höhe der BSH-Balken eingestellt werden. Der Zuschnitt der BSP-Restholzplatten erfolgt im Werk, der Schubverbund mit den BSH-Balkenlagen erfolgt vor Ort.

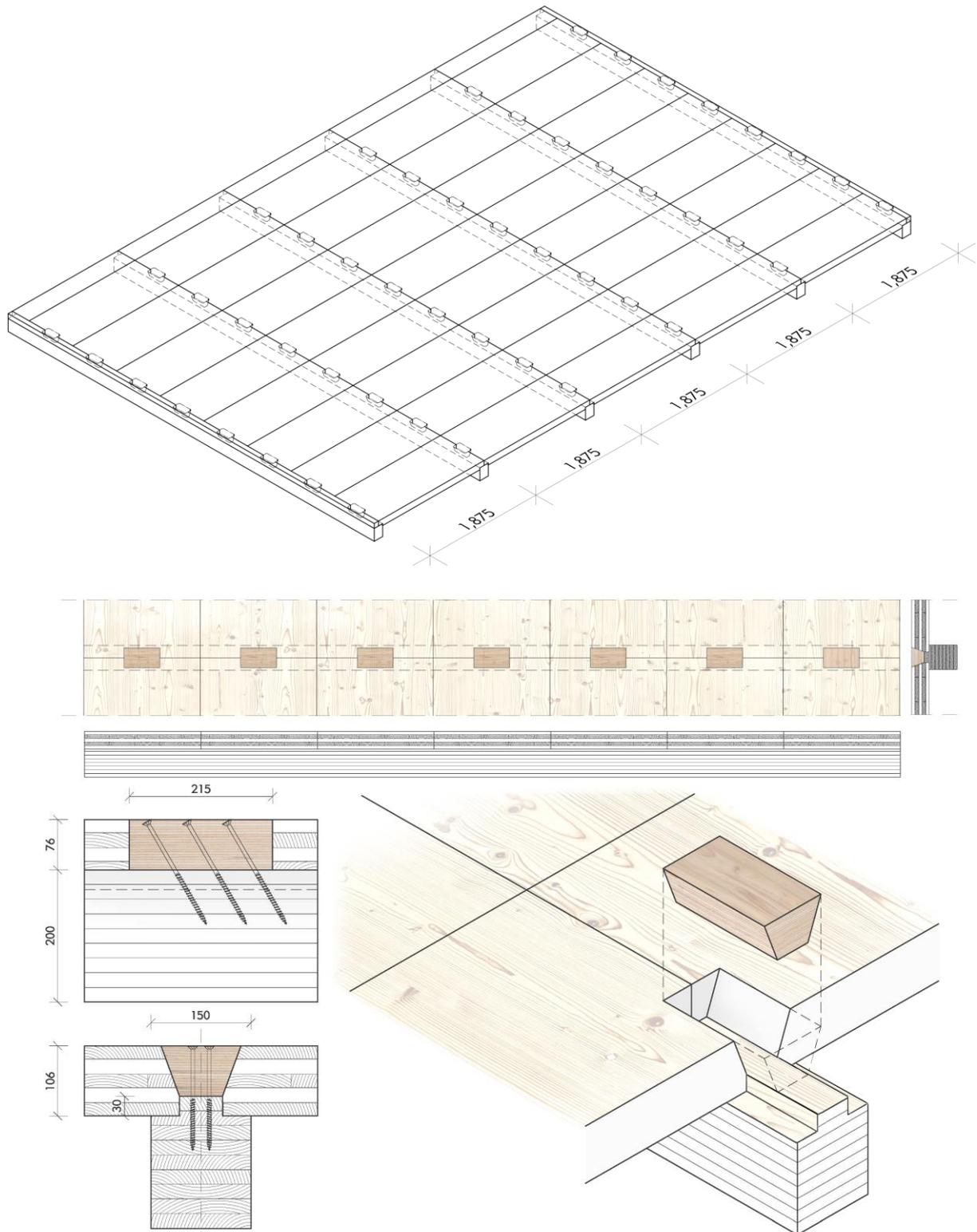


Abbildung 20: Holzbalkendecke aus schubfest mit den BSH-Balken verbundenen BSP-Restholzplatten

3.4.4 Deckenaufbauten

Um den Anforderungen an das Schwingungs-, Brand- und Schallschutzverhalten der entwickelten Tragstrukturen anzupassen, ist ein zusätzlicher Aufbau erforderlich, der den üblichen Deckenaufbauten im Holzbau entspricht und die Anforderungen an Geschossdecken für Wohn- und Bürogebäude erfüllt (bis Gebäudeklasse 4). Dieser besteht z. B. aus Splittbeschwerung, Trittschalldämmung und Anhydrid-

/Zementestrich, sowie einem gewünschten Fußbodenaufbau (Abbildung 21 – dargestellt ist ein Aufbau mit Zementestrich und Parkettbodenbelag). Die hohe BSP-Platte hat den zusätzlichen Vorteil, dass sie als F30-Decke auf Abbrand gerechnet werden kann. Eine Alternative als BSP-Beton-Verbunddecke ersetzt die Splittbeschwerung und kann im Verbund mit der BSP-Konstruktion das Tragverhalten verbessern.

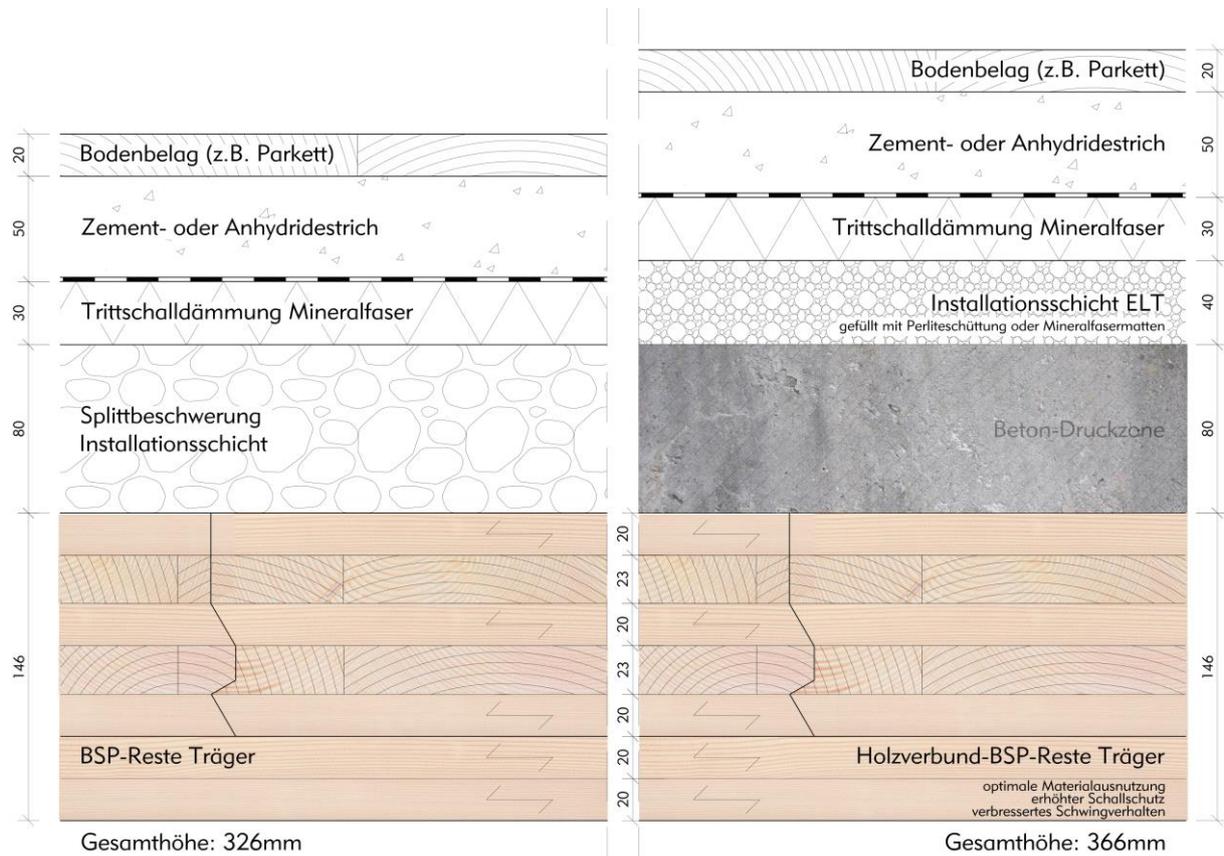


Abbildung 21: Schichtaufbau einer BSP-Restholzplatten-Decke mit Splittbeschwerung bzw. BSP-Beton-Verbunddecke

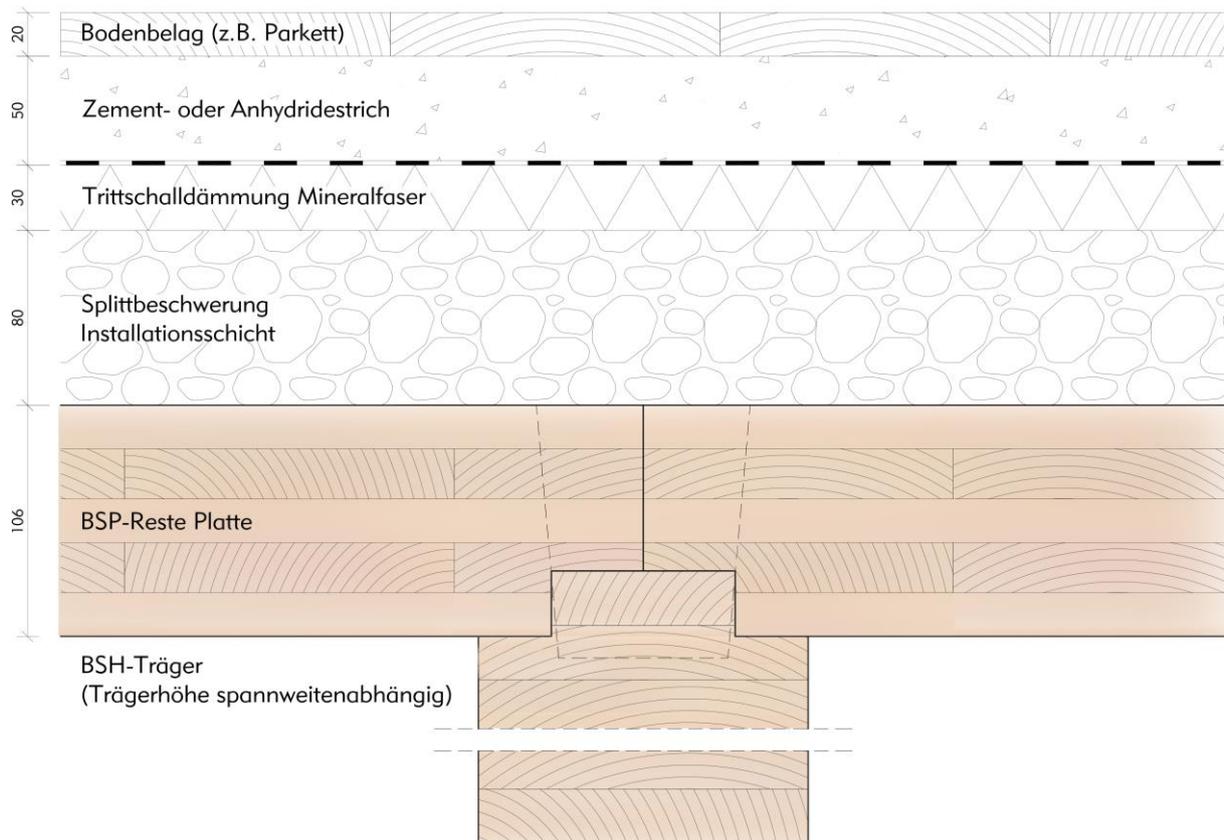


Abbildung 22: Schichtaufbau einer BSP-Restholzplatten-Balken-Decke mit Splittbeschwerung

3.4.5 Wandaufbauten

Die Wandelemente aus Brettsperrholzresten können sowohl als tragende Außen- wie auch als Innenwände eingesetzt werden. Bei Verwendung als Außenwand ist der bauphysikalisch notwendige Aufbau aus Dampfbremse/Luftdichtung, Dämmschicht und Witterungsschutz außenseitig aufzubringen. Analog zu herkömmlichen Konstruktionen aus BSP-Tafeln kann ein robuster, langlebiger und reversibler Aufbau als hinterlüftete Fassadenkonstruktion (Abbildung 24) aufgebaut werden. Je nach Anforderung an Brand- und Schallschutz kann die Ebene der Dampfbremse/Luftdichtung als ein- oder zweilagige Beplankung aus Gipsfaserplatten ausgeführt werden. Die Materialisierung der Fassadenbekleidung ist nicht festgelegt und folgt gestalterischen Anforderungen sowie den Vorgaben des Brandschutzes.

Bestehen bei Innenwänden neben der Funktion als Raumtrennwände keine weiteren Anforderungen, können die Wandtafeln aus Brettsperrholzresten unverkleidet und sichtbar eingesetzt werden (Abbildung 23). Zur Nutzung als Raumtrennwände mit Brandschutzanforderungen können die Wandtafeln aus Brettsperrholzresten ein- oder zweifach (z. B. mit Gipsfaserplatten) beplankt werden (Abbildung 25). Die Anforderungen an Wohnungstrennwände erreichen sie nur mit Beplankung aus Gipskarton-/Gipsfaserplatten und als zweischalige Konstruktion, z. B. mit einer frei stehenden bzw. schwingbügelgelagerten Vorsatzschale (Abbildung 24).



Abbildung 23: Bei Innenwänden können die Wandtafeln aus Brettsperrholzresten unverkleidet und sichtbar eingesetzt werden

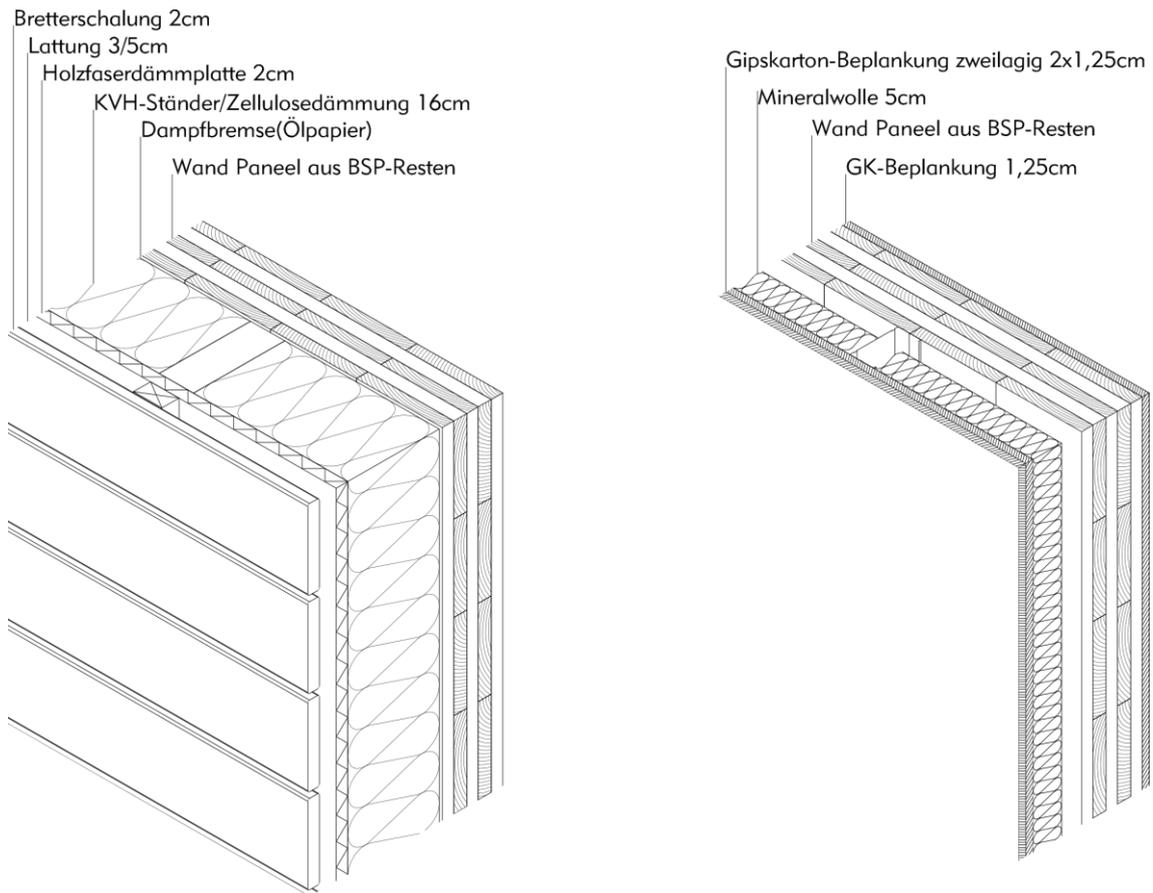


Abbildung 24: Schichtenaufbau einer BSP-Restholzplatten-Außenwand (links) und Wohnungstrennwand (rechts)

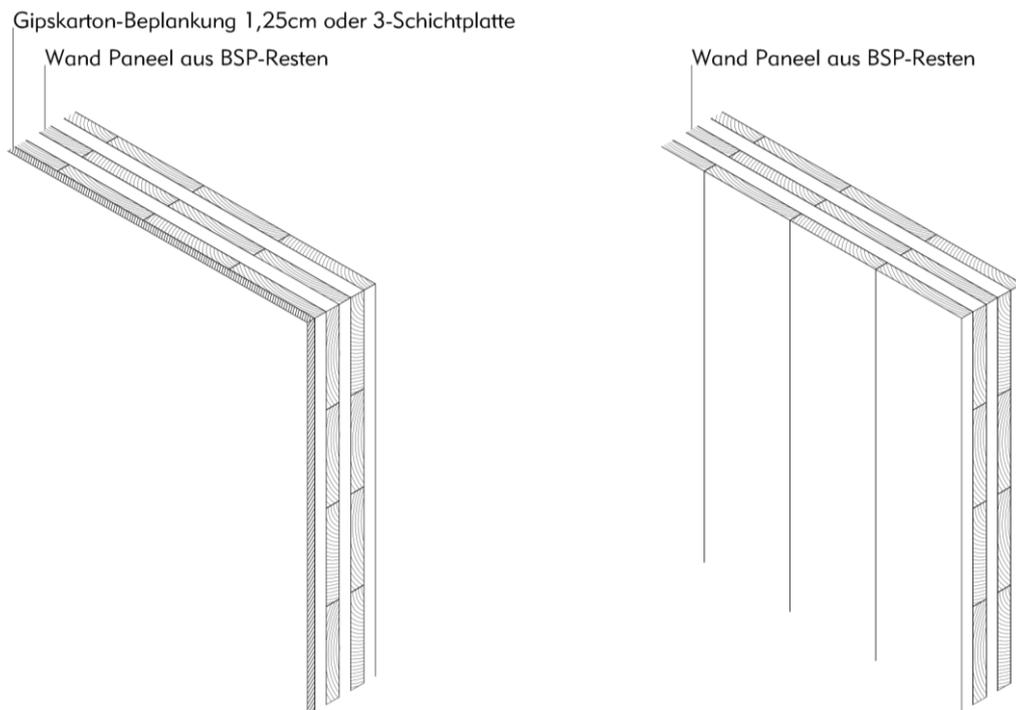


Abbildung 25: Schichtenaufbau einer BSP-Restholzplatten-Innenwand als Rauntrennwand. Links: mit Brandschutzanforderung (Begrenzung der Rauchdurchlässigkeit) und rechts: Innenwand als Rauntrennwand ohne weitere Anforderungen

Die zusammengesetzten Wände müssen selbstverständlich nicht nur aus Brettsper Holzresten bestehen, eine Kombination aus herkömmlichen BSP-Platten und BSP-Resten wäre hier sehr vorteilhaft. Auf diese Weise kann man die bewährte Wirtschaftlichkeit von BSP mit dem ökologischen Aspekt des Recyclings verbinden. Dabei werden die Brettsper Holzreste in den Bereichen eingesetzt, die Wandöffnungen wie Fenster und Türen, vorsehen.

Der Wand-Deckenanschluss kann über eine reversible Lösung erfolgen. Am Beispiel einer Balkendecke wird in Abbildung 26 dargestellt, wie in einem im Ausbauzustand verdeckten Verbindungselement Zug- und Schubkräfte aufgenommen werden können und wie die Montage erfolgen kann. Der Buchenurnierschichtholzkeil wird mit Hilfe z. B. von Rampamuffen und Gewindestangen im BSH-Balken montiert, bildet damit einen Schubverbund zwischen BSP-Restholzplatten und BSH-Deckenbalken aus und beinhaltet gleichzeitig den Zuganschluss für die BSP-Restholz-Wand. Die Schubkräfte werden über den Formschluss von dem überstehenden Buchen-FSH-Keil und einer passgenauen Ausklinkung in der Wand aufgenommen. Dieses Detail dient auch als Positionierungshilfe während der Montage. Analog wird auch mit dem oberen Anschluss der Wand verfahren.

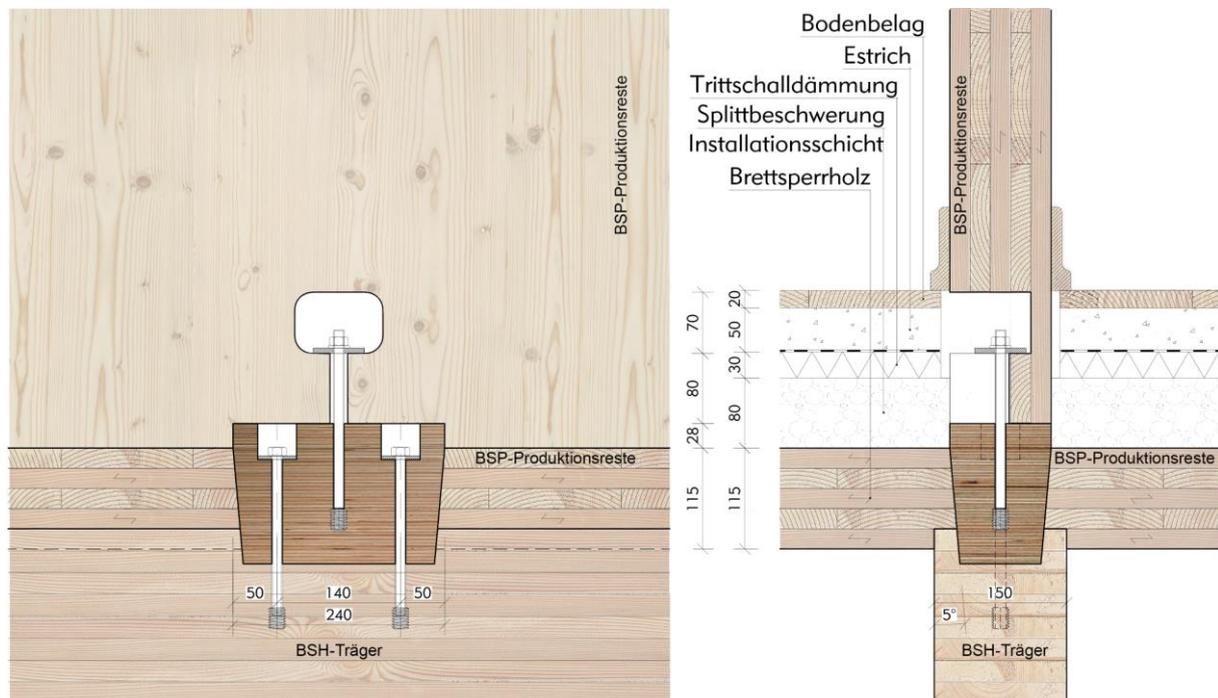


Abbildung 26: Zug/Schubanschluss einer BSP-Restholz-Wand an eine BSP-Balkendecke mit BSP-Restholzplatten BSP 115W-5

4. Experimentelle und analytische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Scheiben- und Deckensystemen

Die Lage der Stöße der aus Einzelplatten zusammengesetzten Wand- und Deckenelemente beeinflussen die Querkrafttragfähigkeit und die Biegetragfähigkeit. Die Bemessung der zusammengesetzten Plattentragwerke kann daher nicht wie die Bemessung ungestoßener Standardkonstruktionen aus Brettsperholz erfolgen. Die Plattenstöße sind abhängig von den Schnittgrößen Querkraft und Moment anzuordnen. Dazu sind zunächst experimentell die Tragfähigkeiten der Stöße sowohl auf Biegung als auch auf Schub zu ermitteln. Die Lage der Plattenstöße ist in die „Verlegesoftware“ automatisch einzubauen.

Ziel ist der Nachweis, dass die mit Decklagen und Schubnocken verstärkten Platten 106W-5 der Produktionsabfälle wie Standardplatten 106W-5 bemessen werden können. Ein Mehraufwand in der Bemessung soll aus Akzeptanzgründen der Tragwerksplaner für dieses Produkt vermieden werden. Grundsätzlich werden im Weiteren zur Darstellung und Auswertung von Beanspruchungen und Rissbildungen die Brettlagen von unten nach oben durchnummeriert (Abbildung 29).

4.1 Experimentelle Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit der nicht verstärkten und mit Schrauben verstärkten Querkraftstöße

4.1.1 Hintergrund – Kraftfluss und Stabwerkmodell

Für die Querkraftübertragung werden entlang der Stoßkanten der BSP-Restplatten Verzahnungen in Form von Versätzen entwickelt. Im Vorfeld der Versuchsdurchführungen wurde eine Anschlusssimulation mit dem FEM-Programm ANSYS durchgeführt, um die Stellen der Spannungskonzentrationen lokalisieren zu können (Abbildung 27). Damit lassen sich dann realistische Stabwerkmodelle⁸ für die Anschlussbemessung entwickeln.

⁸ Schlaich, J. ; Schäfer, K. (1998): Konstruieren im Stahlbeton. Betonkalender 1998, Teil 2, Ernst & Sohn

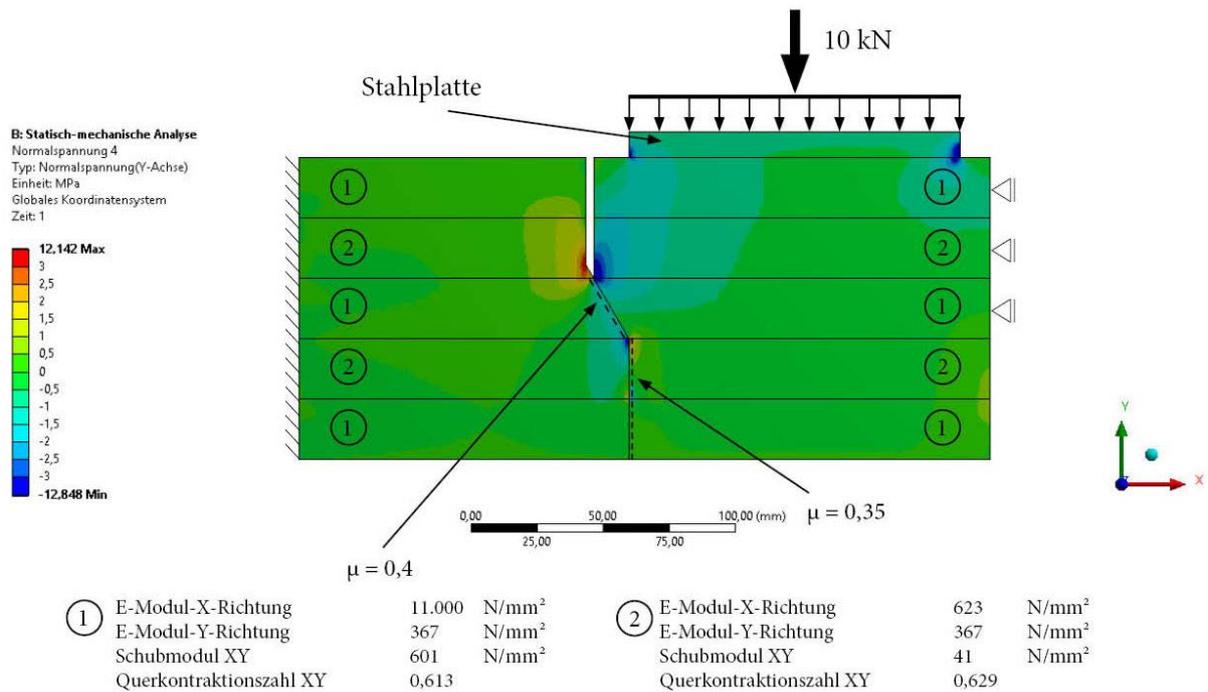


Abbildung 27: In ANSYS durchgeführte Anschlussimulation – Spannungskonzentrationen senkrecht zur Plattentragrung

Grundsätzlich wird die Querkraft über die Druckkontaktfläche der mittleren Brettsperrholzlage übertragen. Die Kontaktfläche ist 30° zur Vertikalen geneigt. Die Druckstrebe steht senkrecht auf der Kontaktfläche, so dass der Kraft-Faser-Winkel 30° beträgt (Abbildung 28).

Im Holzbau ist die Betrachtung des Kraftflusses im unverformten Zustand nicht ausreichend, um die tatsächliche Kraftübertragung im Diskontinuitätsbereich der Verbindung realistisch abzubilden (Abbildung 28). Das liegt am anisotropen Verhalten des Werkstoffes Holz. Geringe Zugbeanspruchungen senkrecht zur Faser, die ein Überschreiten der Querkzugfestigkeit bewirken, führen zur Rissbildung in Faserrichtung. Durch die Rissbildung verändert sich der Kraftfluss, der im Stabwerkmodell berücksichtigt werden muss. Stabwerkmodelle im Holzbau sind – um die Rissbildung berücksichtigen zu können – am verformten System aufzustellen (Abbildung 30).

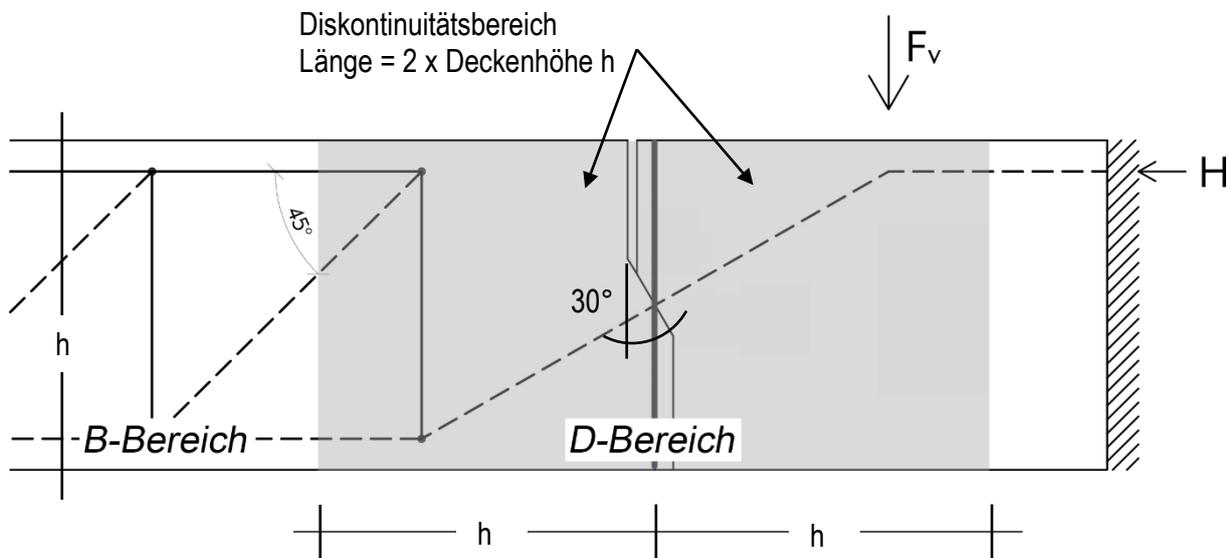


Abbildung 28: Stabwerkmodell für den unverformten Zustand – Annahme einer reibungsfreien Kontaktfläche

Erwartungsgemäß entsteht im verformten System hohe Querkzugspannung im unbelasteten oberen Bereich der schrägen Ausklinkung des Teils A. Diese führen zum Querkzugversagen infolge der Überschreitung der Querkzugfestigkeit von Fichtenholz und damit zu horizontalen Rissbildungen (Abbildung 29). Grund für die Querkzugbeanspruchung ist, dass der obere Teil belastungsfrei ist und sich daher nicht zum belasteten unteren Bereich verformungsaffin verhält. Der belastete untere Bereich zwingt den oberen Bereich sich nach unten zu biegen, wodurch Querkzug entsteht. Über verfeinerte Stabwerkmodelle (Abbildung 30) lassen sich diese vertikalen Zugkräfte im Anschlussbereich anschaulich darstellen. Die Rissbildung entsteht immer am Übergang von belastetem zu unbelastetem Bereich.

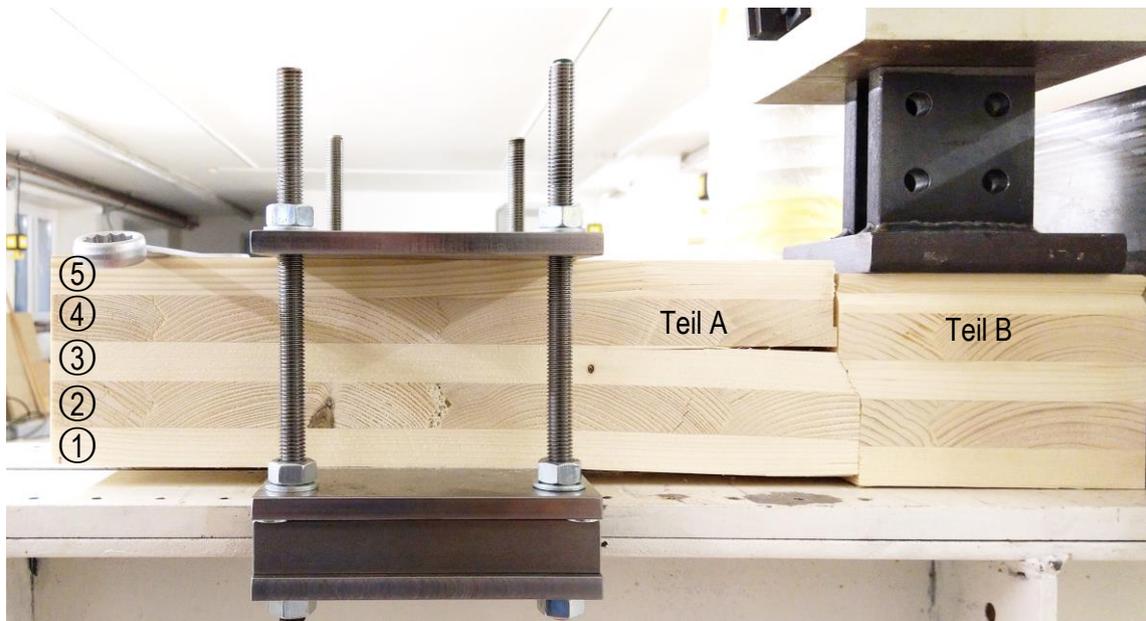


Abbildung 29: Versuchsaufbau 1 – typisches Querkzugversagen des Querkraftstoßes; Nummerierung der Brettlagen

Durch die Anordnung von zugbeanspruchten Schrauben an der Stelle der vertikalen Zugbeanspruchung aus dem Stabwerkmodell wird eine Laststeigerung möglich. Daher werden in einem weiteren Schritt Querkzugverstärkungen vorgenommen, um die Querkrafttragfähigkeit zu steigern.

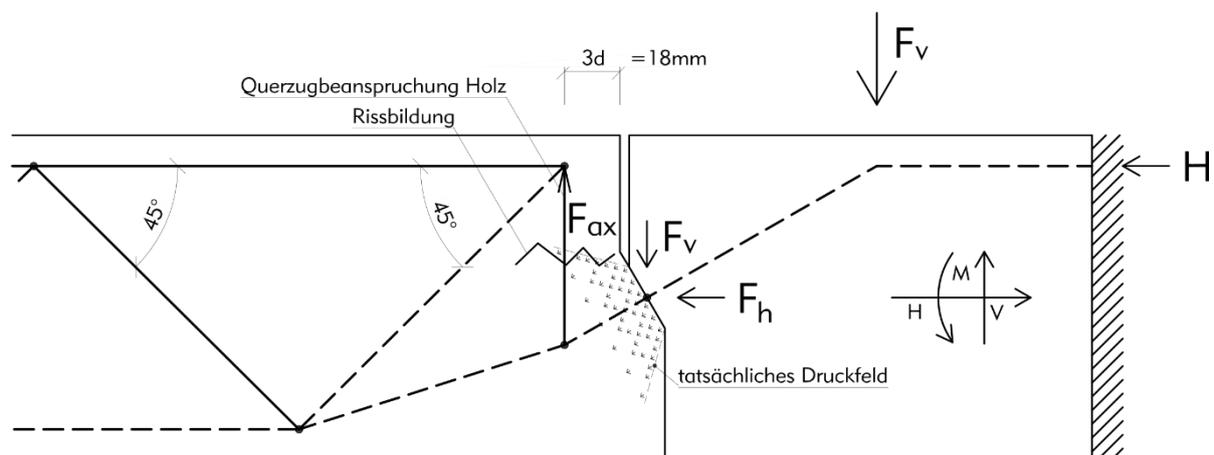


Abbildung 30: Stabwerkmodell für den verformten Zustand – Annahme einer reibungsfreien Kontaktfläche

4.1.2 Versuchsbeschreibung

Die Prüfungen fanden an einem weggesteuerten Zweisäulenprüfrahmen (Marke Wekob) mit $F_{max} = 50$ kN im T-Lab der Technischen Universität Kaiserslautern statt. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 2 mm/min, die Messfrequenz lag bei 50 Hz. Gemessen wurde die Bruchlast F_{max} und die Verformungen an der Lastaufbringung. Die Belastung erfolgte durch linearen Vorschub. Die Prüfung wurde bei einem Lastabfall von 25% abgebrochen. In jeder Versuchsreihe wurden jeweils 10 Prüfkörper aus BSP 106W-5 mit 100mm Breite geprüft. Die Holzfeuchte der Brettsperrholzquerschnitte wurde mittels elektronischer Widerstandsmessmethode auf 10% bestimmt.

Der Versuchsaufbau für die Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit ist in Abbildung 31 dargestellt. Der Probekörper besteht aus 2 Teilen. Teil A ist horizontal eingespannt und krägt aus der Einspannung 125mm heraus, Teil B ist zwischen Teil A und einem vertikalen Stahlwinkel positioniert, so dass Teil B nur vertikal unter Krafteinwirkung (F) der Prüfmaschine am Stahlwinkel entlang gleiten kann. Der Wegaufnehmer ist mit der Krafteinwirkung gekoppelt und wirkt auf Teil B.

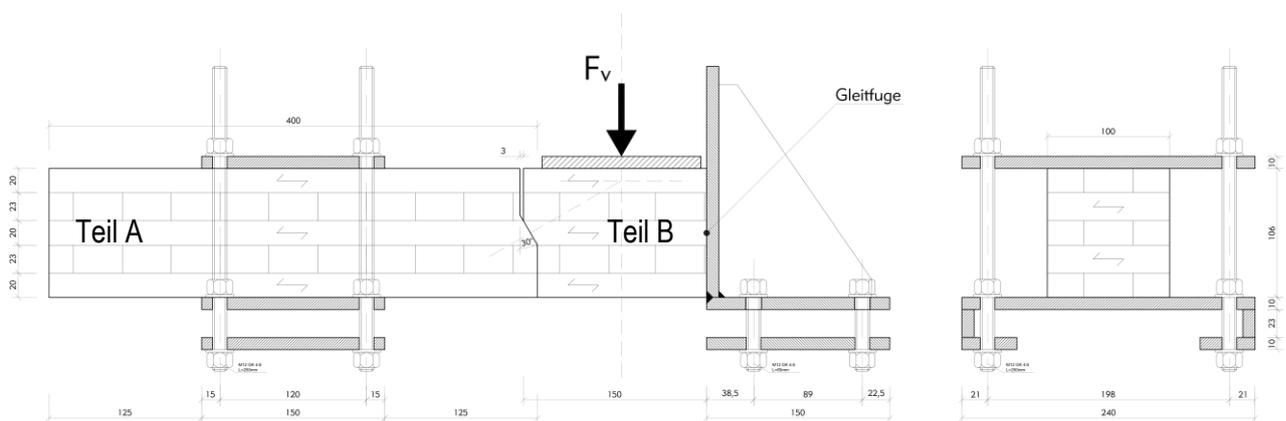


Abbildung 31: Scherversuch Querkraftübertragung

Die Kontaktfläche die beiden Teile ist mit 30° zur Vertikalachse geneigt, um die Querkräfte von Teil B auf den Teil A zu übertragen. Die Neigung der Kontaktfläche ist dabei so angeordnet, dass die Querkraftabtragung über Druckdiagonalen durch die Kontaktfläche hindurch gewährleistet ist (vergleiche Stabwerkmodelle Abbildung 28 und Abbildung 30) und die über die Druckfläche übertragbare Kraft möglichst hoch wird. Außerdem wurden in der Versuchsanordnung die beiden Teile A und B oberhalb der schrägen Kontaktfläche um 3 mm voneinander getrennt, um einen horizontalen Druckkontakt im Zuge der Bauteilverformungen zu vermeiden. Der Stahlwinkel verhindert das Abgleiten von Teils B auf der Kontaktfläche.

Um die Effizienz einer Querzugverstärkung zu untersuchen, werden die Querkraftstöße mit Schrauben in Querzugrichtung verstärkt und mit den nicht verstärkten Querkraftstößen verglichen. Durchmesser und die Lage der Schrauben werden variiert.

Versuchsreihe	Verstärkungsmittel (Anzahl × Durchmesser × Länge)	Winkel	Abstand zum beanspruchten Rand	Probenanzahl
Versuchsreihe 1	keine	-	-	10
Versuchsreihe 2	Vollgewindeschrauben (2×8mm×80mm)	0°	5d (40 mm)	10
Versuchsreihe 3	Tellerkopfschrauben (3×6mm×100mm)	0°	3d (18 mm)	10

Abbildung 32: Übersicht der Versuchsreihen – ohne Verstärkung und mit Schrauben verstärkter Querzug

4.1.3 Untersuchungsergebnisse Querkrafttragfähigkeit



Abbildung 33: Übersicht Scherversuche. Laststeigerung bei querzugverstärkten Querschnitten. Tendenzielle Last-Verformungskurven jeweils aus den 10 Versuchen. Blaue Kurve: Versuchsreihe 3 (Abbildung 37), Braune Kurve: Versuchsreihe 2 (Abbildung 36), Grüne Kurve: Versuchsreihe 1 (Abbildung 35)

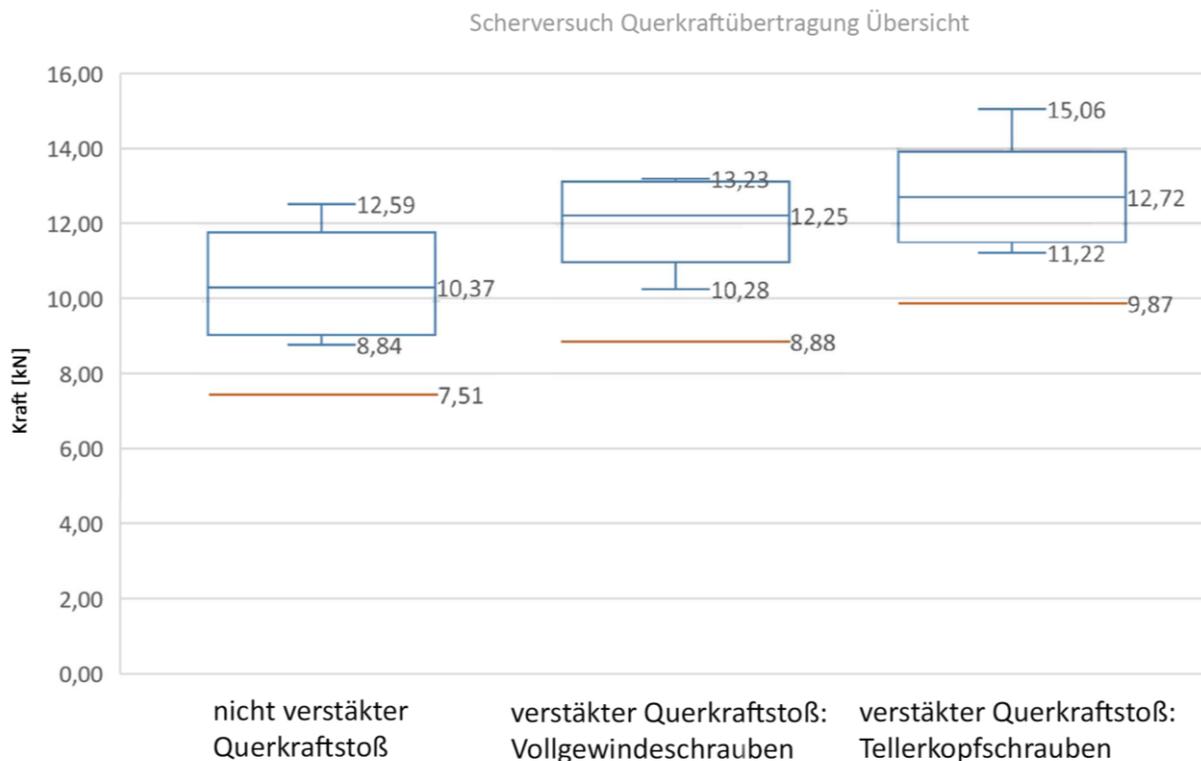


Abbildung 34: Übersicht der Scherversuche der nicht verstärkten und mit Schrauben verstärkten Querkraftstöße, mit max-, mean-, min-Werten und 5%-Fraktilewerten

Die nicht verstärkten Prüfkörper (Versuchsreihe 1) erreichen einen Mittelwert von 10,4kN (zwischen 8,8 und 12,6kN), bevor sprödes Querzugversagen in der Fuge zwischen der 4. und 5. Brettlage eintritt. Die Mittelwerte der jeweiligen Probenumfänge werden an den Last-Verformungsstellen der Rissbildungen durch Querzug ermittelt (Stellen der Lastabfälle in Abbildung 33). Dabei stellen wir fest, dass das Versagen grundsätzlich in der Fuge zwischen Quer- und Längslage oberhalb der Lasteinleitung entsteht (Abbildung 35).

Um dem entgegen zu wirken, wurde eine erste Versuchsreihe mit querzugverstärkten Querschnitten durchgeführt (Versuchsreihe 2). Hier wurden jeweils 2 Spax 8 x 80 Vollgewindeschrauben mit Tellerkopf

eingeschraubt. Zum Rand der Querkraftübertragung wurde ein Abstand von $5d$ vorgesehen, zum unbeanspruchten Seitenrand jeweils $3d$. Der Riss infolge des Querkzugversagens ist auch hier an gleicher Stelle wie bei den unverstärkten Probekörpern eingetreten (Abbildung 36). Außerdem konnte durch das Querkzugversagen auch ein sprödes Verhalten mit plötzlichem Lastabfall festgestellt werden (Abbildung 33). Nach dem Querkzugversagen ist zusätzlich Rollschubversagen in der unteren Querlage aufgetreten, da die Tellerkopfschrauben mit 80 mm Länge zu kurz waren – das Schraubengewinde muss bis in die unterste Brettlage geführt werden (Abbildung 36). Der Mittelwert erreicht $12,2\text{ kN}$, die Streuung der Ergebnisse hat sich verringert und liegt zwischen $10,3$ und $13,2\text{ kN}$. Es lässt sich auch feststellen, dass die charakteristische Festigkeit der nach Variante 2 verstärkten und der unverstärkten Probekörper (braune und grüne Linie in Abbildung 33) annähernd gleich sind, d. h. dass der Randabstand mit $5d$ zu groß ist.

Da das Querkzugversagen noch immer maßgeblich die Festigkeit beeinflusst, wurde eine zusätzliche Versuchsreihe 3 durchgeführt, die mit Teilgewindeschrauben im Abstand von $3d$ zum Rand des Querkraftstoßes verstärkt wurden. Da das Teilgewinde durch den entstehenden Querdruck unter dem Tellerkopf eine gewisse Vorspannung erzeugt und die 3., 4. und 5. Brettlage zusammendrückt, ist das Querkzugversagen nur in wenigen Probekörpern aufgetreten. Eine Rissbildung in den unteren Brettlagen konnte auf diese Weise komplett vermieden werden. Stattdessen hat die lastbeanspruchte Hälfte (Teil B) des Probekörpers auf Querdruck versagt – die 1., 2. und 3. Brettlage wurden zusammengedrückt und die Fuge zwischen der 3. und 4. Brettlage versagte auf Querkzug (Abbildung 37). Damit lässt sich im Kraft-Verformungsdiagramm (Abbildung 33) der Kraftabfall begründen, da am Teil B der Verformungsmesser angebracht wurde. Die Tragfähigkeit ist nochmals bis auf $13\text{-}14\text{ kN}$ gestiegen, der Mittelwert beträgt $12,7\text{ kN}$ (Abbildung 34). Außerdem ist ein deutlich ausgeprägtes plastisches Verhalten der Stoßverbindung festzustellen – die Verbindung ist duktil. Daraus kann man folgern, dass sprödes Versagen der Verbindung durch die plötzliche Rissbildung bei Überschreitung der geringen Querkzugfestigkeit mit Anordnung von Tellerkopfschrauben mit Teilgewinde nach Versuchsreihe 3 vermieden werden kann.



Abbildung 35: Verformungen und Bruchbilder bei nicht verstärktem Querkraftstoß (Versuchsreihe 1)



Abbildung 36: Verformungen und Bruchbilder von 2 Versuchen mit verstärktem Querkraftstoß (Versuchsreihe 2): Vollgewindeschrauben 2 x 8x80 vg



Abbildung 37: Verformungen und Bruchbilder von 2 Versuchen mit verstärktem Querkraftstoß (Versuchsreihe 3): Tellerkopfschrauben 3 x 6x100 tg

4.2 Experimentelle Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit der mit geriffelten Buchen-Rundholzdübeln verstärkten Querkraftstöße

4.2.1 Hintergrund

Die Versuchsreihen mit stählernen querzugverstärkten Querschnitten haben bewiesen, dass das Problem der geringen Querkrafttragfähigkeit in Brettsperrholz durch die Anordnung von Tellerkopfschrauben überwunden werden kann. Die Tellerkopfschrauben können das Querkraftversagen effektiv vermeiden, aber die mit Tellerkopfschrauben verstärkten BSP-Stöße sind bei den weiteren Verarbeitungen problematisch, wie beispielsweise Abbildung 38 zeigt. Die über die BSP-Oberfläche hinausstehenden Schraubenköpfe verhindern die sinnvolle Weiterbearbeitung sowohl in der Oberflächenbearbeitung (Hobeln, Sägen, Fräsen) als auch in der Verstärkung der BSP-Reste durch die Addition weiterer Brettlagen in der Zug- und/oder Druckzone. Eine erste Verbesserung wäre die Verwendung von Zylinderkopfschrauben mit Vollgewinde. Aber auch bei diesen Schrauben wäre eine Oberflächenbearbeitung mit üblichen Holzbearbeitungsmaschinen nur sehr eingeschränkt möglich. Um dieser Problematik entgegenzuwirken, wird nachfolgend die Querkrafttragfähigkeit mit geriffelten Buchen-Rundholzdübeln untersucht und mit den max-, mean-, min-Werten und 5% Fraktilwerten der Schraubverstärkungen verglichen.

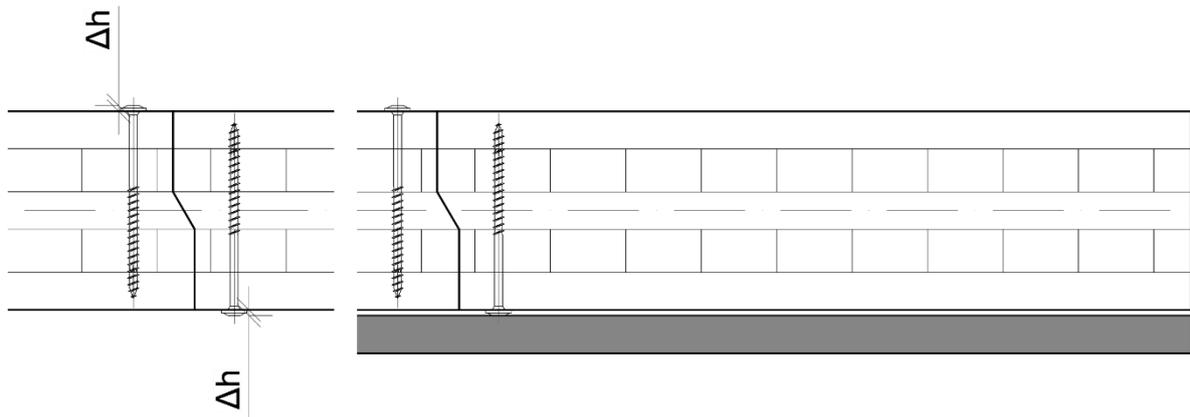


Abbildung 38: Beispiel der Problematik bei Tellerkopfschrauben: links: Höheunterschied, rechts: Spalt zwischen Brettlage und BSP-Restholzplatte

4.2.2 Versuchsbeschreibung

Da wir bei den Schraubverstärkungen festgestellt haben, dass ein geringer Abstand zum BSP-Stoß ein Querzugversagen am effektivsten verhindert, wird für die Buchenholzdübel zu Vergleichszwecken entsprechend der Versuchsanordnung nach Abbildung 39 auch der Abstand von 18mm zum beanspruchten Rand angeordnet. Vier Versuchsreihen mit Buchenholzdübel werden untersucht. Die Durchmesser und die Lage der Buchenholzdübel variieren dabei. (Abbildung 42) In den ersten Versuchsreihen werden vertikale Dübel verwendet (Versuchsreihe 4). In der Versuchsreihe 5, 6 und 7 werden die Buchenholzdübel mit 30° zur Vertikalen ins Holz eingeschlagen. Variiert wird der Durchmesser mit 6mm, 8mm und 10mm. Die Buchenholzdübel der Versuchsreihen 4-7 werden ohne Klebstoff in mit ca. 0,94 x Dübeldurchmesser vorgebohrte Löcher eingeschlagen. In der letzten Versuchsreihe (Versuchsreihe 8 und Abbildung 41) werden vertikal angeordnete Buchenholzdübel mit Phenol-Resorcinol Klebstoff Aerodux 185 eingetrieben.

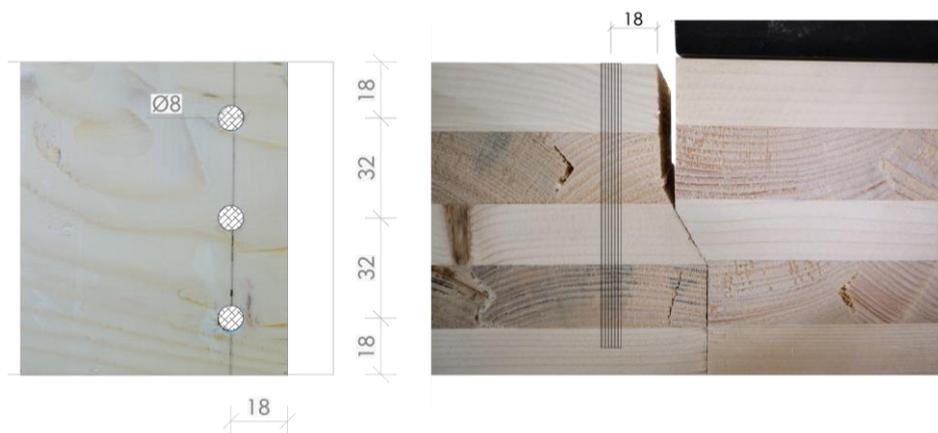


Abbildung 39: Verstärkter Querkraftstoß: Buchendübel 3x8x100 / vertikale Anordnung

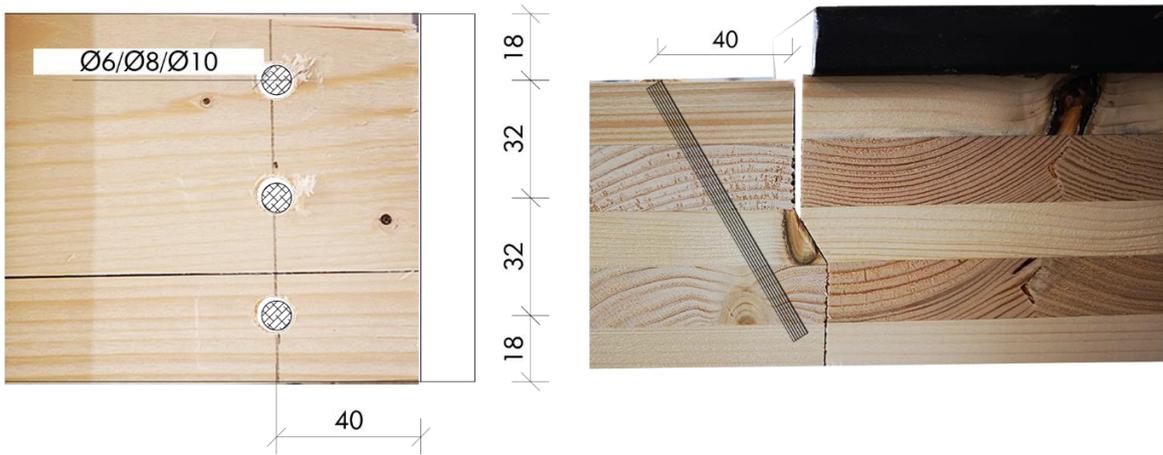


Abbildung 40: Verstärkter Querkraftstoß: Buchendübel 3x8x110 / 30° zur Vertikalen geneigt angeordnet



Abbildung 41: Verstärkter Querkraftstoß: Buchenholzdübel 3x8x110 / vertikale Anordnung verklebt

Versuchsreihe	Verstärkungsmittel (Anzahl × Durchmesser × Länge)	Winkel	Abstand zum beanspruchten Rand	Probenanzahl
Versuchsreihe 4	Buchenholzdübel (3×8mm×100mm)	0°	18 mm	10
Versuchsreihe 5	Buchenholzdübel (3×6mm×110mm)	30°	18 mm	10
Versuchsreihe 6	Buchenholzdübel (3×8mm×110mm)	30°	18 mm	10
Versuchsreihe 7	Buchenholzdübel (3×10mm×110mm)	30°	18 mm	10
Versuchsreihe 8	Buchenholzdübel verklebt (3×8mm×100mm)	0°	18mm	10

Abbildung 42: Übersicht der Versuchsreihen mit Buchenholzdübel

4.2.3 Untersuchungsergebnisse Querkrafttragfähigkeit

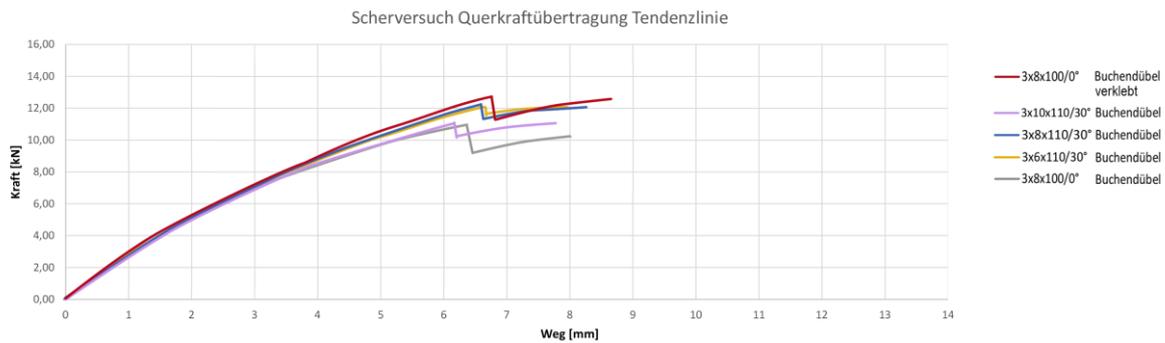


Abbildung 43: Übersicht Scherversuche. Laststeigerung bei querzugverstärkten Querschnitten. Tendenzielle Last-Verformungskurven jeweils aus den 10 Versuchen. Graue Kurve: Versuchsreihe 4 (Abbildung 45), Gelbe Kurve: Versuchsreihe 5 (Abbildung 47), Blaue Kurve: Versuchsreihe 6 (Abbildung 48), Lila Kurve: Versuchsreihe 7 (Abbildung 48), Rote Kurve: Versuchsreihe 8 (Abbildung 49)

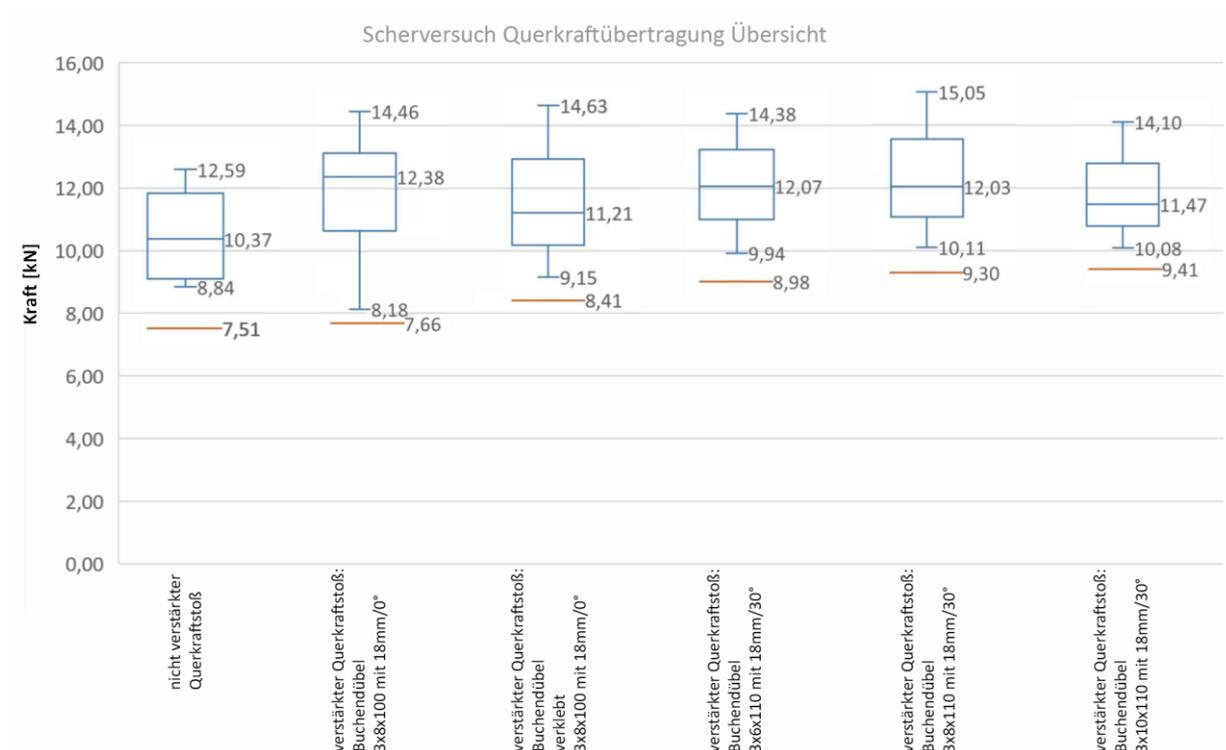


Abbildung 44: Übersicht der Scherversuchen der nicht verstärkten, mit nicht verklebtem Buchendübel verstärkten Querkraftstöße und mit verklebtem Buchendübel mit max-, mean-, min-Werten und 5%-Fraktilwerten

Die Buchenholzdübel erzeugen in der ersten Versuchsreihe 4 nur eine geringe Verstärkung, mit der das Querkraftversagen und das Rollschubversagen in den Querlagen nicht vermieden werden kann (Abbildung 45). Die Querkraftübertragung im Bauteilstoß steigt jedoch auf bis zu 14kN, der Medianwert beträgt 12,38kN (zwischen 8,18kN und 14,46kN) (Abbildung 44). Als Grenzwert der Querkraft wird das spröde Querkraftversagen in der Fuge zwischen der 3. und 4. Lage angesetzt. Der Medianwert der Querkraftübertragbarkeit von mit Buchenholzdübeln verstärktem Querkraftstoß liegt zwischen dem nicht verstärkten Querkraftstoß (10,37kN) und dem mit optimiert angeordneten Tellerschrauben verstärkten Querkraftstoß (12,72kN).

Während die Teilgewindeschraube durch den entstehenden Querdruck unter dem Tellerkopf eine Vorspannung erzeugt und die obersten drei Lagen zusammendrückt, erzeugt der Buchenholzdübel ohne

Klebstoff durch die Haftreibung eine geringe Widerstandskraft, die eine mäßige Querkzugverstärkung bewirkt. Deswegen tritt das Querkzugversagen auch zwischen der 3. und 4. Lage auf. Nach dem Querkzugversagen ist zusätzlich eine Kombination aus Rollschub- und Querkzugversagen in der unteren Querlage aufgetreten, wie das bereits bei den Versuchskörpern ohne Verstärkung festzustellen war. (Abbildung 45)

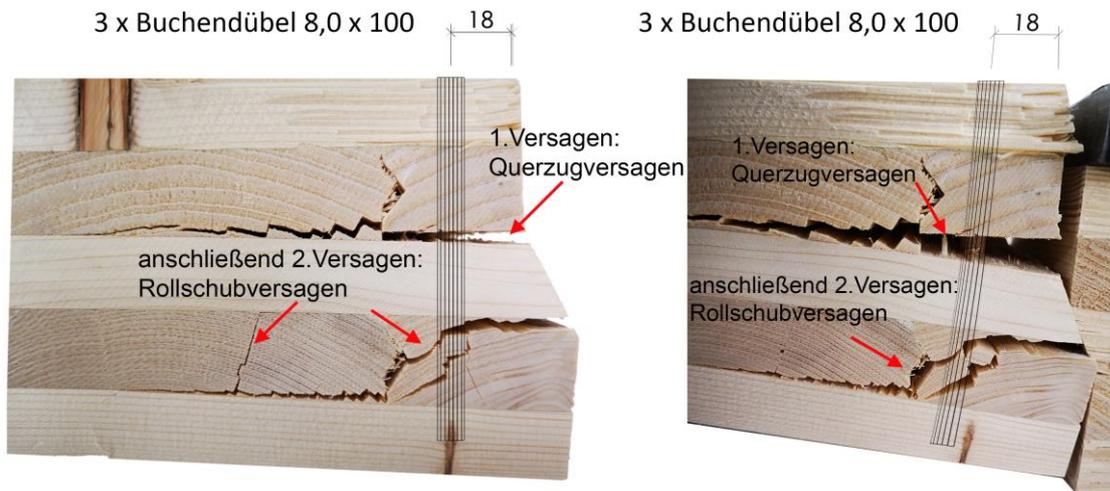


Abbildung 45: Verformung und Bruchbild mit verstärktem Querkraftstoß: Variante 4, Buchendübel 3×8×100: links: belastete Zustand, rechts: entlastete Zustand. Nach dem Querkzugversagen tritt anschließend Rollschubversagen auf

Insgesamt wurden 10 Versuchskörper in der Versuchsreihe 4 geprüft. Ein Versuchskörper erreichte einen maximalen Messwert von lediglich 8,18kN. Der Erstriss infolge Querkzug trat nicht in der Fuge einer Querlage ein, sondern in der 3. Lage. Dies lässt sich durch die deutliche Schrägfaserigkeit der wellig verlaufenden Fasern erklären (Abbildung 46 links). Außerdem zeigt dieser Versuchskörper ein für BSP typisches Klebstoffversagen in der Fuge der Flächenverklebung. Aufgrund unterschiedlicher Flächendrücke z. B. infolge verwundener Brettlagen kann der zur ordnungsgemäßen Verklebung erforderliche Pressdruck nicht flächendeckend aufgebracht werden. Dies führt dann unter Querkzugbeanspruchung zum frühzeitigen Ablösen zweier Brettlagen, wie z. B. in Abbildung 46 dargestellt. Um eine effiziente Verstärkung zu erhalten, werden die zusätzlichen Versuchsreihen mit Proben durchgeführt, die mit schrägen Buchenholzdübeln 30° zur Vertikalen verstärkt und im Abstand von 18mm zum Rand des Querkraftstoßes angeordnet werden.

3 x Buchendübel 8,0 X 100, 18



3 x Buchendübel 8,0 X 100

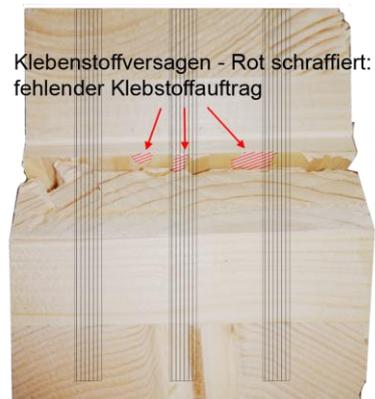
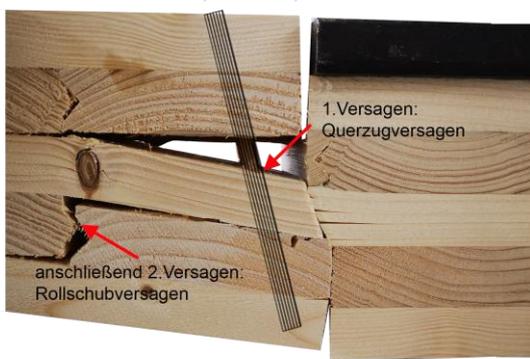


Abbildung 46: links: Riss in der 3. Lage wegen der deutlichen Schrägfaserigkeit der wellig verlaufenden Fasern und rechts: Klebstoffversagen in der Fuge der Flächenverklebung infolge von Fehlstellen der Verklebung beim Fertigungsprozess

Die schrägen Buchenholzdübel in den Versuchsreihen 5 bis 7 erzeugen eine deutliche Verstärkung. Die Querkraftübertragung im Bauteilstoß steigt auf bis zu 15kN, der charakteristische Wert beträgt 9,41kN (Abbildung 44). Außerdem beeinflusst der Durchmesser des Buchenholzdübel die Verstärkung nur gering. Der charakteristische Wert für die Buchenholzdübel mit 10mm beträgt 9,41kN, der nur 0,43kN höher liegt als für die Dübel mit 6mm mit einem charakteristischen Wert von 8,98kN. Das Querkraftversagen und das Rollschubversagen in den Querlagen kann auch hier nicht vermieden werden, weil die unteren drei Lagen nicht zusammengedrückt werden. Allerdings ist das Verformungsverhalten besser, je dicker die Dübel sind. Die Buchenholzdübel sind steifer als das BSP-Holz, weswegen keine Buchenholzdübel gebrochen sind.

3 x Buchendübel 6,0 x 110/30°
40



3 x Buchendübel 6,0 x 110/30°
40

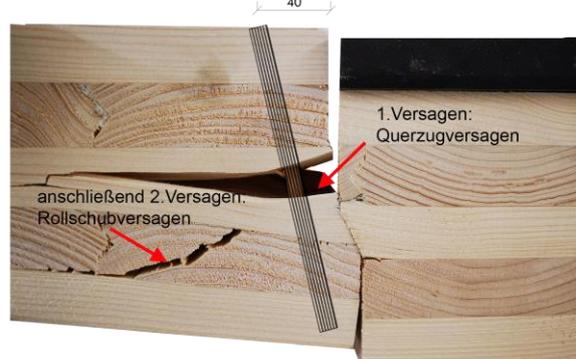


Abbildung 47: Variante 5. Verformung und Bruchbild mit verstärktem Querkraftstoß mit nicht verklebten Buchendübel 3x6x110 / 30°



Abbildung 48: Verformung und Bruchbild mit verstärktem Querkraftstoß: links: Variante 6, Buchendübel $3 \times 8 \times 110 / 30^\circ$, rechts: Variante 7, Buchendübel $3 \times 10 \times 110 / 30^\circ$

In der Versuchsreihe 8 zeigten die verklebten Buchenholzdübel eine Erhöhung der Querkraftübertragbarkeit. Der charakteristische Wert aus 10 Proben liegt bei 8,41kN, das sind 0,75 kN mehr als in der Versuchsreihe 4 ohne Verklebung.

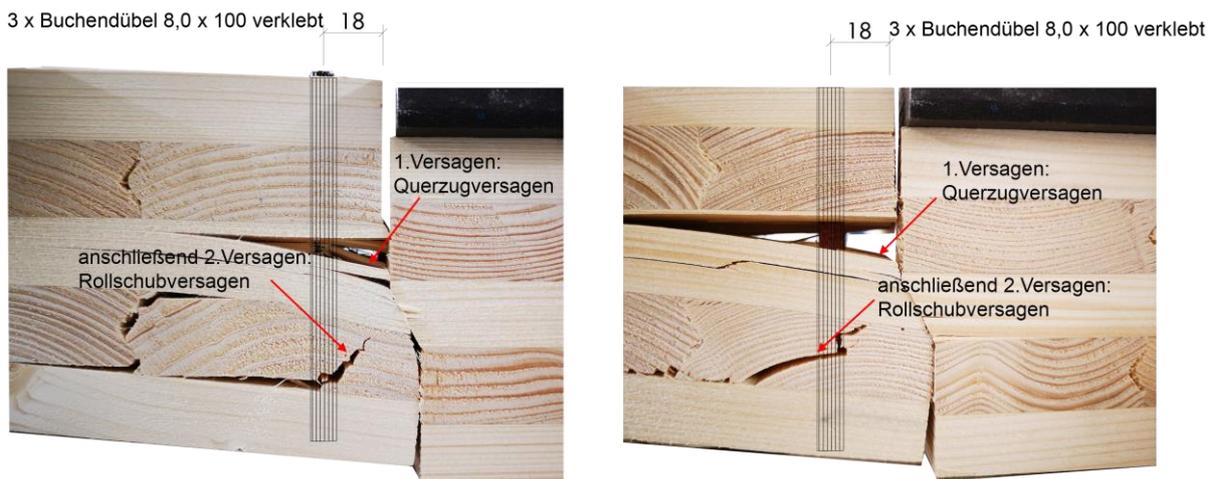


Abbildung 49: Verformung und Bruchbild mit verstärktem Querkraftstoß mit Buchendübel $3 \times 8 \times 100 / 0^\circ$ verklebt

Insgesamt wurden acht Versuchsreihen geprüft – nicht verstärkte, mit Schrauben verstärkte und mit Buchenholzdübeln verstärkte Querkraftstöße. Es zeigt sich, dass Tellerkopfschrauben mit Teilgewinde (Versuchsreihe 3) die größte Verstärkung bieten. Die Tragfähigkeit beträgt charakteristisch 9,87kN. Die Versuchsreihen 5-7 mit schrägen Buchenholzdübeln und die Versuchsreihe 8 mit verklebten, vertikalen Buchenholzdübeln liegen mit ihrer charakteristischen Querkrafttragfähigkeit zwischen der Versuchsreihe 3 und dem Wert der Versuchsreihe 2 mit Vollgewindeschrauben. Auch die Versuchsreihe 4 mit vertikalen Dübeln besitzen eine höhere Querkraftübertragbarkeit als die unverstärkten BSP-Stöße (Abbildung 51 und Abbildung 52).

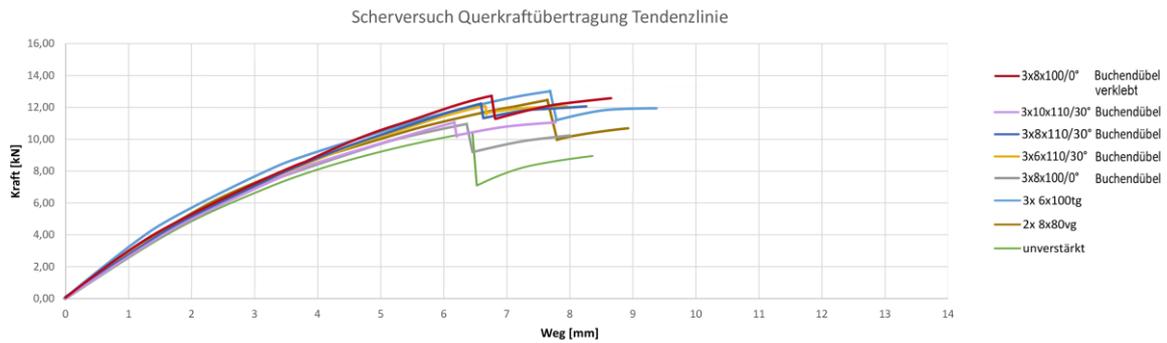


Abbildung 50: Übersicht Scherversuche. Laststeigerung bei querzugverstärkten Querschnitten. Tendenzielle Last-Verformungskurven jeweils aus den 10 Versuchen. Grüne Kurve: Versuchsreihe 1 (Abbildung 35), Braune Kurve: Versuchsreihe 2 (Abbildung 36), Hellblaue Kurve: Versuchsreihe 3 (Abbildung 37), Graue Kurve: Versuchsreihe 4 (Abbildung 45), Gelbe Kurve: Versuchsreihe 5 (Abbildung 47), Dunkelblaue Kurve: Versuchsreihe 6 (Abbildung 48), Lila Kurve: Versuchsreihe 7 (Abbildung 48), Rote Kurve: Versuchsreihe 8 (Abbildung 49)

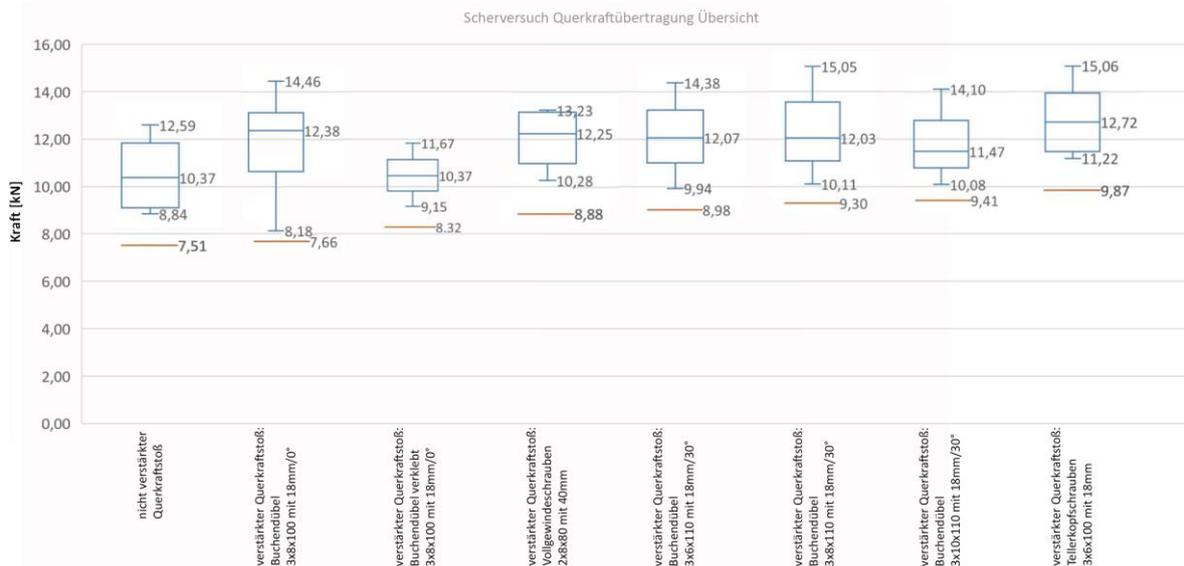


Abbildung 51: Übersicht der Scherversuche aller Versuchsreihen mit max-, mean-, min-Werten und 5%-Fraktilwerten

4.3 Analytische Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit

4.3.1 Hintergrund – Ausklinkungen

Nach Blaß und Sandhaas⁹ hat die Art der Ausklinkung am Auflager Einfluss darauf, wie sich die aufnehmbare Schubspannung am Auflager verändert (Gl. 1) und (Abbildung 52). Wenn der Parameter α z. B. $\alpha=0,6$ ist, beträgt der Abminderungsfaktor k_v bei der rechtwinkligen Ausklinkung 1 ($k_v=0,38$) und bei der schrägen Ausklinkung 4 ($k_v=0,58$), d.h. die Querkrafttragfähigkeit einer rechtwinkligen Ausklinkung ist deutlich kleiner als die einer schrägen Ausklinkung. Aus diesem Grund wird die Kontaktfläche des Querkraftstoßes so ausgeführt, dass eine möglichst geringe Beeinträchtigung der Festigkeit folgt. Außerdem ist zu beachten, dass die Richtung der Ausklinkung im Träger so angeordnet wird, dass die Druckdiagonale aus dem Querkraftfluss über die Kontaktfläche übertragen werden kann (Abbildung 53).

⁹ Blaß, H. ; Sandhaas, C. (2016): Ingenieurholzbau Grundlagen der Bemessung. Karlsruhe. KIT Scientific Publishing.

$$T_d \leq k_v \cdot f_d$$

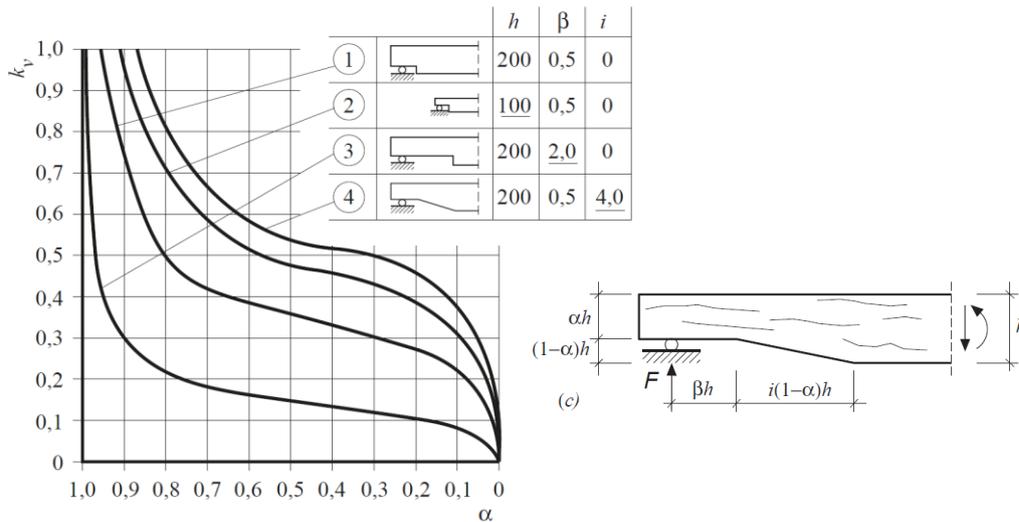


Abbildung 52: Faktor k_v in Abhängigkeit von Vollholz und den geometrischen Parametern h , β und i

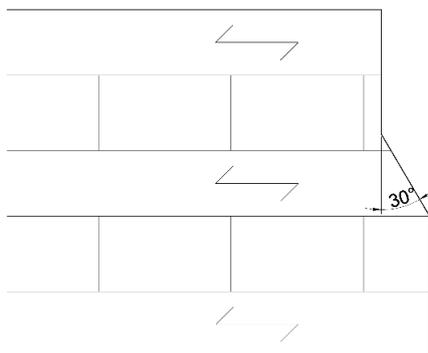


Abbildung 53: geometrische Ausbildung des Querkraftstoßes

4.3.2 Entwicklung des Stabwerkmodells

Ein Stabwerkmodell orientiert sich abhängig vom Material des statischen Systems und den Belastungen am realistischen Kraftfluss – siehe auch Kapitel 4.1.1. Für Holz sind im ungestörten B-Bereich (Balkenbereich) Kraftflusslinien unter 45° üblich. In D-Bereichen (Diskontinuitätsbereich – z. B. Auflager, Querkraftstoß, hohe Einzellasten etc.) ist der normale Kraftfluss gestört und daher verfeinert zu betrachten (Abbildung 54 bis Abbildung 56). Das Stabwerkmodell wird unter der Annahme einer reibungsfreien Kontaktfläche ermittelt. In weiteren Forschungen sind realistische Reibungsbeiwerte in der Kontaktfläche zu ermitteln, da diese den Neigungswinkel der Kraftübertragung am Stoß beeinflussen. Außerdem muss der Einfluss der unterschiedlichen Steifigkeiten von Quer- und Längslage auf die Spannungsverteilung im D-Bereich in weiteren Untersuchungen ermittelt werden.

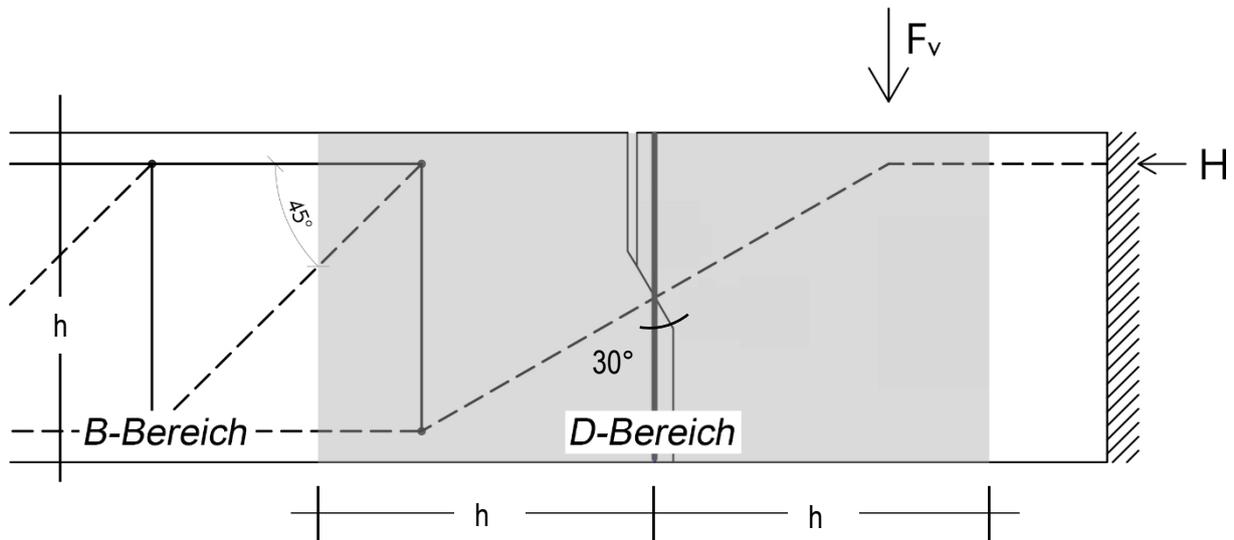


Abbildung 54: B-Bereich und D-Bereich – Annahme einer reibungsfreien Kontaktfläche

Das vereinfachte Stabwerkmodell für den D-Bereich berücksichtigt nicht die Spannungsspitzen an den geometrischen Umlenkpunkten des Versatzes (vgl. Abbildung 27). Die Querzugkraft $F_{ax,Ek}$ entspräche der zu übertragenden Querkraft im Stoß F_v . Das spannungsoptimierte Stabwerkmodell berücksichtigt die nahe am Stoß entstehenden Querzugbeanspruchungen (Abbildung 55). Als Abstand der Querzugkraft im Stabwerkmodell wird der Mindestabstand nach DIN EN 1995-1-1¹⁰ mit $3 \cdot d$ ($3 \cdot 6\text{mm} = 18\text{mm}$) angesetzt.

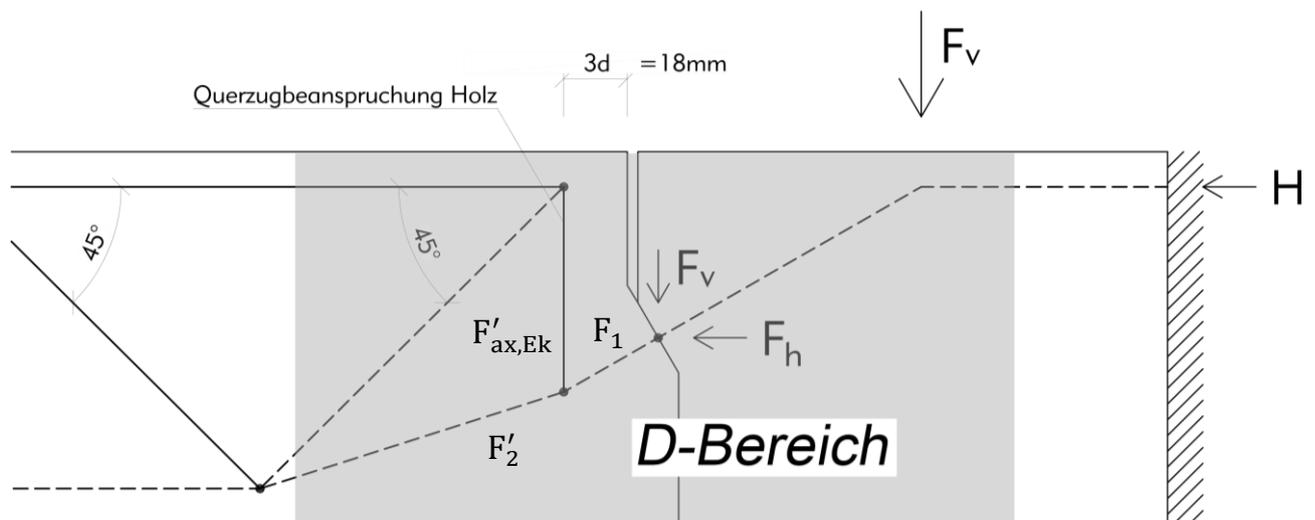


Abbildung 55: spannungsoptimiertes Stabwerkmodell – Annahme einer reibungsfreien Kontaktfläche

Das Verhältnis der Querzugkräfte $F'_{ax,Ek}/F_{ax,Ek}$ beträgt 0,45 (Gl. 2) und ist grafisch in Abbildung 56 dargestellt. Geht man vereinfacht davon aus, dass die Querlagen der BSP-Platten keine Querkrafttragfähigkeit haben im Vergleich zu den Längslagen, werden bei der Anordnung des Versatzes in der mittleren Längslage 2 von 3 Längslagen direkt beansprucht. Die obere Längslage wird erst durch die Querzugkraft zur Querkraftabtragung mitaktiviert. Die Querzugkraft müsste dann 33% der zu übertragenden Querkraft $F_{ax,Ek} = F_v$ aufnehmen. Das spannungsoptimierte Stabwerkmodell ist plausibel und zeigt, dass Schrauben mit geringerem Randabstand zur effektivsten Verstärkung des Querkraftstoßes führen. Das zeigen auch die experimentellen Ergebnisse.

¹⁰ Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008

$$F'_{ax,Ek} = 0,45 F_{ax,Ek}$$

Gl. 2

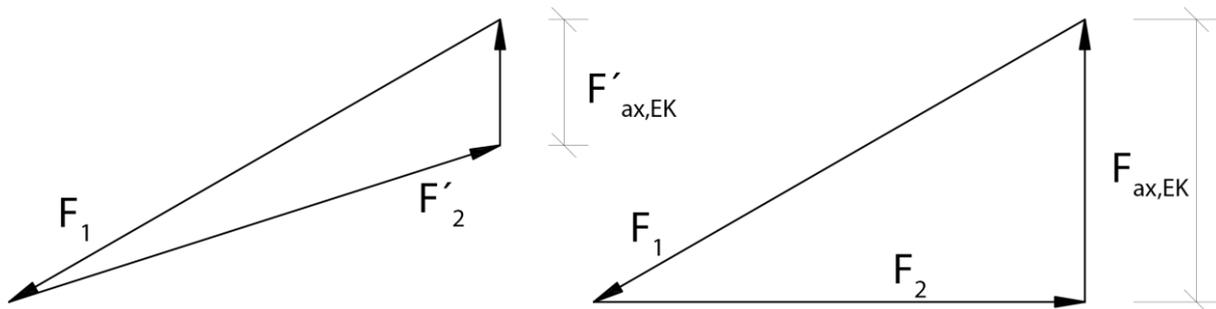


Abbildung 56: links: vereinfachte Stabwerkmodell; rechts: spannungsoptimierte Stabwerkmodell – Annahme einer reibungsfreien Kontaktfläche

4.3.3 Nachweise der Druck- und Zugstreben des Stabwerkmodells

An den Verlauf der Spannungstrajektorien angepasst zeigt das spannungsoptimierte Stabwerkmodell die Querkraftabtragung des Anschlusses im D-Bereich. Mit der experimentell ermittelten charakteristischen Querkrafttragfähigkeit wird das Stabwerkmodell für den mit Tellerkopfschrauben 3·6·100 verstärkten Anschluss bemessen. Der Bemessungswert der Beanspruchung entspricht der maximalen charakteristischen Querkraft bei Eintreten des Querzugversagens (Abbildung 34 und Abbildung 52). In dem folgenden Prozess werden die Drucktragfähigkeit der unter 30° zur Faserrichtung geneigten Kontaktfläche (Abbildung 58), die Rollschubtragfähigkeit und die Querzugtragfähigkeit mit Hilfe des optimierten Stabwerkmodells berechnet.

Drucktragfähigkeit der Kontaktfläche

Die Druckfläche entspricht der Breite des Versuchskörpers (100 mm) und der unter 30° zur Vertikalen geneigten mittleren Brettlage ($20/\cos 30^\circ = 23,09\text{mm}$ und Abbildung 58 links) sowie dem Einhängeeffekt nach DIN EN 1995-1-1/NA ($\Delta h = 30 \cdot \sin 30^\circ = 15\text{mm}$ in Abbildung 58 rechts). Zu beachten ist, dass der hier untersuchte Querkraftstoß eingesetzt im Bauteil eines Plattenstreifens zusätzlich in der Zugzone durch Aufkleben weiterer Brettlagen verstärkt werden muss (Kapitel 4.5). Der Einhängeeffekt wird aber nur bei großen Quetschungen der Druckfläche wirksam, mit der Folge großer Verschiebungen der Anschlussgeometrie (Abbildung 57 rechts). Dies würde dann die Klebfuge der aufgeklebten Brettlagen stark auf Querzug beanspruchen, was zu vermeiden ist. Daher wird der Einhängeeffekt nicht angesetzt. Die effektive Druckfläche beträgt damit:

$$A_{\text{eff}} = 100 \times 23,09 = 2309\text{mm}^2$$

Gl. 3

Die Querkraft F_V (Abbildung 57) ist gleich der charakteristischen Querkraft $F_{V,k} = 9,87\text{kN}$ aus Abbildung 51. Die Druckstrebenkraft beträgt: $F_{1,k} = 9,87/\sin 30^\circ = 19,74\text{kN}$. Die Horizontalkomponente $F_{h,k} = 9,87/\tan 30^\circ = 17,09\text{kN}$.

Die Druckstrebenkraft $F_{1,k}$ wirkt senkrecht auf die Kontaktfläche und ist unter 30° zur Faserrichtung der mittleren Brettlage geneigt. Die vom Kraft-Faserwinkel abhängige Druckfestigkeit $f_{c,\alpha,k}$ beträgt für Schwellendruck nach DIN EN 1995-1-1: $f_{c,\alpha,k} = 8,64\text{N/mm}^2$. Nachzuweisen ist: $\sigma_{c,\alpha,k} \leq f_{c,\alpha,k}$. Die Druckspannung auf der Kontaktfläche $\sigma_{c,\alpha,k}$ wird wie folgt berechnet:

$$\sigma_{c,\alpha,k} = \frac{F_1}{A_{\text{eff}}} = \frac{19,74 \cdot 10^3\text{N}}{23,09 \cdot 100\text{mm}^2} = 8,55\text{N/mm}^2 < f_{c,\alpha,k} (8,64\text{N/mm}^2) \quad \text{Gl. 4}$$

Der Nachweis für die Tragfähigkeit der Kontaktfläche ist erbracht.

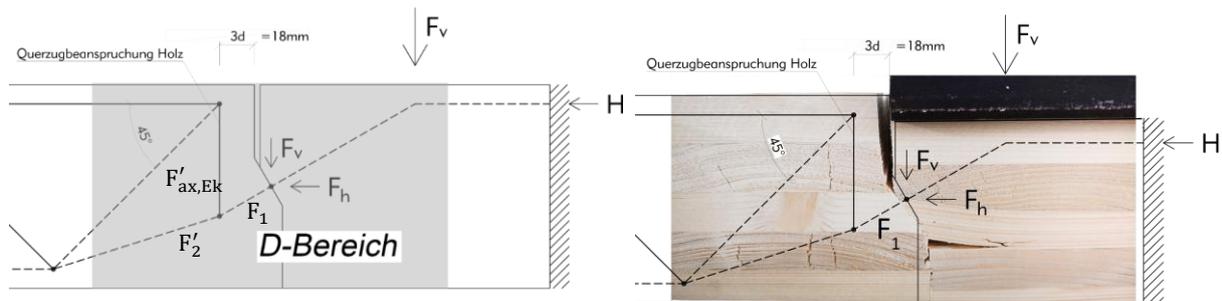


Abbildung 57: Druckbeanspruchung an der Kontaktfläche

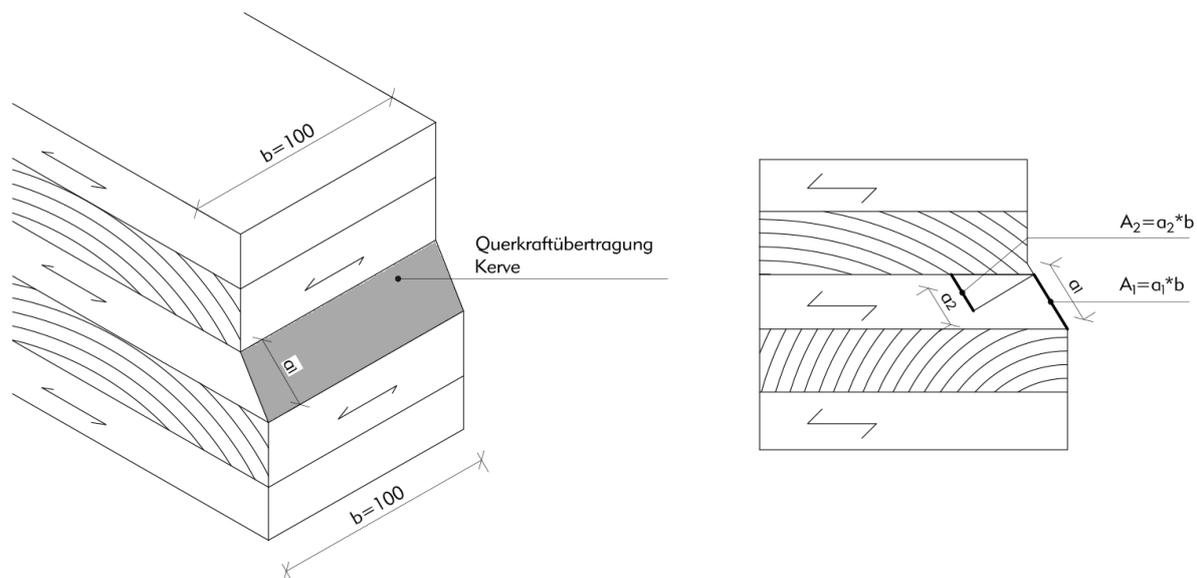


Abbildung 58: Schematische Darstellung der effektiven Kontaktfläche A_{eff} – links: mögliche Druckfläche; rechts: theoretische Druckfläche nach DIN EN 1995-1-1

Rollschubtragfähigkeit

Rollschub und Querkzug treten bei der üblichen Brettware für BSP, den Seitenbrettern, gleichzeitig auf (Abbildung 60 und z. B. Abbildung 49). Durch die konzentrierte Druckkräfteinleitung und die Verschraubung im Lasteinleitungsbereich ist die rollschubbeanspruchte 2. Brettlage überdrückt. Ein Abrollen wird dadurch deutlich behindert. Es ist zu vermuten, dass in diesem D-Bereich die Rollschubfestigkeit infolge dieser „Druckvorspannung“ gegenüber der Rollschubfestigkeit im B-Bereich (Bereich der normativen Festlegung der Rollschubfestigkeit) zunimmt. Außerdem wird über die Dübelwirkung der Verschraubungen die zur Ausbildung des Rollschubversagens erforderliche

Verschiebung (Δu) in der 1. und 2. Fuge stark behindert, was zu einer weiteren Steigerung der Rollschubfestigkeit führt (siehe Abbildung 59). Das Rollschubversagen trat bei den Probekörpern, die mit Tellerkopfschrauben $3 \cdot 6 \cdot 100$ verstärkt sind und bis in die 1. Brettlage einbinden, nach dem Querkzugversagen nicht auf. Beide Einflüsse, hoher Querdruck und Verdübelung, sind im Zusammenhang mit der Rollschubfestigkeit in D-Bereichen durch weitere Forschungsarbeiten genauer zu erfassen. In diesem Forschungsbericht wird der Rollschubnachweis mit der maximalen Rollschubfestigkeit nach Erhart und Brandner¹¹ mit $f_{r,k} = 1,4 \text{ N/mm}^2$ geführt (Abbildung 61). Der Rissfaktor k_{cr} darf nach DIN EN 1995-1-1/NA bei Brettsperrholz zu $k_{cr} = 1$ gesetzt werden.

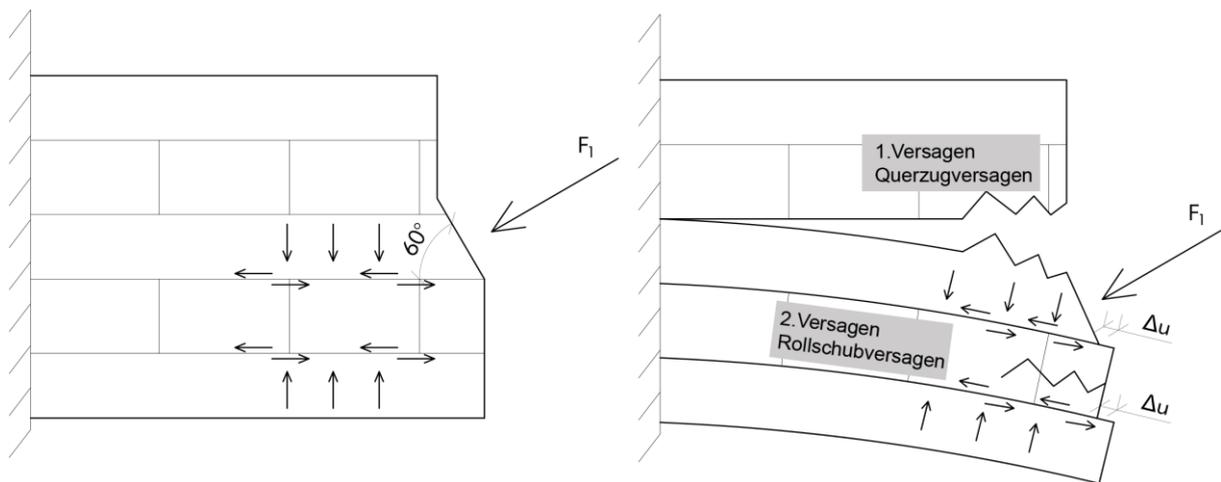


Abbildung 59: Schematische Darstellung des Versagens des Querkraftstoßes

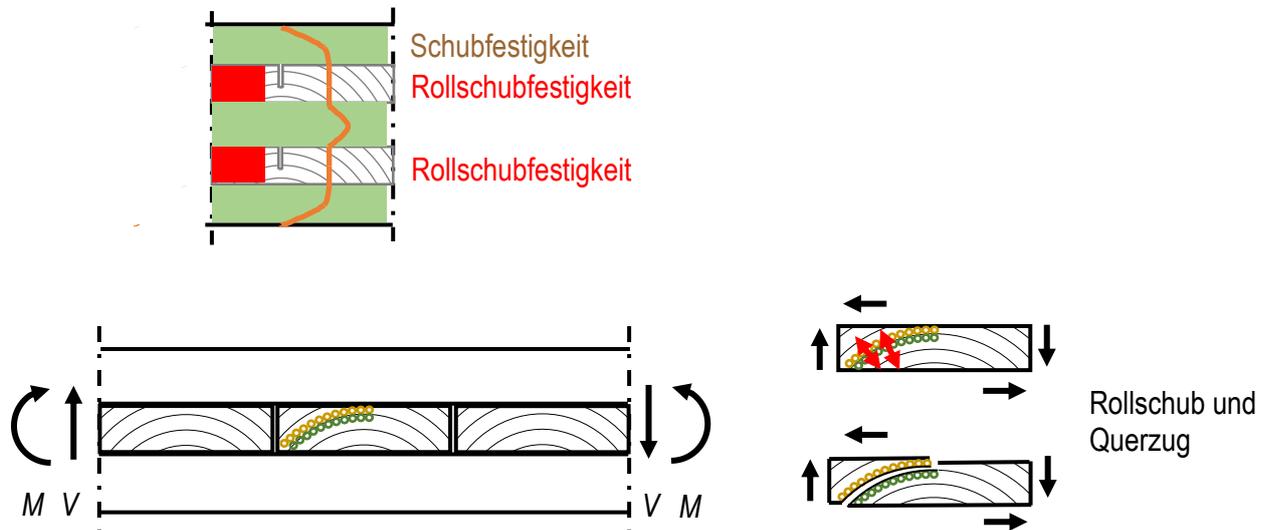


Abbildung 60: Einfluss der kreuzweisen Verklebung auf die Schubfestigkeit¹¹

¹¹ In: Dietsch, P. (2018): Eurocode 5:2022 – Einführung in den neuen Abschnitt Brettsperrholz. Vortrag zur 40. Fachtagung Holzbau Baden-Württemberg, Stuttgart

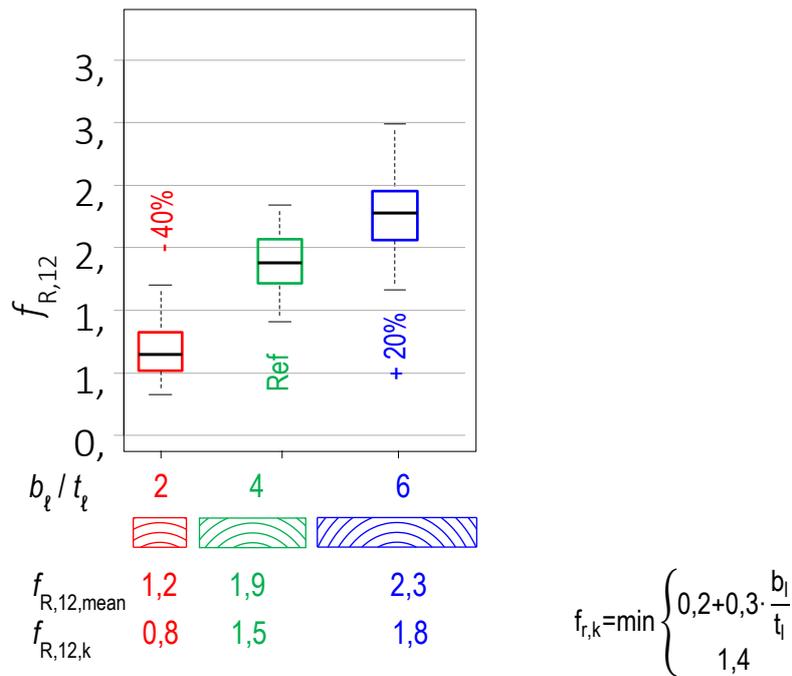


Abbildung 61: Einfluss der Brettbreite bei konstanter Bretthöhe von Seitenbrettern auf die Rollschubfestigkeit¹¹

Nach Masek¹² stimmt für drei- und fünfschichtige Plattenelemente die über die Plattenhöhe gemittelte Rollschubspannung nach (Gl. 5 und Gl. 6) annähernd mit der exakten Lösung überein (siehe auch Abbildung 60 oben). Da im D-Bereich des Querkraftstoßes die Rissbildung infolge Querkzug vor dem Rollschubversagen eintritt, wird beim Nachweis für Rollschub die Rollschubspannung für 2 Fälle ermittelt:

1. Abtragung von $F_{2v,k}$ (Abbildung 62) nur durch die unterhalb des Querkzugrisses vorhandenen Brettlamellen (Brettlagen 1-3).
2. Abtragung der gesamten Querkraft $F_{v,k}$ (Abbildung 62) durch den Gesamtquerschnitt

$$\tau_{2v,k} = \frac{F_{2v,k}}{a_1 \cdot b} = \frac{0,55 \cdot 9870}{43 \cdot 100} = 1,26 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < f_{r,k} = 1,4 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Gl. 5}$$

Mit a_1 = Schwerpunktsabstand der Brettlage 1 und 3: $a_1 = 10 + 23 + 10 = 43\text{mm}$ (Abbildung 62) und $F_{2v,k} = (1-0,45) F_{v,k} = 0,55 F_{v,k}$ (siehe Gl. 2). Für den Gesamtquerschnitt gilt: $a = 10 + 23 + 20 + 23 + 10 = 86\text{mm}$ (Abbildung 62). Daraus folgt:

$$\tau_{v,k} = \frac{F_{v,k}}{a \cdot b} = \frac{9870}{86 \cdot 100} = 1,15 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < f_{r,k} = 1,4 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Gl. 6}$$

Die Rollschubnachweise sind erbracht.

¹² 4Mestek, P. (2011): Berechnung und Bemessung von Brettspertholz – ein Überblick. 4. Europäischer Kongress für energieeffizientes Bauen mit Holz 2011

$$F_{ax,Rk}^I = d_r \cdot l_{ef} \cdot f_{ax,90,k} \quad \text{Gl. 7}$$

mit:

d_r = Nenndurchmesser des Stahlstabes in [mm]

l_{ef} = Gewindelänge in [mm]

$f_{ax,90,k}$ = Ausziehparameter [N/mm²]¹⁴

Für die Schrauben SPAX 6x100 tg Tellerkopfschrauben gilt:

$$F_{ax,Rk}^I = d_r \cdot l_{ef} \cdot f_{ax,90,k} = 6 \cdot 61 \cdot 9,8 / 1000 = 3,59 \text{ kN} \quad \text{Gl. 7}$$

Nach den SPAX-Bemessungshinweisen¹⁵ dürfte mit dem Einschraubwinkel von 90° der charakteristische Wert $F_{ax,Rk}^I$ mit dem Faktor $k_{ax}=1,25$ erhöht werden.

Der Kopfdurchzieh widerstand auf der Kontaktfläche wird bezogen auf Hinweise zur Bemessung von tragenden SPAX-Verbindungen¹⁵ ermittelt zu:

$$F_{c,90,k} = 2,27 \text{ kN} \quad \text{Gl. 8}$$

Für die Bemessung der Tellerkopfschrauben wird das Kopfdurchziehen maßgebend.

Nachweis der Tragfähigkeit der Schrauben

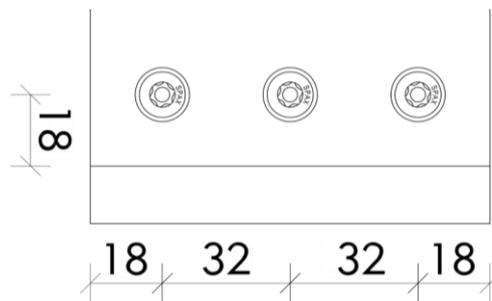


Abbildung 65: Aufbau der Schraubenverbindung mit 3x6x100 tg Tellerkopfschrauben

Bemessung	Nachweis
Zugtragfähigkeit	$F_{ax,Ed}^I (4,49 \text{ kN}) < 3 \cdot R_{u,k} (33,90 \text{ kN})$
Herausziehen des Gewindes	$F_{ax,Ed}^I (4,49 \text{ kN}) < 3 \cdot F_{ax,Rk}^I (10,77 \text{ kN})$
Kopfdurchzieh widerstand	$F_{ax,Ed}^I (4,49 \text{ kN}) < 3 \cdot F_{c,90,k} (6,81 \text{ kN})$

¹⁴ Colling, F. (2009). Holzbau: Grundlagen, Bemessungshilfen. Springer-Verlag

¹⁵ Bemessungshinweise: Hinweise zur Bemessung von tragenden SPAX-Verbindungen (Sand 01.2013)

4.3.5 Strategie zur Querkraftbemessung für Decken aus BSP-Produktionsabfällen

Aufgrund des optimierten Stabwerkmodells beträgt die Querkraft $F'_{ax,Ek}=4,49\text{kN}$ (Gl. 2) und die aufnehmbare Querkraft $F_{c,90,k}=6,81\text{kN}$. Daraus kann man folgern, dass die Schrauben den Querkraftstoß zuverlässig verstärken werden. Das Schraubenversagen tritt nicht vor dem Versagen des Querkraftstoßes auf.

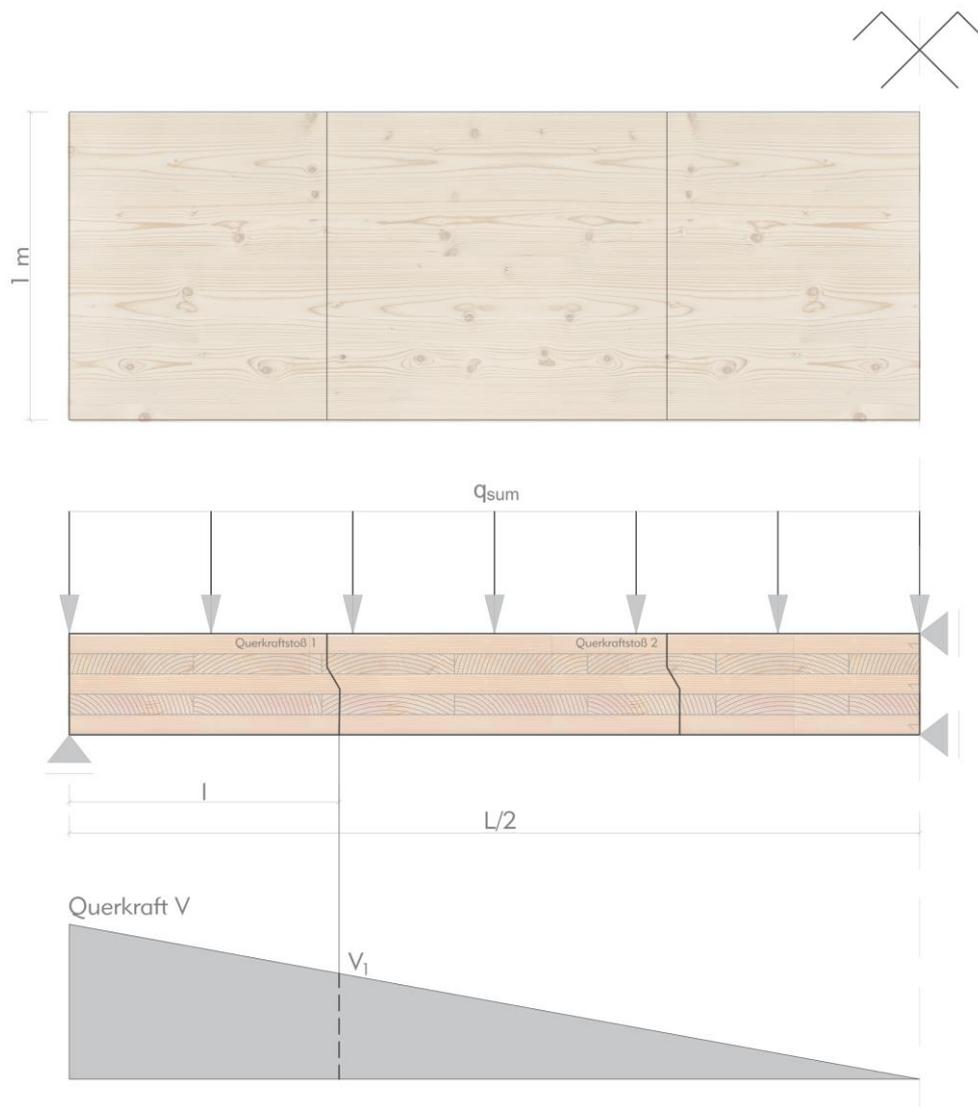


Abbildung 66: Anordnung des Querkraftstoßes und die Querkraftfluss

Die Spannweite L von Wohngebäuden liegt ca. im Bereich zwischen 4,0m bis 6,5m. Nachfolgend wird der minimale Abstand des Querkraftstoßes vom Auflager einer Einfeldplatte ermittelt. Verglichen wird die Höhe der Querkraft der Platte abhängig vom Querkraftverlauf mit der maximal aufnehmbaren Querkraft des Plattenstoßes. Folgende Randbedingungen werden angesetzt:

- der Schichtaufbau entspricht der BSP-Beton-Verbunddecke wie in Abbildung 21 dargestellt
- die Spannweite L beträgt 6,5m
- der Abstand l des Querkraftstoßes beträgt 1,0m
- die Breite der Decke beträgt 1,0m

Anhand der Annahmen betragen die Deckenlast $11,97 \text{ kN/m}^2$ und die maximale Querkraft am Auflager $38,89 \text{ kN/m}$. Wenn der erste Querkraftstoß 1,0m vom Auflager entfernt angeordnet ist, beträgt die

Querkraft 26,92 kN. Die unten aufgeführte Tabelle zeigt für die unterschiedlichen Verstärkungsarten die aufnehmbare Querkraft des Querkraftstoßes und die erforderliche Querkraft einer 6,5m weit spannenden BSP-Restholzplatte in 1m Abstand vom Auflager. Der charakteristische Wert der Verstärkung mit Tellerkopfschrauben liegt bei 9,87kN auf 10cm. Wenn die Breite auf 1m normiert wird, kann die Tragfähigkeit der BSP-Restholzplatten im Querkraftstoß eine Querkraft von 98,7kN übertragen. Dieser Wert übersteigt die Querkraft der Platte in 1m Abstand vom Auflager um ein Vielfaches. Das bedeutet, dass die mit Schrauben bzw. schrägen Buchenholzdübeln verstärkten Querkraftstöße eine ausreichende Tragfähigkeit für die praktische Anwendung in Deckenplatten für Wohngebäude bieten.

Eigengewicht BSP	$g_k=0,53\text{kN/m}^2$ (Eugen Decker Holzindustrie KG)	Gl. 9
Ausbaulasten	$g_{A,k}=5\text{kN/m}^2$	Gl. 10
Verkehrslast	$q_k=3\text{kN/m}^2$	Gl. 11
Gesamtlast	$q_k=0,53+5+3=8,53\text{kN/m}^2$	Gl. 12
Querkraft am Auflager (auf 1m normiert)	$V_k=8,53 \times 6,5 \times 0,5 \times 1,0=27,72\text{kN}$	Gl. 13
Querkraft beim ersten Querkraftstoß	$V_{1,k}=8,53 \times (6,5 \times 0,5 - 1,0) \times 1,0=19,19\text{kN}$	Gl. 14

Verstärkungsmittel	char. Tragfähigkeit auf 1m Breite	$V_{1,k}$	Bewertung
keine	75,1 kN	19,19kN	ausreichend
Vollgewinde (3x8mmx80mm)	88,8 kN	19,19kN	ausreichend
Tellerkopfgewinde (3x6mmx100mm)	98,7 kN	19,19kN	ausreichend
Buchendübel (3x8mmx100mm)	76,6 kN	19,19kN	ausreichend

4.3.6 Interpretation

Für die Übertragung der erforderlichen Querkraft für Deckenkonstruktionen im Wohnungsbau sind die oben vorgestellten Querkraftstöße uneingeschränkt geeignet. Sie können auch nahe der Auflager platziert sein. Die Schraubenanordnung kann weiter auseinanderliegen. Es zeigt sich, dass Tellerkopfschrauben alle 10cm ausreichend sind für Verkehrslasten von 3kN/m^2 und 5kN/m^2 ($34,22/98,7 \cdot 4,49/5,62$) $\cdot 3 = 0,83$ Schrauben auf 10cm). Zur besseren Weiterverarbeitung der BSP-Restholzplatten sind auch Zylinderkopfschrauben mit Vollgewinde als Querszugverstärkungen im Querkraftstoß denkbar.

4.4 Zugversuche mit Fremdfedern aus Buchenfurnierschichtholz

In den BSP-Decken- und Wandkonstruktionen werden die BSP-Restholzplatten als Druckelemente eingesetzt. Außerdem müssen die einzelnen Elemente eine Scheibentragwirkung über den Schubverbund untereinander gewährleisten. Offene Fugen zwischen den einzelnen BSP-Restholzplatten sind zu vermeiden. Für die in Kapitel 3.4 gewählten, formschlüssigen Buchen-FSH-Fremdfedern soll daher zusätzlich untersucht werden, ob durch die verschränkte Anordnung ein Zusammenziehen der BSP-Plattenelemente möglich ist. Dazu werden nachfolgend Zugversuche durchgeführt. Es soll festgestellt werden, ob durch die abwechselnd verschränkte Anordnung der Fremdfedern eine Keilwirkung entsteht, die die Fugen zwischen den Elementen vorspannt. Dazu werden zwei BSP-Platten mit zueinander gerichteten Buchen-FSH-Fremdfedern verbunden (Abbildung 68) und unter Zug gesetzt. Es werden die Verformungen und die dazugehörigen Kraftverläufe gemessen. Die Vorspannung ist „aufgebraucht“, wenn sich die Fuge zwischen den Probekörperhälften öffnet. Die Buchen-FSH-Fremdfedern wird nach Fugenöffnung auf Zug und Biegung beansprucht.

Für die Fremdfeder wird BauBuche Platte S mit B40xL150xH106mm verwendet mit der Faserrichtung in Längsrichtung der Fremdfeder. Die Fremdfedern werden in die Frästaschen der BSP106W-5-Platten eingeschlagen. Die Zugkraft wird in die Probekörper durch jeweils einen Querbolzen aus Stahl $\varnothing 24\text{mm}$ eingeleitet.

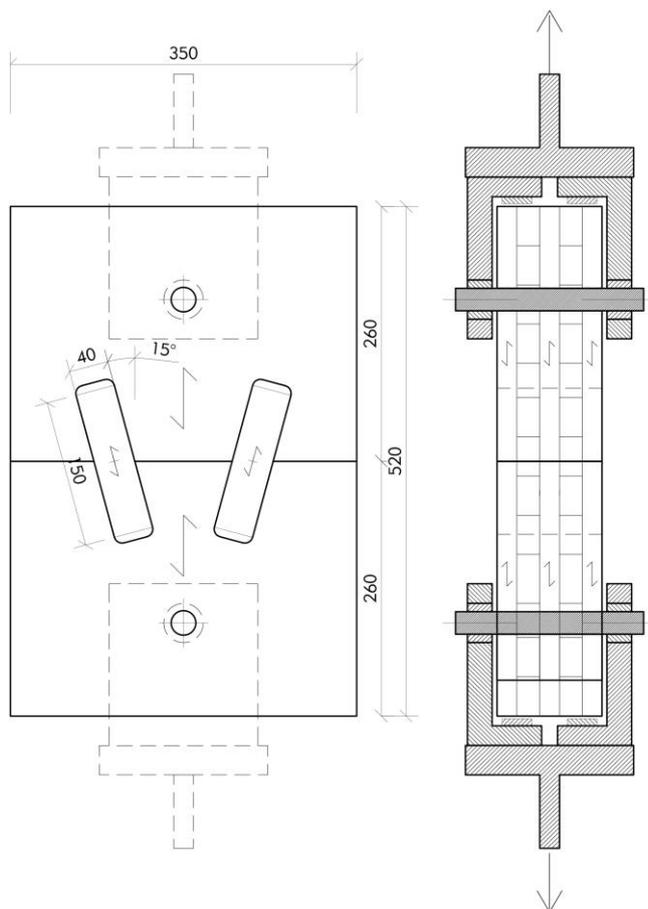


Abbildung 67: Versuchsanordnung Zugversuch mit Buchen-FSH-Fremdfedern

Wider Erwarten hat sich diese Verbindung für das Zusammenspannen der Bauteile als wenig geeignet erwiesen. Es zeigt sich eine geringe Vorspannwirkung. Nach einer Übergangsphase, in der die Versuchseinrichtung sich ausjustiert, zeigt das Kraft-Verformungsdiagramm einen steilen Anstieg über

ca. 4 kN (Abbildung 68). In diesem Bereich geringer Verformungen bleiben die Versuchskörper eng beieinander. Danach öffnet sich die Fuge zwischen den Bauteilen, bis schlussendlich bei großen Verformungen die Verbindung auseinanderfällt (s. Abbildung 69). Die Fräsung der Tasche für die Fremdfeder wurde 1mm kleiner als die Breite des Buchen-FSH (40mm) ausgeführt, um eine formschlüssige Verbindung sicherzustellen. Dadurch entsteht eine große Reibung in der Kontaktfläche zwischen den beiden Elementen, die auch im Verlauf der Kraft-Weg-Kurve durch die hohe Anfangssteifigkeit zu beobachten ist. Wenn die Reibungskraft überschritten wird und Gleiten eintritt, öffnet sich die Fuge zwischen den Hälften des Prüfkörpers. Die Fremdfeder rutscht schrittweise aus der Fräsung heraus und wird zunehmend auf Biegung beansprucht. Außerdem ist, verglichen mit Buchen-FSH, Nadelholz weich und gibt in der Kontaktfuge mit dem Buchen-FSH nach. Die Decklagen der BSP-Platten werden quer zur Faserrichtung beansprucht und zusammengestaucht; die Querlagen werden lokal durch die Krafteinwirkung der Fremdfeder herausgezogen. Dabei verdreht sich die Fremdfeder und die Kontaktfläche mit dem Brettsperholz reduziert sich auf 4 Kontaktbereiche mit einer erhöhten Spannungskonzentration (s. Abbildung 70).

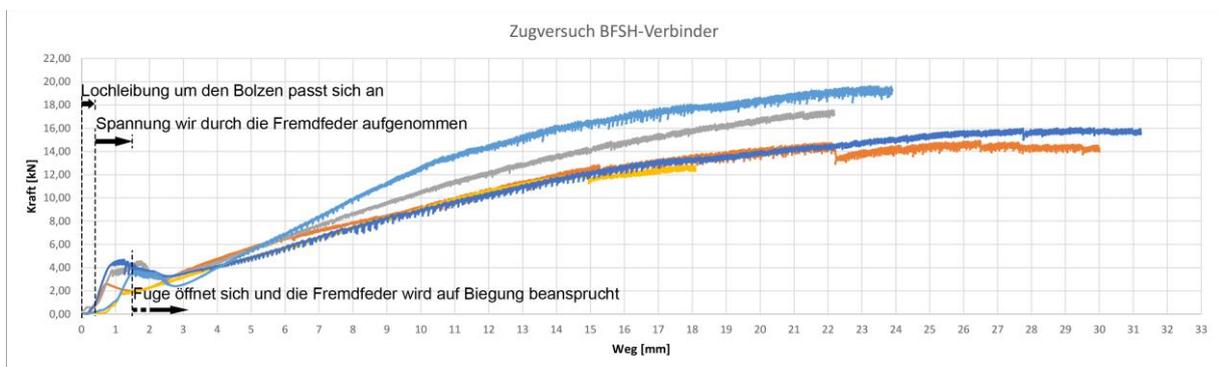


Abbildung 68: Kraft-Weg Diagramm Zugversuch

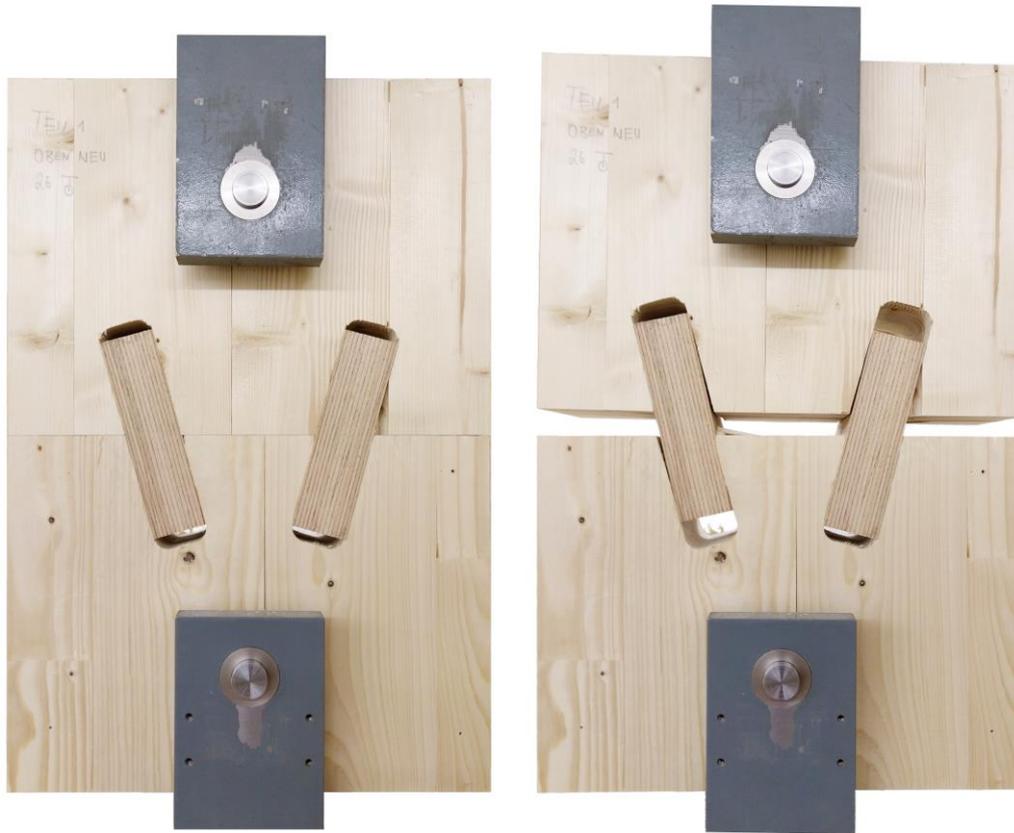


Abbildung 69: Zugversuch - Verformung und Bruchbild



Abbildung 70: Verringerung der Kontaktflächen und Bruchbild in den Querlagen

4.4.1 Interpretation

Die verschränkte Anordnung der Buchen-FSH-Fremdfedern sind zur Aufnahme der Schubkräfte geeignet. Allerdings bieten sie eine geringe Lagesicherheit der BSP-Restholzplatten infolge der Schubverformungen bei Scheibenbeanspruchung. Die Fugen öffnen sich unter geringen Zugbeanspruchungen senkrecht zu den Bauteilkanten. Schraubverbindungen nach Abbildung 9 zum sicheren Zusammenspannen der Bauteile sind in Kombination mit den Fremdfedern, die zur Schubkraftabtragung eingesetzt werden, sinnvoll. Für die Lage und Anzahl solcher Schraubverbindungen sind weitere Forschungstätigkeiten im Bereich der Scheibentragwirkung erforderlich.

4.5 Experimentelle und analytische Untersuchungen der Biegetragfähigkeit

Die mit dem Querkraftstoß gefügten BSP-Restholzplatten werden zu einem Plattenelement zusammengefügt. Durch die Anordnung von zusätzlichen Brettlamellen in der Biegezugzone entstehen einachsig beanspruchbare Plattenelemente. Die aus der Biegebeanspruchung entstehende Druckzone am oberen Rand der Plattenelemente wird durch Druckkontakt über den Querkraftstoß übertragen.

Die Ermittlung der Biegetragfähigkeit der BSP-Restholzplatten 106W-5 erfolgt in 4-Punkt-Biegeversuchen an Plattenstreifen entsprechend DIN EN 408 mit 200mm Breite und 2020mm (106mm x 19 = 2014mm) Länge (Abbildung 71 und Abbildung 72). Drei BSP-Restholzplatten 106W-5 werden mit Querkraftstößen gefügt. Die Stöße sind zwischen Auflager und Belastungspunkt (Drittelpunkt) angeordnet. Im Bereich des konstanten, maximalen Momentes zwischen den Belastungspunkten ist kein Querkraftstoß. In zwei Versuchsreihen werden in der Zugzone der Platten eine bzw. zwei Brettlagen mit PUR Klebstoff (LOCTITE® HB S309 PURBOND, 150g/m²) aufgeklebt, um produktionsähnliche Bedingungen zu erzielen. Zusätzlich wird eine Versuchsreihe durchgeführt, in der die Restholzplatten zwischen zwei Brettlagen eingeklebt werden. Das Tragverhalten des entstandenen zusammengesetzten Biegeträgers wird mit dem der original BSP-Platte 106W-5 verglichen. Um einen direkten Vergleich zu erhalten, werden alle zusammengesetzten Trägervarianten mit gleicher Prüfkörperlänge geprüft.

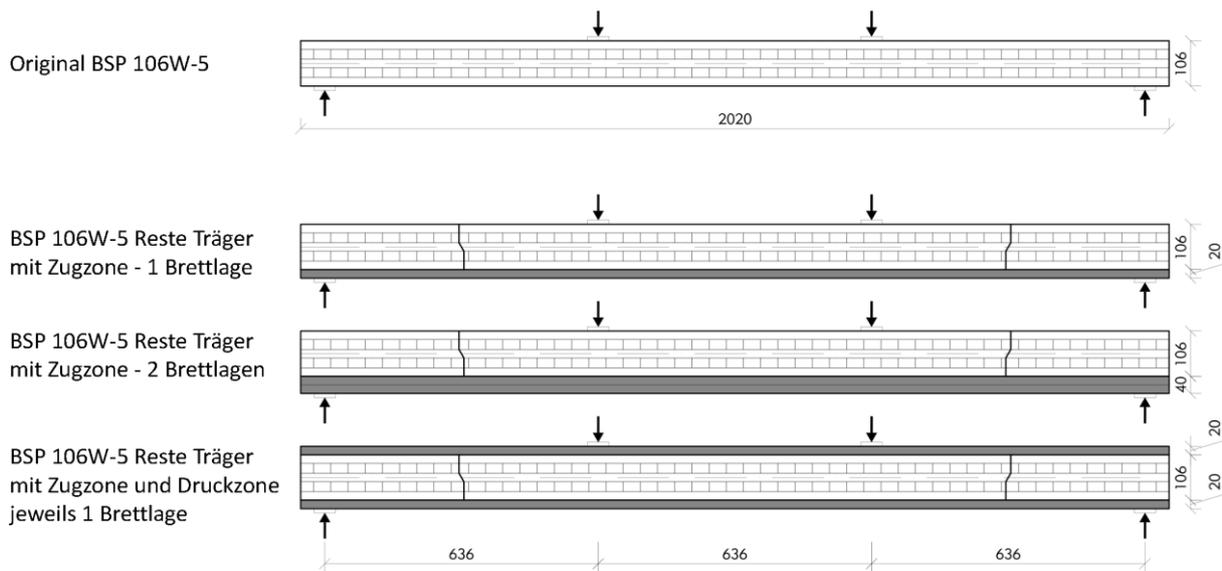


Abbildung 71: 4-Punkt-Biegeversuch: Übersicht der Prüfkörper. Prüfkörperbreite 200mm



Abbildung 72: 4-Punkt-Biegeversuch – Versuchsaufbau

Die Prüfungen fanden an einem weggesteuerten Zweisäulenprüfrahmen (Marke Wekob) mit $F_{max} = 50$ kN im T-Lab der Technischen Universität Kaiserslautern statt. Gemessen wurde ausschließlich die Bruchlast F_{max} . Die Last wurde mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit (6 mm/min) des Belastungskolbens aufgebracht, so dass die Höchstlast innerhalb von (300 ± 120) s erreicht wurde. Die Belastung erfolgte durch linearen Weg-Vorschub. Die Prüfung wurde bei einem Lastabfall von 25% abgebrochen. In jeder Versuchsreihe wurden jeweils 3 Prüfkörper aus BSP 106W-5 mit 200mm Breite geprüft. Die Holzfeuchte der Brettsperrholzquerschnitte wurde mittels elektronischer Widerstandsmessmethode auf 10% bestimmt.

4.5.1 Untersuchungen an Original-BSP-Platten

Bei Biegeversuchen an Original-BSP-Plattenstreifen haben sich zwei Versagensarten eingestellt: Rollschub- und Zugversagen. Zugversagen in den unteren Lamellen ist nur bei den Prüfkörpern mit Keilzinkenverbindungen in Form von sprödem Faserabriss an den Keilzinkenverbindungen eingetreten. Die Keilzinkenverbindungen stellen eine Schwächung des Lamellenquerschnitts dar, was sich bei der geringen Prüfbreite von 200mm deutlich ausgewirkt hat. Bei großen BSP-Platten sind die Keilzinkenverbindungen produktionsbedingt ungleichmäßig in der ganzen Brettlage verteilt und treten nie nebeneinander auf. Es entsteht ein Homogenisierungseffekt, so dass eine Schwächung durch eine einzelne Keilzinkenverbindung geringere Auswirkungen auf den Gesamtquerschnitt hat. In den untersuchten Biegeträgern mit 200mm Breite kann allerdings eine einzelne Lamelle mit Keilzinkenverbindung je nach Zuschnitt des Probekörpers bis zu 70% der Zugzone ausmachen (Breite des Probekörpers 200mm bei 140mm Lamellenbreite) und damit zum vorzeitigen Versagen des Probekörpers führen (Abbildung 75). Da dieses Verhalten für Brettsperrholzplatten eher untypisch ist, sind die nachfolgenden Versuchsergebnisse unter diesem Aspekt zu bewerten.

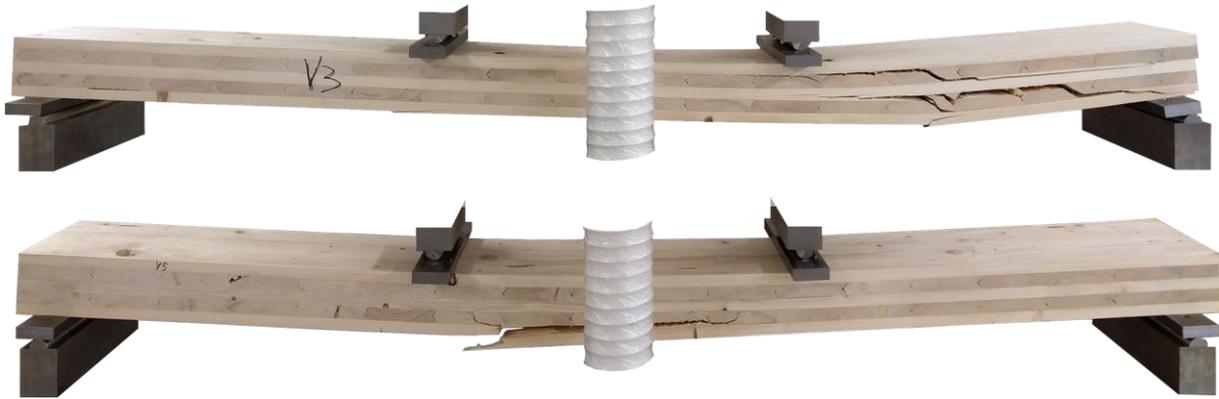


Abbildung 73: Bruchbilder 4-Punkt-Biegeversuch an Original-BSP 106W-5: Rollschub- und Zugversagen



Abbildung 74: 4-Punkt-Biegeversuch an Original-BSP 106W-5 – Rollschubversagen



Abbildung 75: 4-Punkt-Biegeversuch an Original-BSP 106W-5 – Zugversagen im Bereich der Keilzinkenverbindung

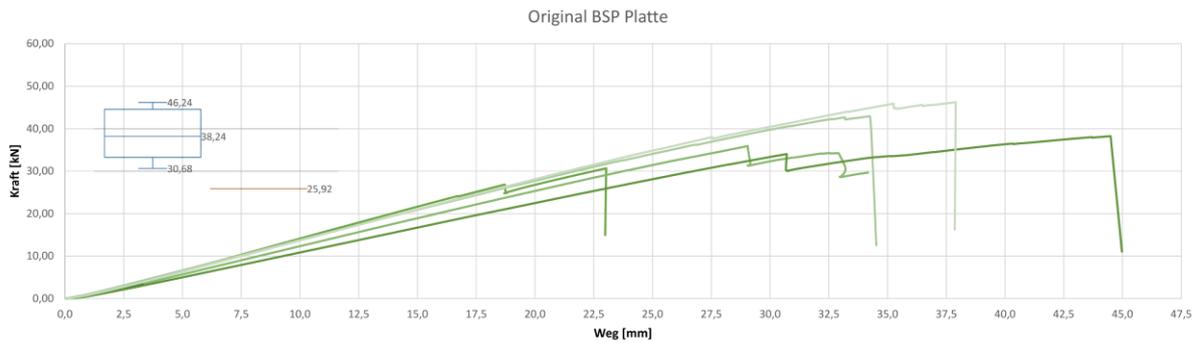


Abbildung 76: Kraft-Weg-Diagramm: 4-Punkt-Biegeversuch BSP 106W-5 mit max, mean, min und 5%-Fraktilewert

4.5.2 Untersuchungen an BSP-Restholzträgern mit einer Brettlage als Zugzone

Bei den aus BSP-Restholzplatten zusammengesetzten Trägern wird der Querkraftstoß der einzelnen BSP-Platten gemäß Querkraftuntersuchungen mit Tellerkopfschrauben Spax 6x100tg verstärkt (Abbildung 77).

BSP 106W-5 Reste Träger

Breite 200mm

Brettlage 20mm

Querzugverstärkung in jedem Stoß
8x Spax 6x100 tg Tellerkopf

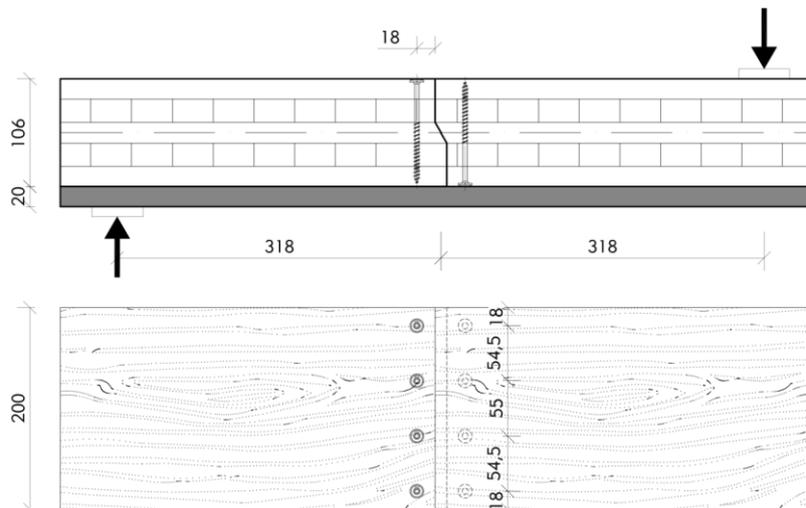


Abbildung 77: Querkraftstoß mit Querzugverstärkung

Die Prüfung der Versuchskörper mit aufgeklebter Zugzone aus einer Brettlage hat gezeigt, dass die Verklebung der BSP-Reste mit der Brettlage nicht vollflächig ist und die Klebfuge bereits bei der Hälfte der theoretischen Maximallast versagt.



Abbildung 78: Versagen der Klebfuge bei Prüfkörpern mit aufgeklebter Zugzone

Der Grund dafür ist die große Toleranz in der Stärke der BSP-Platten. Diese haben ein Sollmaß von 106mm, die gemessenen Platten variieren in der Stärke allerdings zwischen 103 und 107mm. Dies hat zur Folge, dass beim Fräsen und Verpressen die erforderliche Präzision nicht gegeben ist. Die BSP

Platten werden von oben mit identischem Profil für die Querkraftübertragung gefräst und danach zusammengefügt. Dazu wird eine der Platten umgedreht. Wenn die Platten von ihrem Sollmaß abweichen, entsteht eine Fuge zwischen den gefrästen Flächen (Abbildung 79).

Abgesehen von der beeinträchtigten Kraftübertragung im Querkraftstoß sind die BSP-Restholzplatten nicht präzise mit der Zugzone verklebt bzw. verpresst, da das in der Stärke kleinere BSP-Element nicht genügend Pressdruck bekommt und die Klebfuge gegebenenfalls offen bleibt (Abbildung 80). Um beiden Einflüssen entgegen zu wirken, werden die BSP-Reststücke vor dem Fräsen der Querkraftstöße auf eine einheitliche Stärke gehobelt.

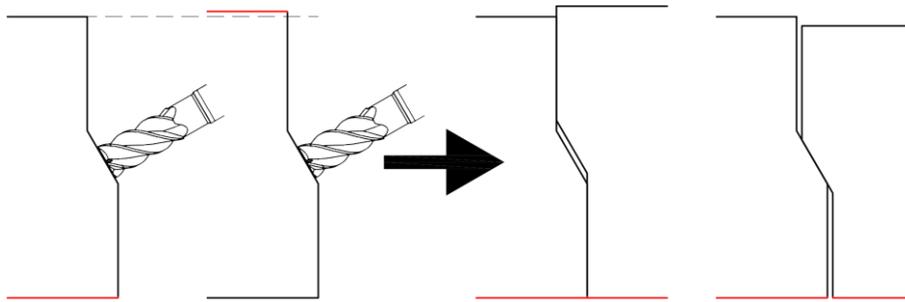


Abbildung 79: Durch Abweichungen in der Plattenstärke verursachten Ungenauigkeiten in der Herstellung



Abbildung 80: Keine vollflächige Verklebung des BSP-Elementes mit der Brettlage. 17,9%(links) und 15,2%(rechts) der Fläche sind nicht verklebt

Die Biegeversuchsreihe mit einer Brettlage als Zugzone wird wiederholt. Dabei werden die BSP-Elemente beidseitig gehobelt, die Oberflächen geschliffen und entfettet sowie die Klebstoffmenge auf 200g/m^2 erhöht. Zwei von drei Prüfkörper erreichen mit 55kN die maximale Kraft der Prüfmaschine, ein Prüfkörper versagt zunächst auf Rollschubversagen, anschließend bricht die Zuglage spröde (Abbildung 81). Die charakteristische Tragfähigkeit der zusammengesetzten Träger mit einer Brettlage als Zugzone beträgt 179% der ursprünglichen BSP-Platte ($44,82\text{kN} / 25,92\text{kN} = 1,79$ – vgl. die charakteristischen Werte aus Abbildung 82 und Abbildung 76).



Abbildung 81: Bruchbild 4-Punkt-Biegeversuch an BSP-Restholzträger mit aufgeklebter Zugzone: Zugversagen

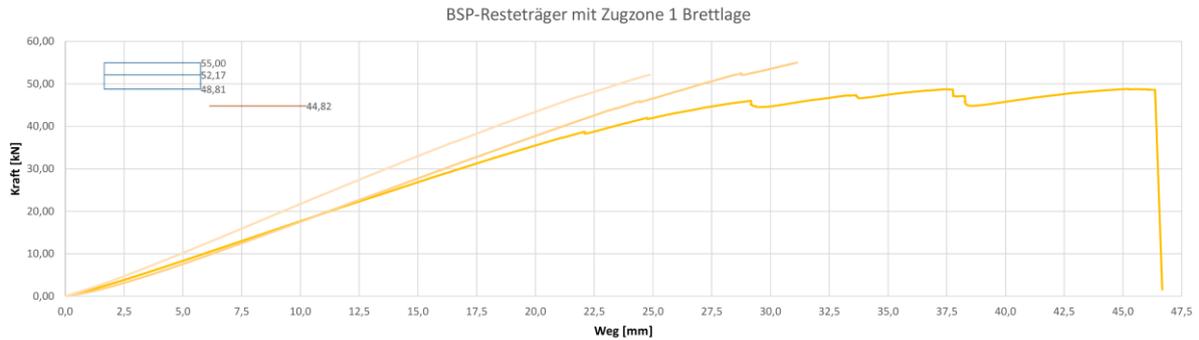


Abbildung 82: Kraft-Weg-Diagramm: 4-Punkt-Biegeversuch. BSP-Reste mit einer Brettlage als Zugzone mit max, mean, min und 5%-Fraktilwert

4.5.3 Untersuchungen an BSP-Restholzträgern mit zwei Brettlagen als Zugzone

Die Probekörper sind aufgebaut wie die Probekörper mit einer Brettlage als Zugzone; allerdings werden zwei Brettlagen eingesetzt um Steifigkeit und Tragfähigkeit zu erhöhen. Bei der Durchführung der Versuche zeigte sich, dass die Tragfähigkeit der Proben deutlich die Kapazitäten der zur Verfügung stehenden Prüfmaschine überstiegen. Nach zwei Versuchen wurde die Versuchsreihe abgebrochen. Ein Probekörper in der Breite von 200mm wurde anschließend auf 150mm reduziert und geprüft. Der Prüfkörper versagt bei einer Last von 49,6kN, wie auch im Idealfall die Originalplatte BSP105W-5, auf Rollschub. Das Prüfergebn wird entsprechend der Breitenänderung wieder auf 200mm Breite interpoliert und in Abbildung 83 als blaue Kurve dargestellt. Somit wäre eine Tragfähigkeit dieser Versuchsanordnung zwischen 60 und 70kN zu erwarten.

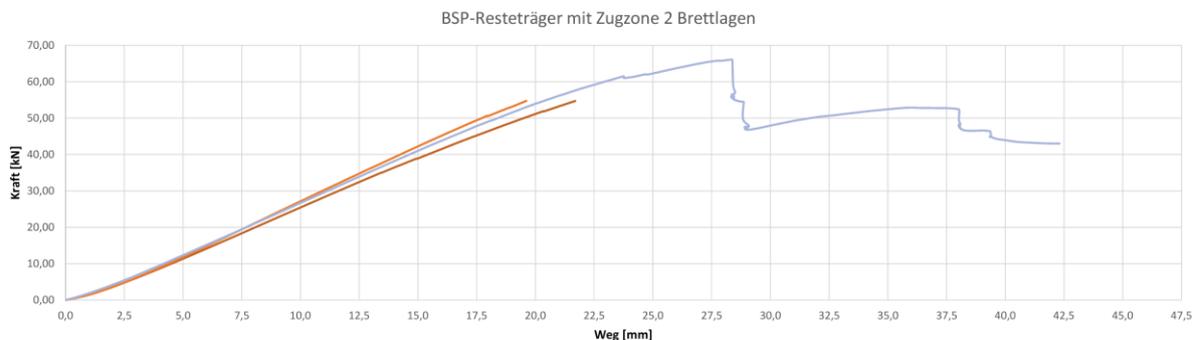


Abbildung 83: Kraft-Weg-Diagramm: 4-Punkt-Biegeversuch. BSP-Reste mit 2 Brettlagen als Zugzone. Blaue Kurve ist interpoliert aus dem Versuch mit 150mm breiten Probekörper

Eine weitere Erkenntnis aus diesem Versuch ist die vergleichsweise hohe Resttragfähigkeit von ca. 80% nach Rollschubversagen. Zurückzuführen ist sie auf die vergleichsweise hohe Querkrafttragfähigkeit der unteren beiden Längslagen (Abbildung 84).

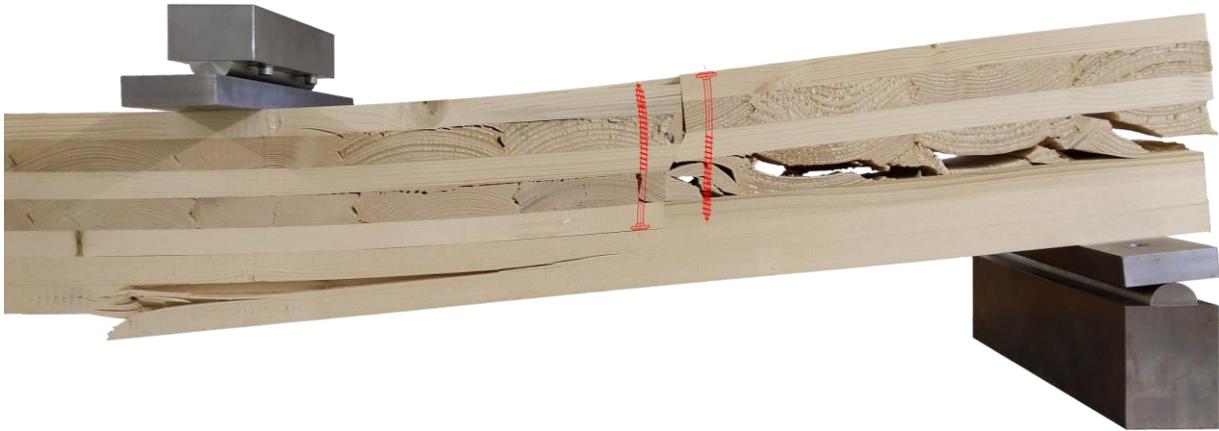


Abbildung 84: 4-Punkt-Biegeversuch an BSP-Restholzträger mit 15cm Breite und zwei Brettlagen als Zugzone. Hohe Resttragfähigkeit durch Schraubverstärkung im Stoß zwischen den BSP-Platten

4.5.4 Untersuchungen an BSP-Restholzträgern mit Zug- und Druckzone aus jeweils einer Brettlage

Zusätzlich zu den mit Zuglagen verstärkten Probekörpern wurde auch eine Versuchsreihe durchgeführt, bei der die BSP-Reste zwischen zwei Brettlagen eingeklebt wurden. Zusätzlich zur Ausbildung einer Biegezugzone wurde die Biegedruckzone verstärkt. Die BSP-Restholzplatten erfüllen in dieser Zusammensetzung die Aufgabe der Querkraftübertragung und bei geschlossener Stoßfuge auch die zusätzliche Druckübertragung durch Kontakt. Hierzu wurden die BSP-Reste mit dem Querkraftstoß versehen, analog zu den oben ausgeführten Versuchen.

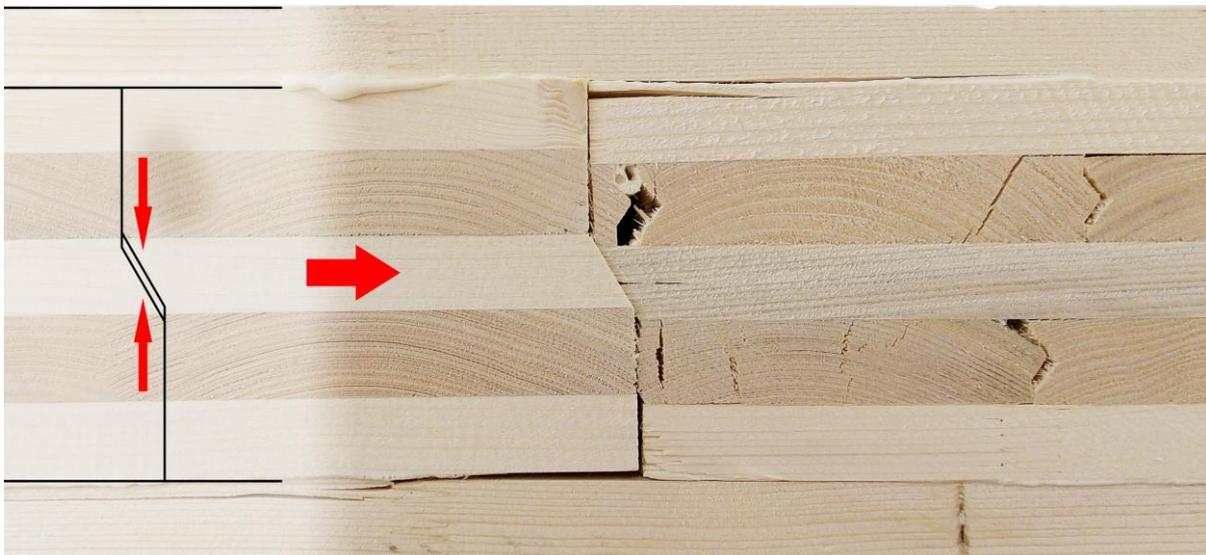


Abbildung 85: toleranzbedingte Fuge im Querkraftstoß nach der Versuchsbelastung mit der Folge des Ablösens der Decklagen

Die in Abbildung 79 beschriebenen toleranzbedingten möglichen Ungenauigkeiten in der Herstellung zeigen sich auch bei den Versuchen mit oben und unten aufgeklebten Brettlagen. Hier wirken sich die Fugen insbesondere auf die Querkraftübertragung aus. Sobald die Belastung so hoch ist, dass die Querkzugfestigkeit der Klebfuge oder der Holzfasern in den aufgeklebten Brettlagen erreicht wird, entstehen faserparallele Risse im Bereich des Querkraftstoßes. Die BSP-Elemente rutschen schlagartig aufeinander, so dass sich die Kontaktfuge schließt. Der Kraftfluss ist gestört und führt in den hoch biegebeanspruchten Randlamellen zu Spannungskonzentrationen und im Querkraftstoß zum

Steifigkeitsverlust. Die Versuchskörper versagen durch Zugbruch in der unteren Lamelle oder durch Rollschubversagen (Abbildung 86).

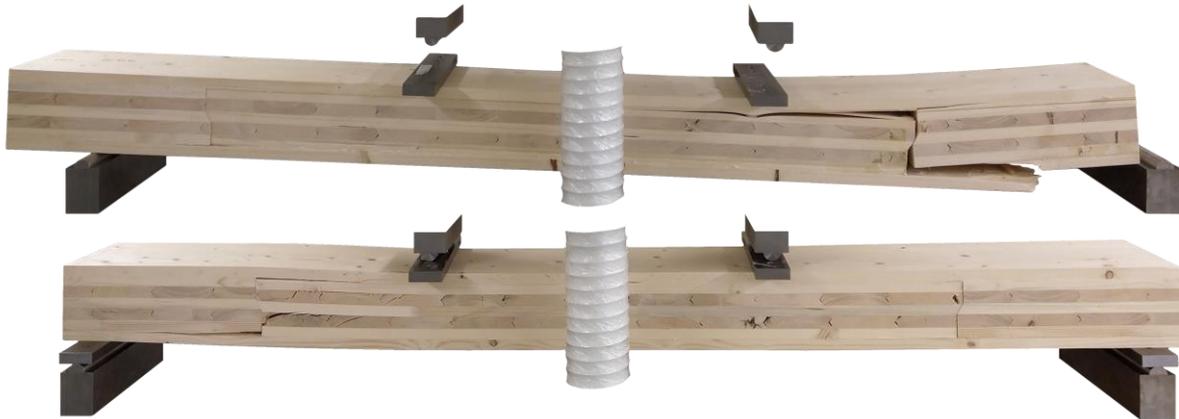


Abbildung 86: Bruchbild 4-Punkt-Biegeversuch an BSP-Restholzträger mit aufgeklebter Zug- und Druckzone

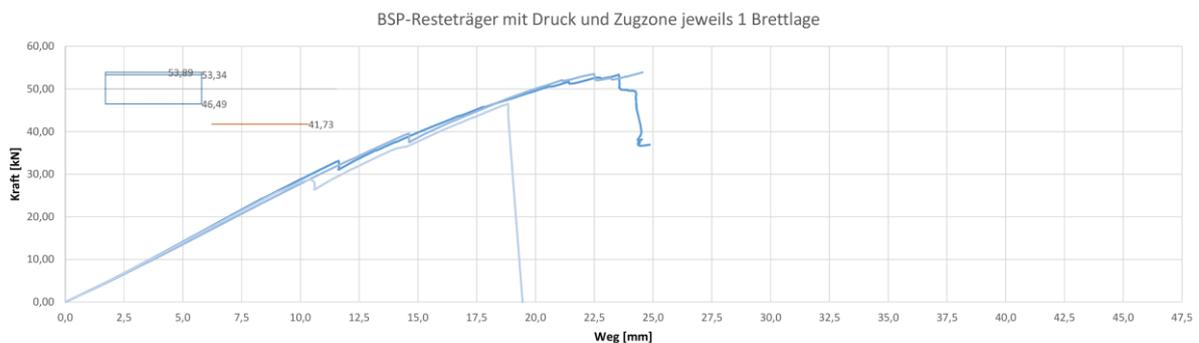


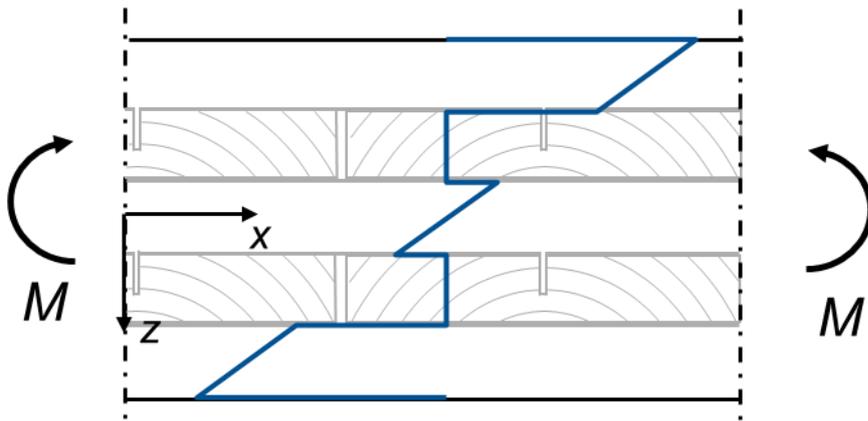
Abbildung 87: Kraft-Weg-Diagramm: 4-Punkt-Biegeversuch BSP-Reste mit Zug- und Druckzone aus jeweils einer Brettlage mit max, mean, min und 5%-Fraktilwert

Die erreichten Tragfähigkeiten sind vergleichbar mit denen der Probekörper mit nur einer Zuglage. Die Ungenauigkeiten, die in beiden Versuchsanordnungen auftreten können, kommen bei den Probekörpern mit beidseitiger Verklebung stärker zum Vorschein, da die Verschiebungen ruckartig auftreten. In Probekörpern mit einer oder zwei Zuglagen findet die toleranzbedingte Verschiebung allmählich statt und der Prüfkörper erfährt keine plötzlichen Krafteinwirkungen. Grundsätzlich aber sind die Dickentoleranzen der gefügten BSP-Elemente zu vermeiden.

4.5.5 Strategie zur Biegebemessung für Decken aus BSP-Produktionsabfällen

Grundmodul: Originalplatte BSP 106W-5

Durch die kreuzweise Verklebung von BSP-Platten erhöhen sich die Längsspannungen aufgrund hoher Rollschubverformungen der Querlagen. Diese geringen Rollschubsteifigkeiten der Querlagen führen zum nachgiebigen Verbund. Grundsätzlich sind die erhöhten Längsspannungen vernachlässigbar für $\ell_{CLT}/t_{CLT} > 30^1$ (ℓ_{CLT} = Plattenlänge und t_{CLT} = Plattenhöhe). Das bedeutet, dass die Spannungsnachweise mit „starrer“ Verbund geführt werden können. Diese Angaben haben Gültigkeit für eine Plattenhöhe von $< 217\text{mm}$ bei einer Plattenlänge von $6,5\text{m}$. Da die Querlagen untereinander an den Seitenflächen nicht verklebt sind, wird die Längstragfähigkeit der Querlagen zu Null gesetzt (Abbildung 88).



Elastizitätsmodul [N/mm²]

- Längslagen: $E_{0,\text{mean}} = 11000$
- Querlagen: $E_{90} \rightarrow 0$ (Fugen)

Abbildung 88: Darstellung der Spannungsverteilung im 5-lagigen Brettsperrholz bei „starrem“ Verbund

Das Trägheitsmoment setzt sich aus dem Eigentragheitsmoment und den Steiner-Anteilen der Brettlängslagen zusammen. Es folgt für die Einheitsbreite von 100cm:

$$I_{\text{eff}} = 3 \cdot \left(\frac{100 \cdot 2^3}{12} \right) + 2 \cdot (2 \cdot 100 \cdot 4,3^2) = 7596 \text{ cm}^4 \quad \text{Gl. 15}$$

$$W_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{eff}}}{\left(\frac{10,6}{2} \right)} = 1433 \text{ cm}^3 \quad \text{Gl. 16}$$

Mit $f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$ folgt:

$$M_{\text{aufnehmbar}} = \frac{24}{10} \cdot \left(\frac{1433}{100} \right) = 34,3 \text{ kNm/m} \quad \text{Gl. 17}$$

Für den durch BSP-Produktionsabfälle zusammengesetzten Träger ist der Querkraftstoß die bemessungsrelevante Stelle. Es wird daher nachfolgend anhand eines Stabwerkmodells für den Biegeträger das aufnehmbare Biegemoment $M_{\text{aufnehmbar}}$ ermittelt (Abbildung 89). Dazu wird vereinfacht die Spannungsverteilung der Biegedruck- und Biegezugzone konstant angesetzt und die Festigkeiten für reinen Druck und Zug für Nadelholz C24 verwendet. Betrachtet man den Träger im verformten Zustand, stellt man fest, dass eine „Druckvorspannung“ aus der Ulenkkraftwirkung von Biegedruck- und Biegezugzone entsteht, die der Querkraftbeanspruchung günstig entgegenwirkt.

Das Stabwerkmodell des Biegeträgers entspricht dem Stabwerkmodell des Kragträgers (z. B. Abbildung 57). Querkraftbeanspruchung und Rollschubbeanspruchung treten in beiden Fällen auf. Der einzige Unterschied ist die Richtung der Rollschubverformung, nicht aber die Kräfteverteilung unter der Annahme einer reibungsfreien Kontaktfläche.

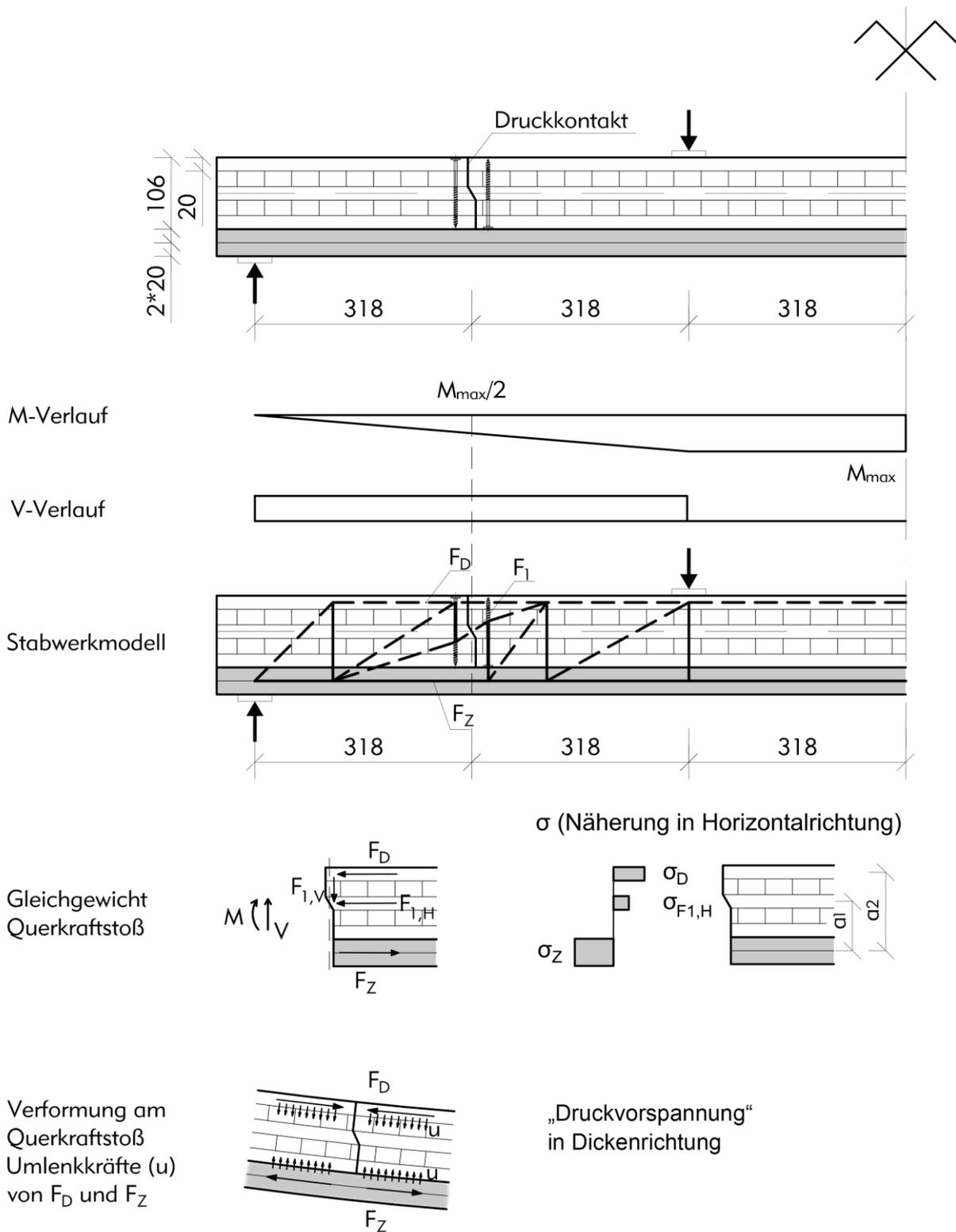


Abbildung 89: Stabwerkmodell für einfeldrige Deckenplatten aus BSP-Produktionsabfällen. Unten: „Druckvorspannung“ aus Umlenkkräfte Wirkung von Biegedruck- und Biegezugzone im verformten Zustand

Die Biegedruckzone besteht aus einer 20mm starken Brettlage. Die Biegezugzone besteht aus zwei Brettlagen zu je 20mm. Für das Momentengleichgewicht im Querkraftstoß des Stabwerkmodells ist auch der horizontale Anteil der Querkraft anzusetzen. Das Momentengleichgewicht wird mit den Eigen- und Ausbaulasten nach Abbildung 21 rechts und einer Verkehrslast von 3kN/m^2 geführt. Es wird der Nachweis

für die Feldmitte geführt (Querkraft = 0) und für die Stelle des Plattenstoßes in 1m Entfernung zur Deckenmitte. Diese Anordnung entspricht einer zur Deckenmitte symmetrischen Anordnung der Produktionsabfälle mit 2m Länge. In Auflagernähe sind aufgrund der geringen Biegebeanspruchung keine Biegenachweise mehr erforderlich. Der Querkraftnachweis am Auflager ist erfüllt (Kapitel 4.3.4). Für das maximale Biegemoment (M_{\max}) in Feldmitte gilt:

$$M_{\max} = 8,53 \cdot 6,5^2/8 = 45,05 \text{ kNm/m} \quad \text{Gl. 18}$$

Für das Biegemoment (M_1) in 1m Entfernung zur Deckenmitte gilt:

$$M_1 = (8,53 \cdot 6,5/2) \cdot 2,25 - 8,53 \cdot 2,25^2/2 = 40,78 \text{ kNm/m} \quad \text{Gl. 19}$$

Die zu M_1 zugehörige Querkraft V_1 und daraus die Horizontalkomponente in Querkraftstoß ($F_{H,k}$) beträgt:

$$V_1 = 8,53 \cdot 6,5/2 - 8,53 \cdot 2,25 = 8,53 \text{ kN/m} \quad \text{Gl. 20}$$

$$F_{H,k} = 8,53 / (\tan 30^\circ) = 14,8 \text{ kN/m} \quad \text{Gl. 21}$$

Das aufnehmbare Biegemoment im Querkraftstoß ($M_{\text{Querkraftstoß,max}}$) des mit zwei Brettlagen C24 verstärkten Biegeträgers beträgt in Feldmitte auf die Einheitsbreite von 100cm bezogen:

Summe aller Horizontalkräfte = 0

$$F_{Z,k} - F_{D,k} = 0 \quad \text{Gl. 22}$$

$$\text{mit } F_{Z,k} = 14/10 \cdot 2 \cdot 2,0 \cdot 100 = 560 \text{ kN} \quad \text{Gl. 23}$$

$$\text{und mit } F_{D,k} = 21/10 \cdot 2 \cdot 2,0 \cdot 100 = 420 \text{ kN} \text{ maßgebend} \quad \text{Gl. 24}$$

Mit dem Abstand $a_2 = 11,6\text{cm}$ (Abbildung 89) folgt für das aufnehmbare Biegemoment in Feldmitte ($M_{\text{Querkraftstoß,max,k}}$):

$$\text{max. } M_{\text{Querkraftstoß,max,k}} = 420 \cdot 0,116 = 48,72 \text{ kNm/m} > 45,05 \text{ kNm/m} > 34,3 \text{ kNm/m} \quad \text{Gl. 25}$$

Das aufnehmbare Biegemoment im Querkraftstoß ($M_{\text{Querkraftstoß,1}}$) des mit zwei Brettlagen C24 verstärkten Biegeträgers beträgt in 1m Abstand zur Deckenmitte auf die Einheitsbreite von 100cm bezogen:

Summe aller Horizontalkräfte = 0

$$F_{Z,1,k} - F_{D,1,k} - F_{H,k} = 0 \quad \text{Gl. 26}$$

$$\text{mit } F_{Z,1,k} = 14/10 \cdot 2 \cdot 2,0 \cdot 100 = 560 \text{ kN} \quad \text{Gl. 27}$$

$$\text{und mit } F_{D,1,k} = 560 - 14,8 = 545,2 \text{ kN} > 420 \text{ kN} \text{ maßgebend} \quad \text{Gl. 28}$$

Mit den Abständen $a_2 = 11.6\text{cm}$ und $a_1 = 7.3\text{cm}$ (Abbildung 89) folgt für das aufnehmbare Biegemoment im Querkraftstoß ($M_{\text{Querkraftstoß},1,k}$) mit der Querkraftbeanspruchung infolge der Belastung:

$$\max. M_{\text{Querkraftstoß},1,k} = 420 \cdot 0,116 + 14,8 \cdot 0,073 = 49,80 \text{ kNm/m} > 45,05 \text{ kNm/m} > 34,3 \text{ kNm/m} \quad \text{Gl. 29}$$

Es zeigt sich, dass die mit zwei Zuglagen verstärkte Konstruktion die Beanspruchungen für eine 6,5m weit spannende Deckenplatte sowohl für Querkraft als auch für Biegung an jeder Stelle des Trägers aufnehmen kann. Das Grundmodul BSP 106W-5 kann dies alleine, was bei 6,5 m Spannweite zu erwarten war, nicht. Daher ist eine Verstärkung mit zusätzlichen Brettlagen für Deckentragwerke aus Produktionsabfällen dünner Wandelemente grundsätzlich vorzunehmen. Alternativ sind sie in den im Kapitel 5 aufgeführten Konstruktionsweisen zu verwenden.

4.5.6 Interpretation

Plattenelemente aus Brettsperrholzresten bieten eine Möglichkeit der Kaskadennutzung von Produktionsresten, ermöglicht durch Querkraftstöße und zusätzliche Brettlagen für die Zug- und/oder Druckzone. Die experimentellen Untersuchungen zur Biegetragfähigkeit haben gezeigt, dass die so zusammengesetzten Plattenelemente eine vergleichbare bis deutlich höhere Tragfähigkeit als die originalen BSP-Platten 106W-5 erreichen können (Abbildung 90). Die besten Ergebnisse wurden mit zwei Brettlagen in der Zugzone erzielt. In der industriellen Herstellung kann aus wirtschaftlichen Gründen die Verklebung mit vorgefertigten Standardplatten BSP 66L-3 als Zugzone sinnvoll sein.

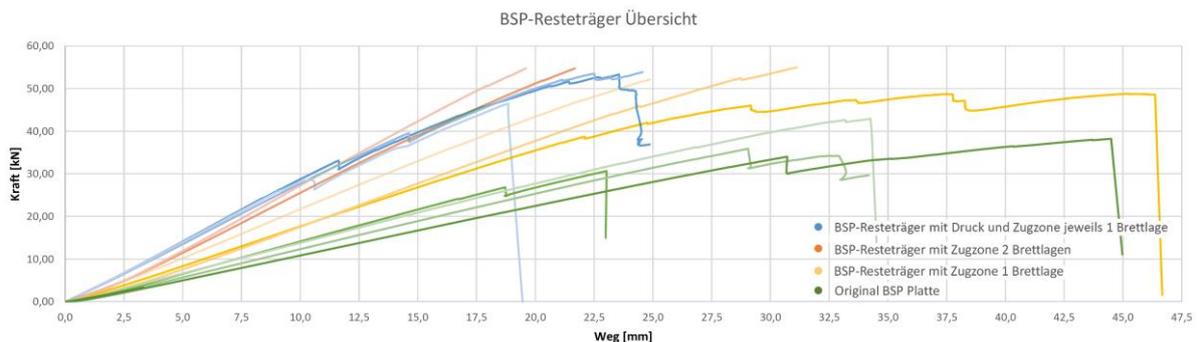


Abbildung 90: Übersichtdiagramm der Biegetragfähigkeit der aus BSP-Restholzplatten zusammengesetzten Träger

5 Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

Zunächst wurden Projekte des Praxispartners, der Eugen Decker Holzindustrie AG, ausgewertet und die häufigsten Formate der Restplatten ermittelt, die die Grundmodule der weiteren Untersuchung wurden. Die häufigsten Produktionsabfälle waren Wandausschnitte des Plattenformates 106W-5.

Um die Reststücke zu neuen Wand- oder Deckenelementen zu fügen, wurde eine Verbindung mit Fremdfedern aus Buchen-Furnierschichtholz eingesetzt, die stumpfe Stöße der Restplatten und somit eine relativ unkomplizierte Herstellung erlauben. Im Abbund kann dazu zukünftig zunächst die Geometrie der weiter zu verwendenden Reste einschließlich Ausnehmungen für Verbindungen aus der Rohplatte gefräst werden, bevor die etwas größere, eigentliche Fenster- oder Türöffnung hergestellt wird. So entstehen massive, flächige Bauteile mit Scheibenwirkung, die direkt als tragende oder aussteifende Wände einsetzbar sind und wie Vollholz verarbeitet werden können, nachdem sie keine Stahlteile enthalten. Für eine plattenartige Belastung als Deckenelement ist diese Verbindung jedoch nicht geeignet. Dazu wurden zwei unterschiedliche Möglichkeiten untersucht: Die Elemente der BSP-Restholzplatten werden mit einer oder zwei Lagen Vollholzbretter verklebt, so dass ein Verbundelement entsteht. Die Vollholzbretter, die in Spannrichtung angeordnet sind, bilden die Zugzone, die Brettsperrholzreste über Kontakt die Druckzone. Dieses Verfahren könnte den Produktionsmöglichkeiten der Hersteller entgegenkommen. Die andere Möglichkeit ist, die Restholzplatten als Sekundärtragwerk einer Balkendecke einzusetzen. Die Balken können dabei entweder unterhalb oder zwischen den Brettsperrholzresten angeordnet sein. In beiden Fällen ist es geplant, Deckenelemente herzustellen, die mechanisch verbunden sind, damit sie ihrerseits zerleg- und recycelbar sind.

Zur Herstellung der Decken aus BSP-Produktionsabfällen werden die Plattenreste mit möglichst wenig Verlust auf ein einheitliches Maß gebracht. Es entstehen dadurch Elemente mit ca. 80cm Breite und 1,60m – 2,00m Länge, die für die im Wohnungsbau üblichen Spannweiten von 4,0m bis 6,5m zusammengesetzt werden. Die experimentellen Ergebnisse haben gezeigt, dass die Decke aus BSP-Produktionsabfällen, verstärkt mit 6 x 100tg Schrauben und verklebt mit 2 x 20mm Brettlagen als Zuglagen, die besten Ergebnisse erbrachten. Demzufolge wird die empfohlene Konstruktion an diese Bedingungen angepasst (Abbildung 91 und Abbildung 92). Entlang des Querkraftstoßes werden zur Aufnahme der Querkraftbeanspruchung Teilgewindeschrauben im Abstand von ca. 10cm eingebracht. Anschließend werden die BSP-Elemente mit den Fremdfedern aus Buchen-FSH miteinander verbunden und mit der Zugzone aus Brettlamellen zu fertigen Deckenelementen in gewünschter Transportbreite (0,8-2,5m) verklebt. Alternativ können auch dreischichtige BSP-Platten als Zugzone eingesetzt werden, um die Produktion zu vereinfachen. Um eine Scheibenwirkung zu erzielen, werden die Deckenelemente während der Montage formschlüssig mit Fremdfedern verbunden. Der Bodenaufbau kann analog einer Standard-BSP-Decke erfolgen (siehe Abbildung 21).

Im Zuge der Herstellung und Prüfung der Versuchskörper dieser Forschungsarbeit wurden Dickentoleranzen der Abfallplatten festgestellt, die zu Ungenauigkeiten bei Fräsung und Verklebung der Plattenelemente führen und damit eine Beeinträchtigung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit verursachen können. Deckenelemente mit Querkraftstößen in Form von Versätzen sind somit nur bei exakter Herstellung sinnvoll. Außerdem bedarf es einer zusätzlichen Untersuchung zu Wirtschaftlichkeitsfaktoren wie den Herstellungsaufwand, den Lager- und Sortieraufwand der BSP-Restholzplatten oder auch die Kosten von Verzögerungen durch den Eingriff in das Produktionsverfahren der eigentlichen BSP-Produktionslinie der Hersteller.

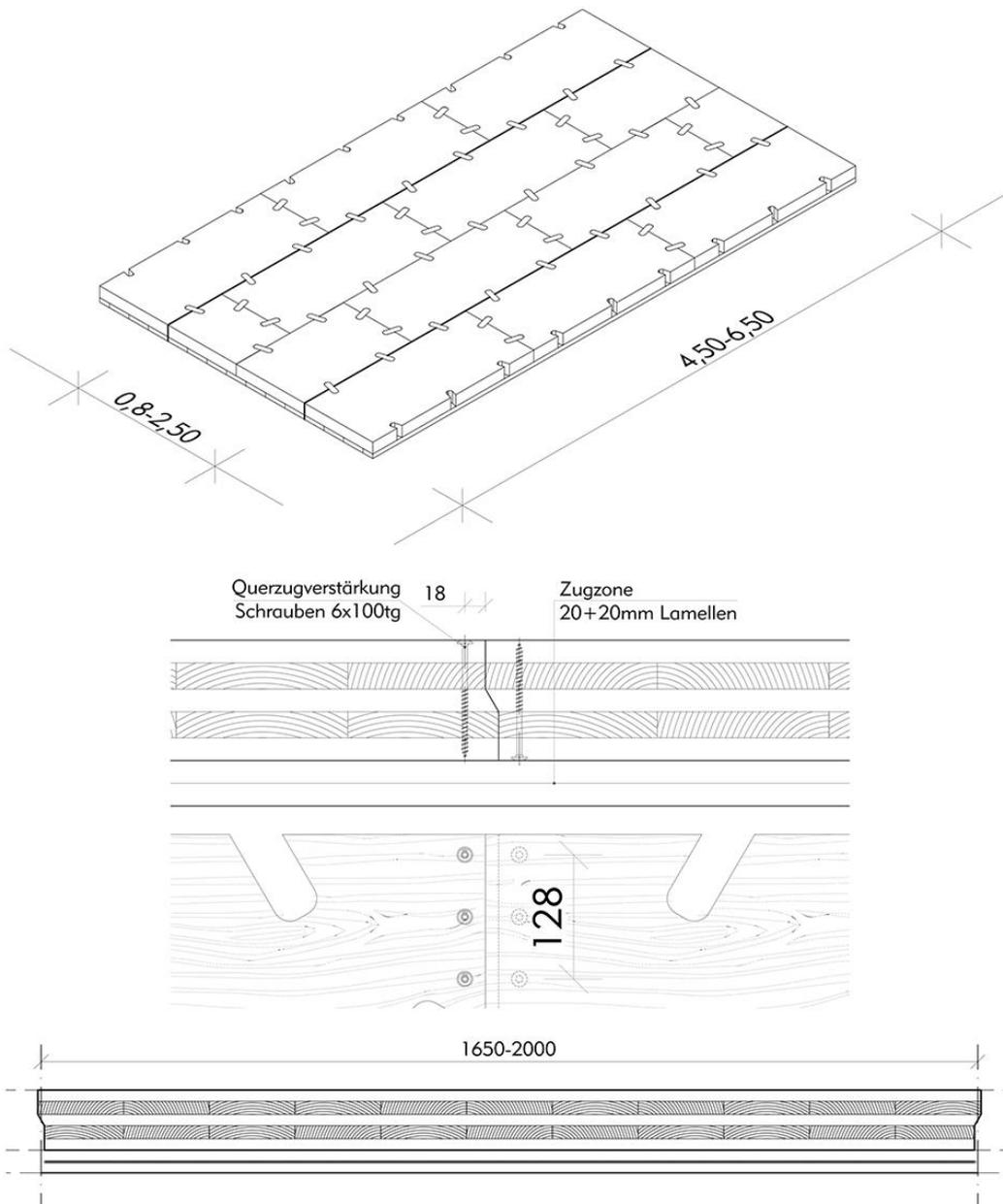


Abbildung 91: Deckenkonstruktion aus BSP-Restholzplatten mit zusätzlichen Brettlagen in der Zugzone

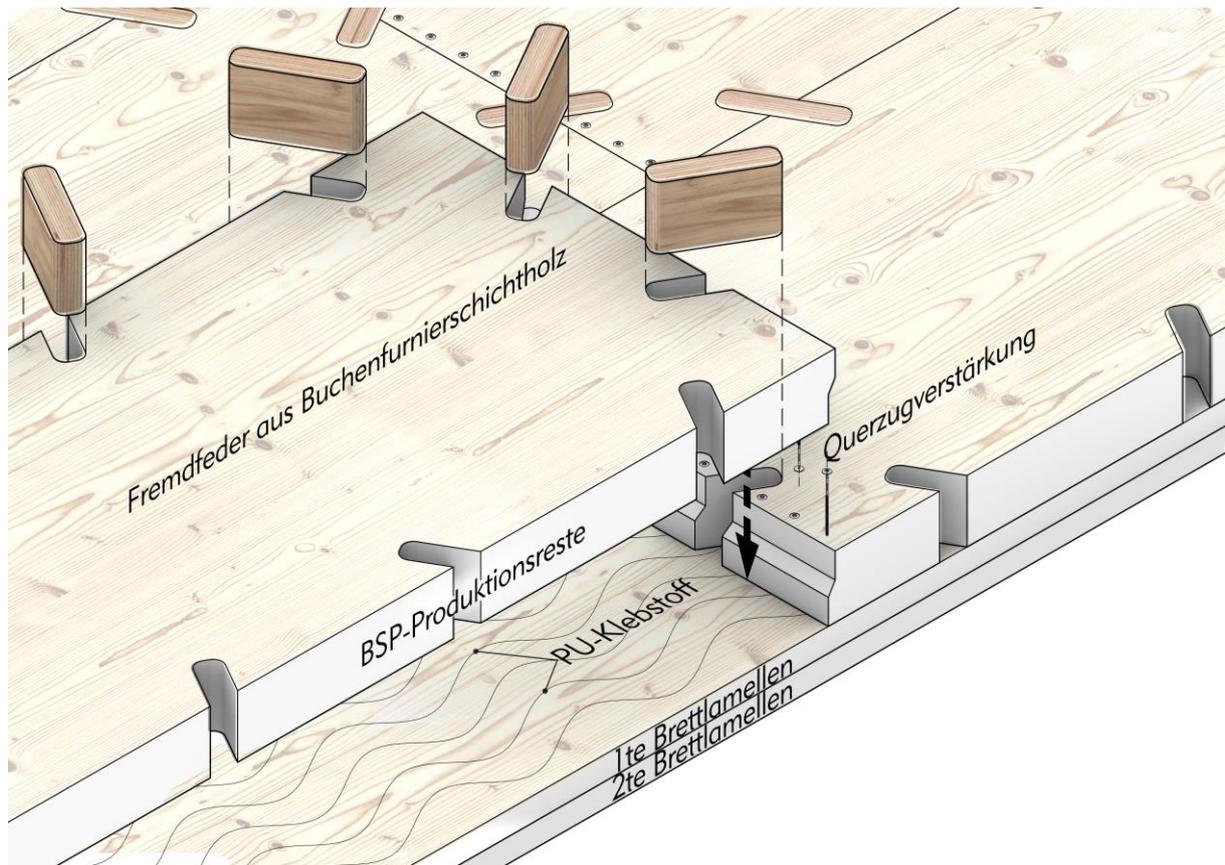


Abbildung 92: Visualisierung der Deckenkonstruktion aus BSP-Restholzplatten mit zusätzlichen Brettlagen in der Zugzone

Die Aufbereitung der BSP-Produktionsabfälle und die Fertigung der Elemente zu Deckensystemen kann auch vereinfacht werden. Als alternatives Deckensystem wird vorgeschlagen, auf die Verklebung der BSP-Produktionsreste mit einer zusätzlichen Zugzone aus Brettlagen zu verzichten und stattdessen die Restholzplatten im Verbund mit einer Balkenlage zu verwenden. Dazu sind die Deckenplatten in Standardgrößen zu besäumen. Die Montage erfolgt dann mit Hilfe von Schwalbenschwanzverbindern mit dazwischenliegendem Keil, die die BSP-Platten zusammenziehen und diese gleichzeitig schubfest untereinander und mit den BSH-Balken befestigen (Abbildung 93 und Abbildung 94). Beim Anziehen der Montageschraube gleitet der Keil in die dazu vorgesehene Tasche im Balken, drückt die Schwalbenschwanzhälften auseinander, wodurch die BSP-Platten zusammengezogen werden. Die Schraube sichert die Verbindung gegen Abheben. Die Verbindung ist reversibel und benötigt keine weiteren Sicherungsmaßnahmen. Aufgrund der schubfesten Verbindung liegen die BSP-Platten nicht nur auf, sondern bilden zusammen mit dem Balken einen Verbundträger, bei einfeldrigen Deckensystemen mit Druck in den BSP-Platten und Zug in den Balken. In den Längsseiten der BSP-Platten sind zur Ausbildung der Scheibenwirkung ebenfalls solche reversiblen Verbindungen eingesetzt, allerdings mit halber Verbindungshöhe, damit für die Unterseite der Platten Sichtqualität bewahrt wird.

Die Standardisierung dieser Konstruktion ermöglicht ein großes Spektrum an Spannweiten, da die Tragfähigkeit der Decke sich durch die Anpassung der Balkenquerschnitte einstellen lässt. Die BSP-Platten überbrücken lediglich den Abstand zwischen den Balken. Mit 106mm bzw. 115mm Stärke sind die BSP-Platten für die vorgesehenen Spannweiten von bis zu 2m überdimensioniert. Dennoch ist es von Vorteil, da der erhöhte Querschnitt für eine R30 brandbeanspruchte Decke die Resttragfähigkeit garantiert und damit ohne zusätzliche Beplankungen ausgeführt werden kann.

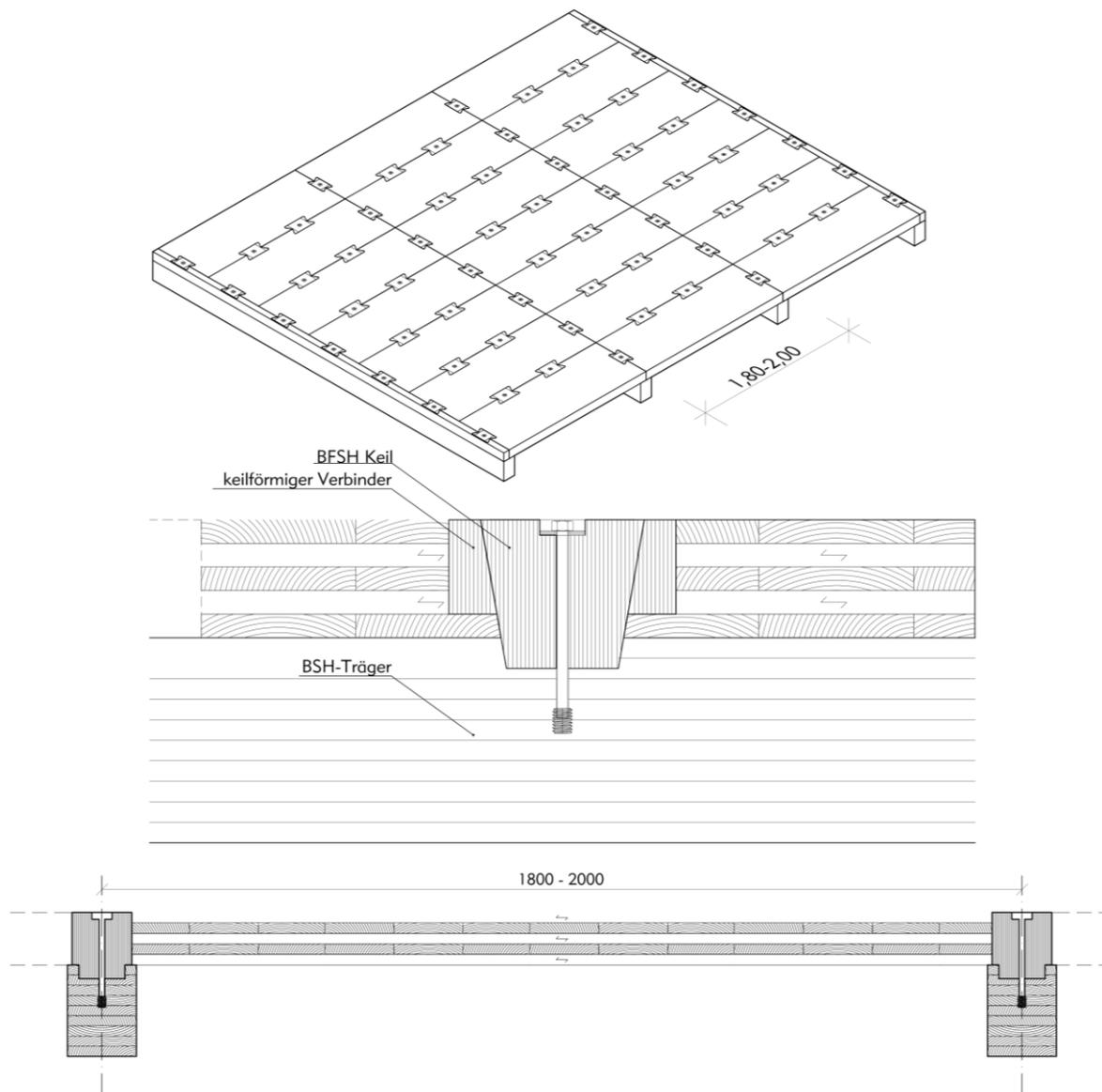


Abbildung 93: Deckenkonstruktion aus BSP-Res Holzplatten im Verbund mit Deckenbalken

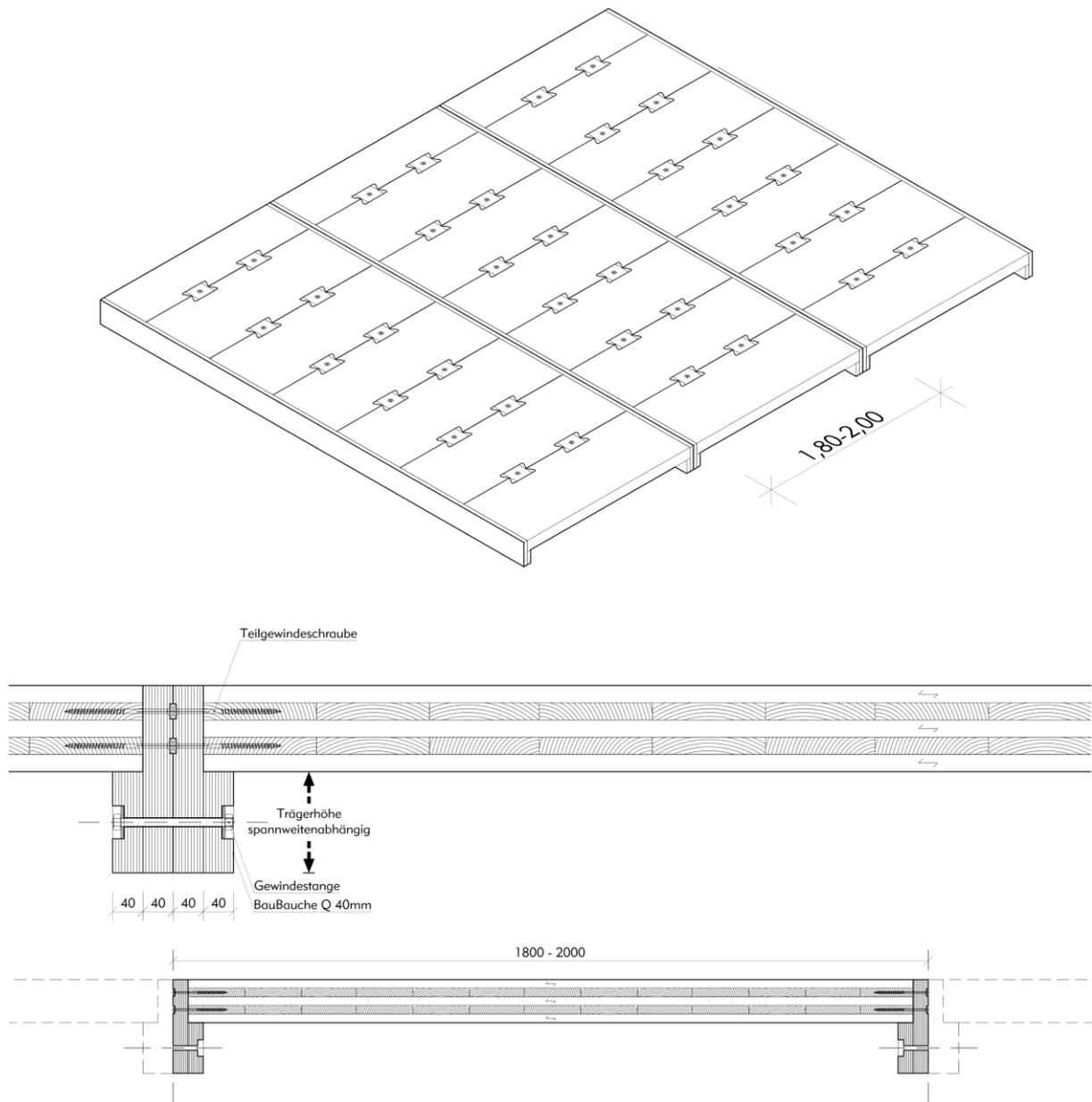


Abbildung 95: Deckenkonstruktion aus BSP-Restholzplatten mit hochfesten BauBuche-Trägern

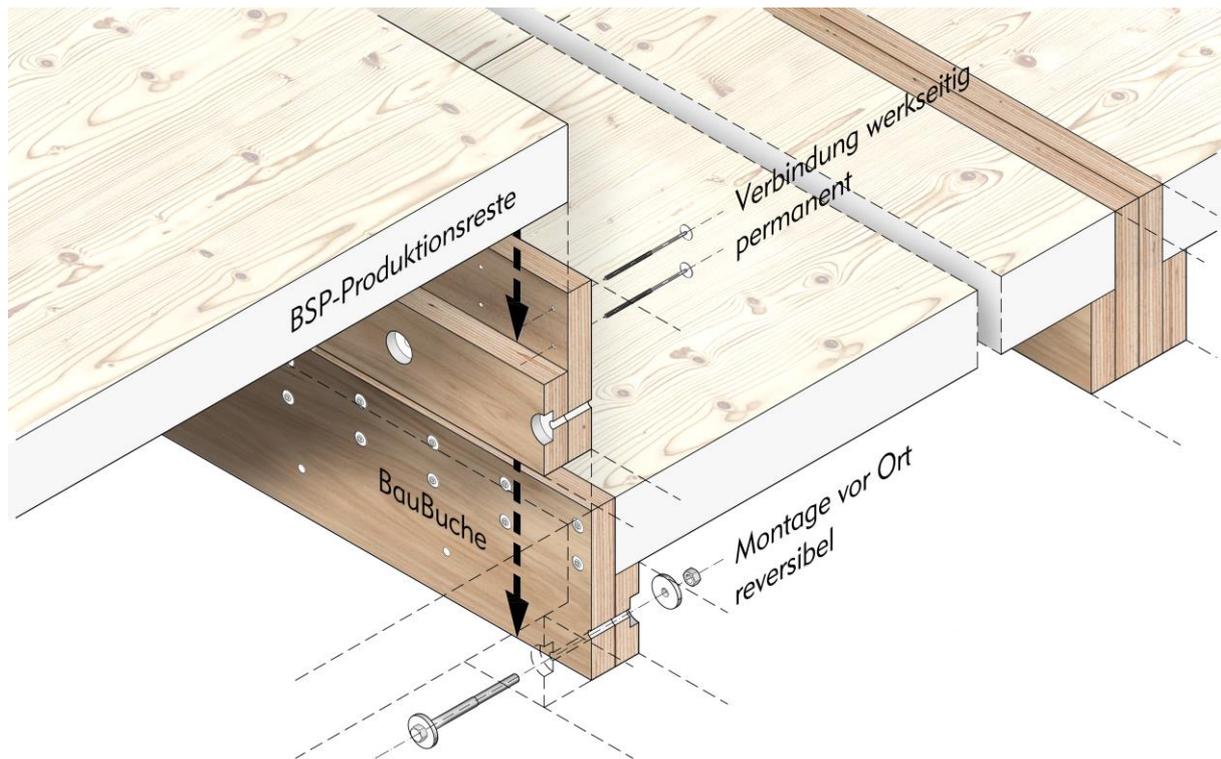


Abbildung 96: Visualisierung der Deckenkonstruktion aus BSP-Restholzplatten mit hochfesten BauBuche-Trägern

Weiterführende Forschungen sollten in folgenden Bereichen stattfinden:

- Scheibentragwirkung
- Untersuchungen in Bauteilgröße
- Aufstellen von Bemessungs- und Herstellungsregeln
- Herstellung und Prüfung der Wirkungsweise von reversiblen Verbindungen
- Aufstellen systemabhängiger Ökobilanzen unter den Randbedingungen des Herstellungsaufwandes sowie der Wieder- und Weiterverwendung der BSP-Produktionsabfälle
- Kreislauffähiges Konstruieren – Erweiterung auf BSP-Wand- und Deckenelemente bei Neubauten

5.2 Ausblick

Die Realisierung von reversiblen Anschlussdetails im Holzbau sowohl in der konstruktiven als auch in der architektonischen Durchbildung ist komplex. Die Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit sowie der baukonstruktiven Sinnhaftigkeit und Ästhetik sind unter den Randbedingungen Hygroskopizität, Anisotropie und Inhomogenität des nativen Werkstoffes Holz mit einem hohen Aufwand verbunden. Das trifft für Vollholzprodukte genauso zu wie für Bauprodukte aus Holzwerkstoffen. Die Erfassung dieser physikalischen Eigenschaften in Entwurf, Konstruktion sowie bei der analytischen und numerischen Bemessung lässt sich nur dadurch wirtschaftlich rechtfertigen, dass standardisierte Bauprodukte in hoher serieller Fertigung angestrebt werden. Besonders im Holzbau lassen sich durch bestehende normative Gesetzmäßigkeiten nur sehr einfache Bauteilanschlüsse auf hohem Sicherheitsniveau realisieren – solch anspruchsvolle Verbindungen können oft nicht normgerecht bemessen werden und sind dann nur mit Zustimmung im Einzelfall für tragende Zwecke anwendbar. Vor allem verlangen Diskontinuitätsbereiche von komplexen Verbindungen im Holzbau eine umfassende Analyse und experimentelle Nachweise.

Wir sind also angehalten, in einer Zeit, in der die Ressource Holz noch in genügender Menge vorhanden ist, jetzt die entwicklungsintensiven Forschungen im Bereich von Rückbaubarkeit, Recycling und

Kaskadennutzung zu leisten. Hermann Kaufmann¹⁶ fordert zurecht, Konstruktionsmethoden so zu verändern, dass sie zu einer hohen Ressourceneffizienz führen. Außerdem sind „Design for Recycling“ und „Urban Mining“ im Bauwesen umzusetzen. Das bedeutet, dass die Kreislaufwirtschaft im Fokus von Entwurf und Konstruktion stehen muss.

Dieses Forschungsprojekt hat sich mit der Thematik zur stofflichen Verwendung von BSP-Produktionsabfällen beschäftigt. Durch die Verwendung von Brettsperrholz im Bauwesen seit ca. 20 Jahren stehen uns in absehbarer Zeit beim Rückbau der daraus erstellten Gebäude Unmengen an BSP-Restholzplatten zur Verfügung. Wir haben heute die Verantwortung für die Wieder- und Weiterverwendung dieser zukünftig anfallenden Bauprodukte. Lösungen für die erneute stoffliche Verwendung sind zu erforschen und zu entwickeln. Für heutige und zukünftige Bauwerke aus BSP-Platten muss bei der zu erwartenden Ressourcenknappheit verantwortlich nach dem Prinzip des „Design for Recycling“ entworfen und konstruiert werden. Dies setzt konkret ein hohes Maß an architektonischer und konstruktiver Disziplin voraus. Bauherren und Planer müssen bereits im Entwurf auf einen Maßnahmenkatalog zurückgreifen können, in dem Konstruktionen für Recycling- und Kaskadenkonzepte unterbreitet werden (z. B. Abbildung 91 bis Abbildung 96). Dieser Maßnahmenkatalog ist heute zu entwickeln. Langfristiges Ziel muss es sein, ein Bemessungsmodul für Planende bereit zu stellen, welches für standardisierte Aufbauten und Spannweiten fertige Konstruktionsweisen der Decken sowie Anschlussdetails an angrenzende Bauteile beinhaltet. Bauämter sollten Anreize schaffen, um Bauprodukte, die für Recycling und Kaskadennutzung geeignet sind und Bauweisen, die Recycling und Kaskadennutzung zulassen, zu fördern. Maßstab für Anreize muss der Nachweis einer reversiblen Demontage von Bauteilen durch einen Rückbauplan sein, mit der Angabe möglicher Kaskaden- und Recyclingkonzepte dieser Bauteile in der Form, dass Bauprodukte, Bauelemente bis hin zu Bausystemen daraus entstehen können. Je nach Effizienz, Konsistenz und Suffizienz¹⁷ dieser Konzepte staffeln sich die Anreize.

Richtungsweisendes Bauen und Forschen mit Holz wird mit den Schwerpunkten Ressourceneffizienz, Kreislaufwirtschaft und Mehrfachnutzung gelingen. Werden in diesen Bereichen viele klimaschonende Ideen entwickelt, wird sich eine entsprechende Bauweise erfolgreich durchsetzen.

¹⁶ Kaufmann, H. (2019). Essay. Die Ressourcenwende steht vor der Tür. Zuschnitt 75. Hrsg. proHolz Austria. Grasl FairPrint, Bad Vöslau

¹⁷ Djahanschah, S. (2019). Konsistenz, Effizienz, Suffizienz. Zukünftige Strategien in Holz. Zuschnitt 75. Hrsg. proHolz Austria. Grasl FairPrint, Bad Vöslau

Anhang A

Übersicht der Scherversuchsergebnisse jeder einzelnen Versuchsreihe

Verstärkungsmittel	Versuchsreihe	Kraft vor dem spröden Querzugversagen [kN]	Mittelwert [kN]	char. Wert [kN]	
nicht verstärkt	V1	001_nv	8,84	9,56	7,51
		002_nv	8,95		
		003_nv	12,20		
		004_nv	9,56		
		005_nv	10,73		
		006_nv	12,59		
		007_nv	10,14		
		008_nv	10,60		
verstärkt mit Vollgewindeschrauben 3x8x80	V2	001_vg	12,28	12,28	8,88
		002_vg	13,23		
		003_vg	10,28		
		004_vg	10,91		
		005_vg	11,73		
		006_vg	13,22		
		007_vg	12,92		
		008_vg	12,76		
		009_vg	10,3		
		010_vg	10,14		
verstärkt mit Vollgewindeschrauben 3x6x100	V3	001_tg	15,06	12,26	9,87
		002_tg	11,22		
		003_tg	12,26		
		004_tg	13,19		
		005_tg	12,10		
		006_tg	13,58		
		007_tg	14,05		
		008_tg	11,31		

Verstärkungsmittel	Versuchsreihe	Kraft vor dem spröden Querzugversagen [kN]	Mittelwert [kN]	char. Wert [kN]
Verstärkt mit Buchendübel 3x8x100/0°	V4	001_8_0	12,38	7,66
		002_8_0		
		003_8_0		
		004_8_0		
		005_8_0		
		006_8_0		
		007_8_0		
		008_8_0		
		009_8_0		
		010_8_0		
Verstärkt mit Buchendübel 3x6x110/30°	V5	001_6_30	12,07	8,98
		002_6_30		
		003_6_30		
		004_6_30		
		005_6_30		
		006_6_30		
		007_6_30		
		008_6_30		
		009_6_30		
		010_6_30		
Verstärkt mit Buchendübel 3x8x110/30°	V6	001_8_30	12,03	9,30
		002_8_30		
		003_8_30		
		004_8_30		
		005_8_30		
		006_8_30		
		007_8_30		
		008_8_30		
		009_8_30		
		010_8_30		

Verstärkungsmittel	Versuchsreihe	Kraft vor dem spröden Querzugversagen [kN]	Mittelwert [kN]	char. Wert [kN]	
Verstärkt mit Buchendübel 3x10x110/30°	V7	001_10_30	12,69	11,47	9,41
		002_10_30	12,65		
		003_10_30	10,08		
		004_10_30	11,01		
		005_10_30	10,82		
		006_10_30	14,10		
		007_10_30	11,35		
		008_10_30	11,59		
		009_10_30	13,65		
Verstärkt mit Buchendübel verklebt 3x8x100/0°	V8	001_8_0_k	10,74	11,21	8,41
		002_8_0_k	10,37		
		003_8_0_k	10,06		
		004_8_0_k	11,67		
		005_8_0_k	9,15		
		006_8_0_k	12,02		
		007_8_0_k	9,91		
		008_8_0_k	12,16		
		009_8_0_k	11,97		
		010_8_0_k	14,62		

Anhang B

Kraft-Weg Diagramme jeder Scherversuchsreihe

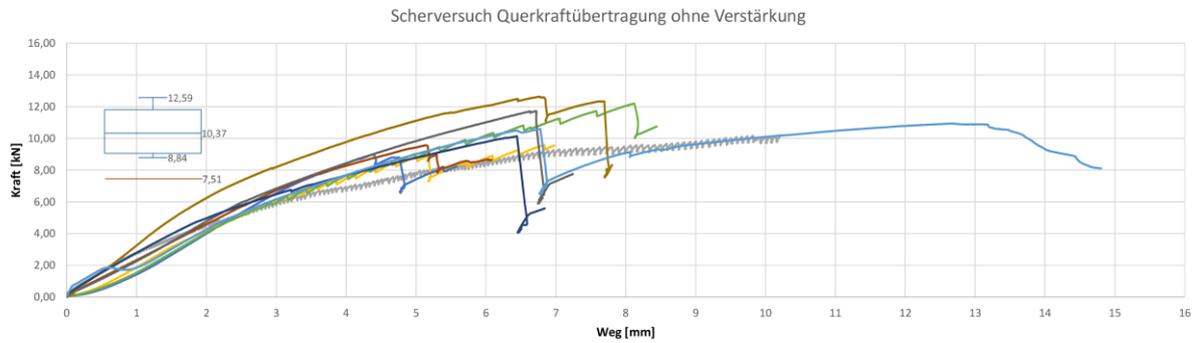


Abbildung 97: Kraft-Weg Diagramm bei nicht verstärktem Querkraftstoß mit max-, mean-, min-Werten und 5%-Fraktilwert

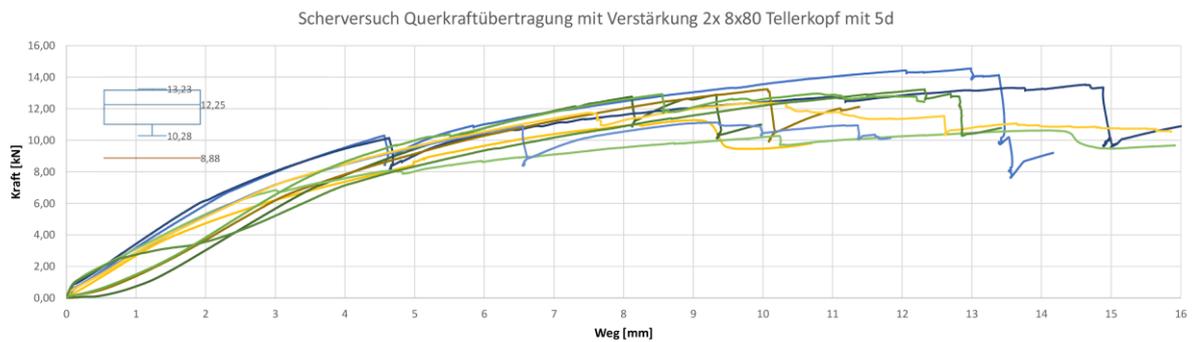


Abbildung 98: Kraft-Weg Diagramm von verstärkten Querkraftstößen: Vollgewindeschrauben 8x80 vg mit max-, mean-, min-Werten und 5%-Fraktilwert

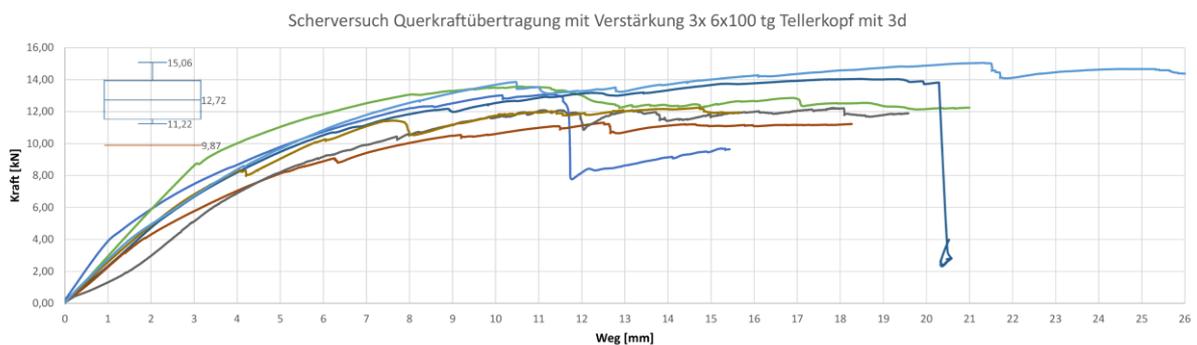


Abbildung 99: Kraft-Weg Diagramm von verstärkten Querkraftstößen: Tellerkopfschrauben 6x100 tg mit max-, mean-, min-Werten und 5%-Fraktilwert

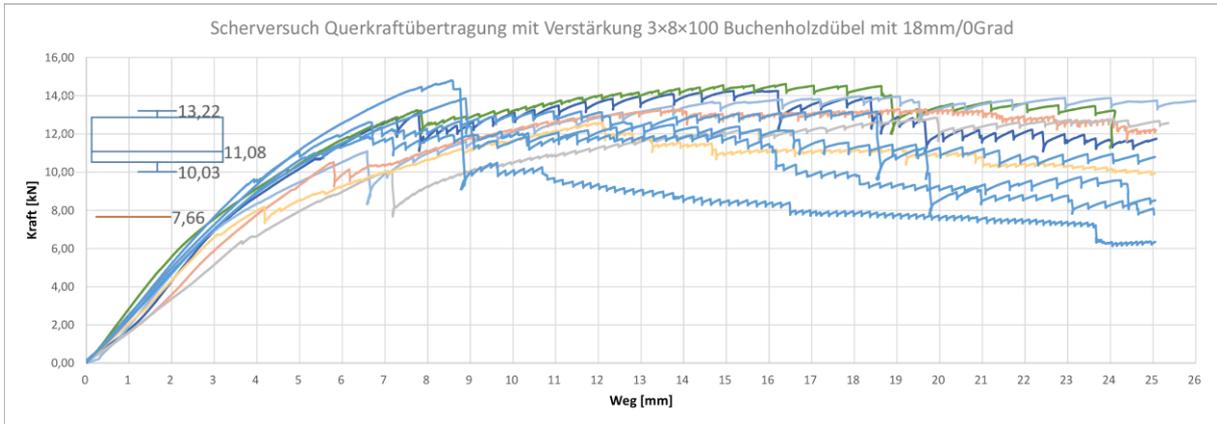


Abbildung 100: Kraft-Weg Diagramme von verstärkten Querkraftstößen: geriffelte Buchendübel $3 \times 8 \times 100/0^\circ$ mit max-, mean-, min-Werten und 5%-Fraktilewert

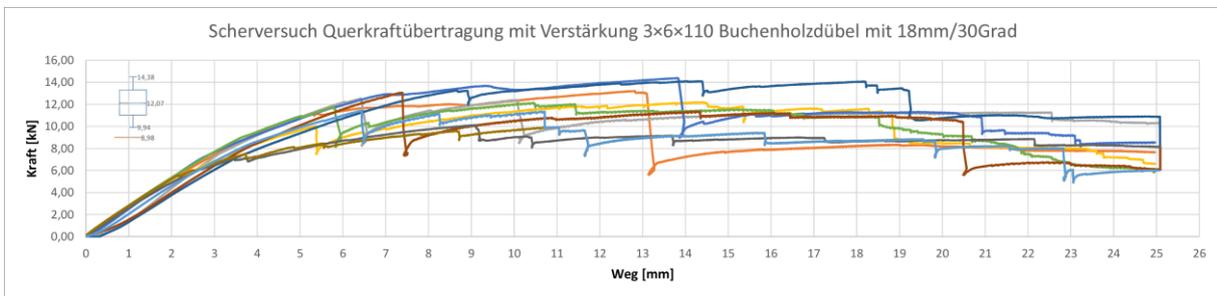


Abbildung 101: Kraft-Weg Diagramme von verstärkten Querkraftstößen: geriffelte Buchendübel $3 \times 6 \times 110/30^\circ$ mit max-, mean-, min-Werten und 5%-Fraktilewert

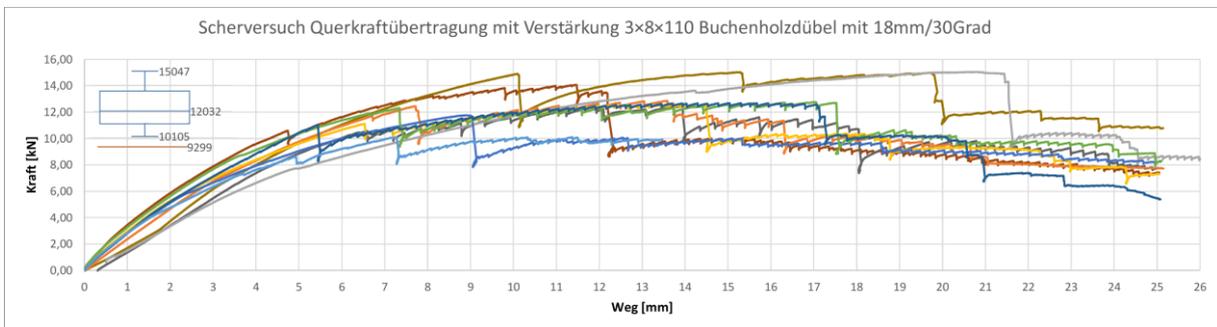


Abbildung 102: Kraft-Weg Diagramme von verstärkten Querkraftstößen: geriffelte Buchendübel $3 \times 8 \times 110/30^\circ$ mit max-, mean-, min-Werten und 5%-Fraktilewert

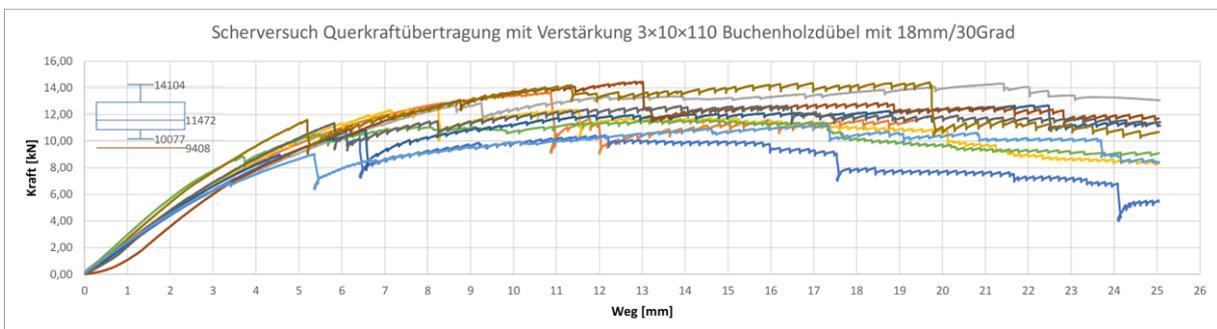


Abbildung 103: Kraft-Weg Diagramme von verstärkten Querkraftstößen: geriffelte Buchendübel $3 \times 10 \times 110/30^\circ$ mit max-, mean-, min-Werten und 5%-Fraktilewert

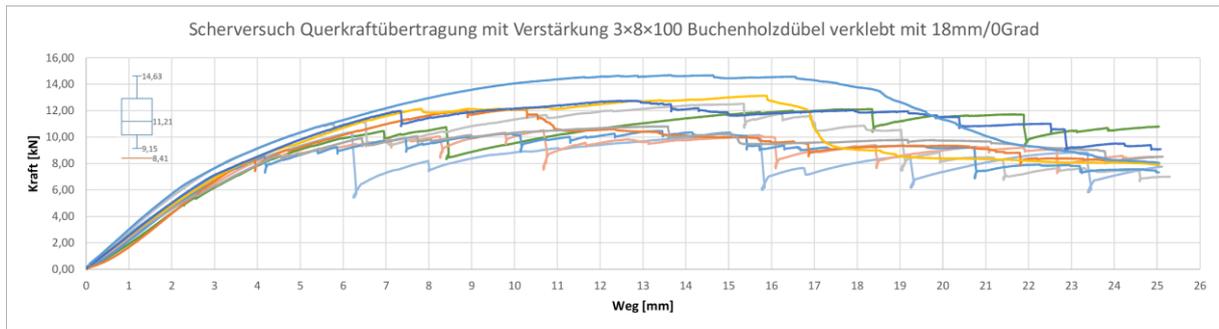


Abbildung 104: Kraft-Weg Diagramme von verstärkten Querkraftstößen: geriffelte Buchendübel 3×8×100/0° verklebt mit max-, mean-, min-Werten und 5%-Fraktilewert

Anlagen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Übersicht der bei der Produktion anfallenden Verschnittgrößen von Restholzplatten	5
Abbildung 2:	Script für die Berechnung des Verlegemusters	6
Abbildung 3:	Aus Größen der BSP-Restholzplatten werden fertige Bauelemente definiert.....	7
Abbildung 4:	Wirkung von Waldspeicher, Produktspeicher, stofflicher Substitution und energetischer Substitution auf die Senkung der Treibhausgasemissionen in Deutschland. Quelle der Speicherwirkungen in %	8
Abbildung 5:	Beispiel für ein mögliches Bilanzierungsmodell	10
Abbildung 6:	X-fix C - Schwalbenschwanzförmiger Holz-Holz-Verbinder in Keilform von Hasslacher Norica Timber	11
Abbildung 7:	Veränderung der Breite beim Einbringen des Verbinders	11
Abbildung 8:	Längsschubverbindungen mit Buchenfurnierschichtholz.....	12
Abbildung 9:	Grundprinzip einer reversiblen Schraubverbindung mit Gewindestange am Beispiel einer Balkendeckenkonstruktion.....	13
Abbildung 10:	Grundmodul standardisierter Wand-, Decken- und Dachelemente	14
Abbildung 11:	Modell M 1:5 standardisierter Wand-, Decken- und Dachelemente.....	14
Abbildung 12:	Deckenträger aus BSP-Restholzplatten und zusätzlicher Brettlage in der Zugzone	15
Abbildung 13:	Stoßfugenversatz in den Deckenplatten.....	16
Abbildung 14:	Fräsbild für Längsschubverstärkung mithilfe von Fremdfedern aus Buchen-FSH bei Wänden und aussteifenden Decken.....	16
Abbildung 15:	Schritt 1: Fräsen der Taschen für die Fremdfedern (Schubkraftübertragung)	18
Abbildung 16:	Schritt 2: Fräsen der Verzahnung für die Querkraftübertragung.....	18
Abbildung 17:	Schritt 3: Sägen - Freischneiden von wiederverwendbaren Bauteilen.....	18
Abbildung 18:	Schritt 4: Fräsen/Sägen - Herstellen der eigentlichen Tür/Fensteröffnungen	19
Abbildung 19:	Bearbeitung mit Roboterarm (alternativ).....	19
Abbildung 20:	Holzbalkendecke aus schubfest mit den BSH-Balken verbundenen BSP-Restholzplatten.....	20
Abbildung 21:	Schichtaufbau einer BSP-Restholzplatten-Decke mit Splittbeschwerung bzw. BSP-Beton-Verbunddecke.....	21
Abbildung 22:	Schichtaufbau einer BSP-Restholzplatten-Balken-Decke mit Splittbeschwerung.....	22
Abbildung 23:	Bei Innenwänden können die Wandtafeln aus Brettsperrholzresten unverkleidet und sichtbar eingesetzt werden.....	23
Abbildung 24:	Schichtenaufbau einer BSP-Restholzplatten-Außenwand (links) und Wohnungstrennwand (rechts)	24
Abbildung 25:	Schichtenaufbau einer BSP-Restholzplatten-Innenwand als Raumtrennwand. Links: mit Brandschutzanforderung (Begrenzung der Rauchdurchlässigkeit) und rechts: Innenwand als Raumtrennwand ohne weitere Anforderungen	24
Abbildung 26:	Zug/Schubanschluss einer BSP-Restholz-Wand an eine BSP-Balkendecke mit BSP-Restholzplatten BSP 115W-5.....	25
Abbildung 27:	In ANSYS durchgeführte Anschlussimulation – Spannungskonzentrationen senkrecht zur Plattentragrichtung	27
Abbildung 28:	Stabwerkmodell für den unverformten Zustand – Annahme einer reibungsfreien Kontaktfläche.....	27
Abbildung 29:	Versuchsaufbau 1 – typisches Querkzugversagen des Querkraftstoßes; Nummerierung der Brettlagen.....	28

Abbildung 30:	Stabwerkmodell für den verformten Zustand – Annahme einer reibungsfreien Kontaktfläche.....	28
Abbildung 31:	Scherversuch Querkraftübertragung	29
Abbildung 32:	Übersicht der Versuchsreihen – ohne Verstärkung und mit Schrauben verstärkter Querzug	29
Abbildung 33:	Übersicht Scherversuche. Laststeigerung bei querzugverstärkten Querschnitten. Tendenzielle Last-Verformungskurven jeweils aus den 10 Versuchen. Blaue Kurve: Versuchsreihe 3 (Abbildung 37), Braune Kurve: Versuchsreihe 2 (Abbildung 36), Grüne Kurve: Versuchsreihe 1 (Abbildung 35).....	30
Abbildung 34:	Übersicht der Scherversuche der nicht verstärkten und mit Schrauben verstärkten Querkraftstöße, mit max-, mean-, min-Werten und 5%-Fraktilwerten.....	30
Abbildung 35:	Verformungen und Bruchbilder bei nicht verstärktem Querkraftstoß (Versuchsreihe 1).....	31
Abbildung 36:	Verformungen und Bruchbilder von 2 Versuchen mit verstärktem Querkraftstoß (Versuchsreihe 2): Vollgewindeschrauben 2 x 8x80 vg	32
Abbildung 37:	Verformungen und Bruchbilder von 2 Versuchen mit verstärktem Querkraftstoß (Versuchsreihe 3): Tellerkopfschrauben 3 x 6x100 tg	32
Abbildung 38:	Beispiel der Problematik bei Tellerkopfschrauben: links: Höheunterschied, rechts: Spalt zwischen Brettlage und BSP-Restholzplatte	33
Abbildung 39:	Verstärkter Querkraftstoß: Buchendübel 3x8x100 / vertikale Anordnung	33
Abbildung 40:	Verstärkter Querkraftstoß: Buchendübel 3x8x110 / 30° zur Vertikalen geneigt angeordnet	34
Abbildung 41:	Verstärkter Querkraftstoß: Buchenholzdübel 3x8x110 / vertikale Anordnung verklebt ..	34
Abbildung 42:	Übersicht der Versuchsreihen mit Buchenholzdübel	34
Abbildung 43:	Übersicht Scherversuche. Laststeigerung bei querzugverstärkten Querschnitten. Tendenzielle Last-Verformungskurven jeweils aus den 10 Versuchen. Graue Kurve: Versuchsreihe 4 (Abbildung 45), Gelbe Kurve: Versuchsreihe 5 (Abbildung 47), Blaue Kurve: Versuchsreihe 6 (Abbildung 48), Lila Kurve: Versuchsreihe 7 (Abbildung 48), Rote Kurve: Versuchsreihe 8 (Abbildung 49)	35
Abbildung 44:	Übersicht der Scherversuchen der nicht verstärkten, mit nicht verklebtem Buchendübel verstärkten Querkraftstöße und mit verklebtem Buchendübel mit max-, mean-, min-Werten und 5%-Fraktilwerten	35
Abbildung 45:	Verformung und Bruchbild mit verstärktem Querkraftstoß: Variante 4, Buchendübel 3x8x100: links: belastete Zustand, rechts: entlastete Zustand. Nach dem Querzugversagen tritt anschließend Rollschubversagen auf	36
Abbildung 46:	links: Riss in der 3. Lage wegen der deutlichen Schrägfaserigkeit der wellig verlaufenden Fasern und rechts: Klebstoffversagen in der Fuge der Flächenverklebung infolge von Fehlstellen der Verklebung beim Fertigungsprozess	37
Abbildung 47:	Variante 5. Verformung und Bruchbild mit verstärktem Querkraftstoß mit nicht verklebten Buchendübel 3x6x110 / 30°	37
Abbildung 48:	Verformung und Bruchbild mit verstärktem Querkraftstoß: links: Variante 6, Buchendübel 3x8x110 / 30°, rechts: Variante 7, Buchendübel 3x10x110 / 30°	38
Abbildung 49:	Verformung und Bruchbild mit verstärktem Querkraftstoß mit Buchendübel 3x8x100/0° verklebt.....	38
Abbildung 50:	Übersicht Scherversuche. Laststeigerung bei querzugverstärkten Querschnitten. Tendenzielle Last-Verformungskurven jeweils aus den 10 Versuchen. Grüne Kurve: Versuchsreihe 1 (Abbildung 35), Braune Kurve: Versuchsreihe 2 (Abbildung 36), Hellblaue Kurve: Versuchsreihe 3 (Abbildung 37), Graue Kurve: Versuchsreihe 4 (Abbildung 45), Gelbe Kurve: Versuchsreihe 5 (Abbildung 47), Dunkelblaue Kurve: Versuchsreihe 6 (Abbildung 48), Lila Kurve: Versuchsreihe 7 (Abbildung 48), Rote Kurve: Versuchsreihe 8 (Abbildung 49).....	39

Abbildung 51:	Übersicht der Scherversuche aller Versuchsreihen mit max-, mean-, min-Werten und 5%-Fraktilwerten	39
Abbildung 52:	Faktor k_v in Abhängigkeit von Vollholz und den geometrischen Parametern h , β und i	40
Abbildung 53:	geometrische Ausbildung des Querkraftstoßes	40
Abbildung 54:	B-Bereich und D-Bereich – Annahme einer reibungsfreien Kontaktfläche	41
Abbildung 55:	spannungsoptimierte Stabwerkmodell – Annahme einer reibungsfreien Kontaktfläche	41
Abbildung 56:	links: vereinfachte Stabwerkmodell; rechts: spannungsoptimierte Stabwerkmodell – Annahme einer reibungsfreien Kontaktfläche	42
Abbildung 57:	Druckbeanspruchung an der Kontaktfläche	43
Abbildung 58:	Schematische Darstellung der effektiven Kontaktfläche A_{eff} – links: mögliche Druckfläche; rechts: theoretische Druckfläche nach DIN EN 1995-1-1	43
Abbildung 59:	Schematische Darstellung des Versagens des Querkraftstoßes	44
Abbildung 60:	Einfluss der kreuzweisen Verklebung auf die Schubfestigkeit ¹¹	44
Abbildung 61:	Einfluss der Brettbreite bei konstanter Bretthöhe von Seitenbrettern auf die Rollschubfestigkeit ¹¹	45
Abbildung 62:	Kräfteplan zur Ermittlung der Querkraftanteile – Annahme einer reibungsfreien Kontaktfläche	46
Abbildung 63:	Versagensarten der Schraubenverbindung	46
Abbildung 64:	Druckspannungskonzentration im Schraubenkopfbereich – Annahme einer reibungsfreien Kontaktfläche	46
Abbildung 65:	Aufbau der Schraubenverbindung mit 3x6x100 tg Tellerkopfschrauben	47
Abbildung 66:	Anordnung des Querkraftstoßes und die Querkraftfluss	48
Abbildung 67:	Versuchsanordnung Zugversuch mit Buchen-FSH-Fremdfedern	50
Abbildung 68:	Kraft-Weg Diagramm Zugversuch	51
Abbildung 69:	Zugversuch - Verformung und Bruchbild	52
Abbildung 70:	Verringerung der Kontaktflächen und Bruchbild in den Querlagen	52
Abbildung 71:	4-Punkt-Biegeversuch: Übersicht der Prüfkörper. Prüfkörperbreite 200mm	53
Abbildung 72:	4-Punkt-Biegeversuch – Versuchsaufbau	54
Abbildung 73:	Bruchbilder 4-Punkt-Biegeversuch an Original-BSP 106W-5: Rollschub- und Zugversagen	55
Abbildung 74:	4-Punkt-Biegeversuch an Original-BSP 106W-5 – Rollschubversagen	55
Abbildung 75:	4-Punkt-Biegeversuch an Original-BSP 106W-5 – Zugversagen im Bereich der Keilzinkenverbindung	55
Abbildung 76:	Kraft-Weg-Diagramm: 4-Punkt-Biegeversuch BSP 106W-5 mit max, mean, min und 5%-Fraktilwert	56
Abbildung 77:	Querkraftstoß mit Querzugverstärkung	56
Abbildung 78:	Versagen der Klebefuge bei Prüfkörpern mit aufgeklebter Zugzone	56
Abbildung 79:	Durch Abweichungen in der Plattenstärke verursachten Ungenauigkeiten in der Herstellung	57
Abbildung 80:	Keine vollflächige Verklebung des BSP-Elementes mit der Brettlage. 17,9%(links) und 15,2%(rechts) der Fläche sind nicht verklebt	57
Abbildung 81:	Bruchbild 4-Punkt-Biegeversuch an BSP-Restholzträger mit aufgeklebter Zugzone: Zugversagen	57
Abbildung 82:	Kraft-Weg-Diagramm: 4-Punkt-Biegeversuch. BSP-Reste mit einer Brettlage als Zugzone mit max, mean, min und 5%-Fraktilwert	58
Abbildung 83:	Kraft-Weg-Diagramm: 4-Punkt-Biegeversuch. BSP-Reste mit 2 Brettlagen als Zugzone. Blaue Kurve ist interpoliert aus dem Versuch mit 150mm breiten Probekörper	58
Abbildung 84:	4-Punkt-Biegeversuch an BSP-Restholzträger mit 15cm Breite und zwei Brettlagen als Zugzone. Hohe Resttragfähigkeit durch Schraubverstärkung im Stoß zwischen den BSP-Platten	59

Abbildung 85:	toleranzbedingte Fuge im Querkraftstoß nach der Versuchsbelastung mit der Folge des Ablösens der Decklagen.....	59
Abbildung 86:	Bruchbild 4-Punkt-Biegeversuch an BSP-Restholzträger mit aufgeklebter Zug- und Druckzone	60
Abbildung 87:	Kraft-Weg-Diagramm: 4-Punkt-Biegeversuch BSP-Reste mit Zug- und Druckzone aus jeweils einer Brettlage mit max, mean, min und 5%-Fraktilwert	60
Abbildung 88:	Darstellung der Spannungsverteilung im 5-lagigen Brettsperrholz bei „starrem“ Verbund	61
Abbildung 89:	Stabwerkmodell für einfeldrige Deckenplatten aus BSP-Produktionsabfällen. Unten: „Druckvorspannung“ aus Umlenkkraftwirkung von Biegedruck- und Biegezugzone im verformten Zustand	62
Abbildung 90:	Übersichtsdiagramm der Biegetragfähigkeit der aus BSP-Restholzplatten zusammengesetzten Träger.....	64
Abbildung 91:	Deckenkonstruktion aus BSP-Restholzplatten mit zusätzlichen Brettlagen in der Zugzone	66
Abbildung 92:	Visualisierung der Deckenkonstruktion aus BSP-Restholzplatten mit zusätzlichen Brettlagen in der Zugzone	67
Abbildung 93:	Deckenkonstruktion aus BSP-Restholzplatten im Verbund mit Deckenbalken.....	68
Abbildung 94:	Visualisierung der Deckenkonstruktion aus BSP-Restholzplatten im Verbund mit Deckenbalken.....	69
Abbildung 95:	Deckenkonstruktion aus BSP-Restholzplatten mit hochfesten BauBuche-Trägern.....	70
Abbildung 96:	Visualisierung der Deckenkonstruktion aus BSP-Restholzplatten mit hochfesten BauBuche-Trägern	71
Abbildung 97:	Kraft-Weg Diagramm bei nicht verstärktem Querkraftstoß mit max-, mean-, min-Werten und 5%-Fraktilwert	76
Abbildung 98:	Kraft-Weg Diagramm von verstärkten Querkraftstößen: Vollgewindeschrauben 8x80 vg mit max-, mean-, min-Werten und 5%-Fraktilwert	76
Abbildung 99:	Kraft-Weg Diagramm von verstärkten Querkraftstößen: Tellerkopfschrauben 6x100 tg mit max-, mean-, min-Werten und 5%-Fraktilwert	76
Abbildung 100:	Kraft-Weg Diagramme von verstärkten Querkraftstößen: geriffelte Buchendübel 3x8x100/0° mit max-, mean-, min-Werten und 5%-Fraktilwert.....	77
Abbildung 101:	Kraft-Weg Diagramme von verstärkten Querkraftstößen: geriffelte Buchendübel 3x6x110/30° mit max-, mean-, min-Werten und 5%-Fraktilwert.....	77
Abbildung 102:	Kraft-Weg Diagramme von verstärkten Querkraftstößen: geriffelte Buchendübel 3x8x110/30° mit max-, mean-, min-Werten und 5%-Fraktilwert.....	77
Abbildung 103:	Kraft-Weg Diagramme von verstärkten Querkraftstößen: geriffelte Buchendübel 3x10x110/30° mit max-, mean-, min-Werten und 5%-Fraktilwert.....	77
Abbildung 104:	Kraft-Weg Diagramme von verstärkten Querkraftstößen: geriffelte Buchendübel 3x8x100/0° verklebt mit max-, mean-, min-Werten und 5%-Fraktilwert.....	78