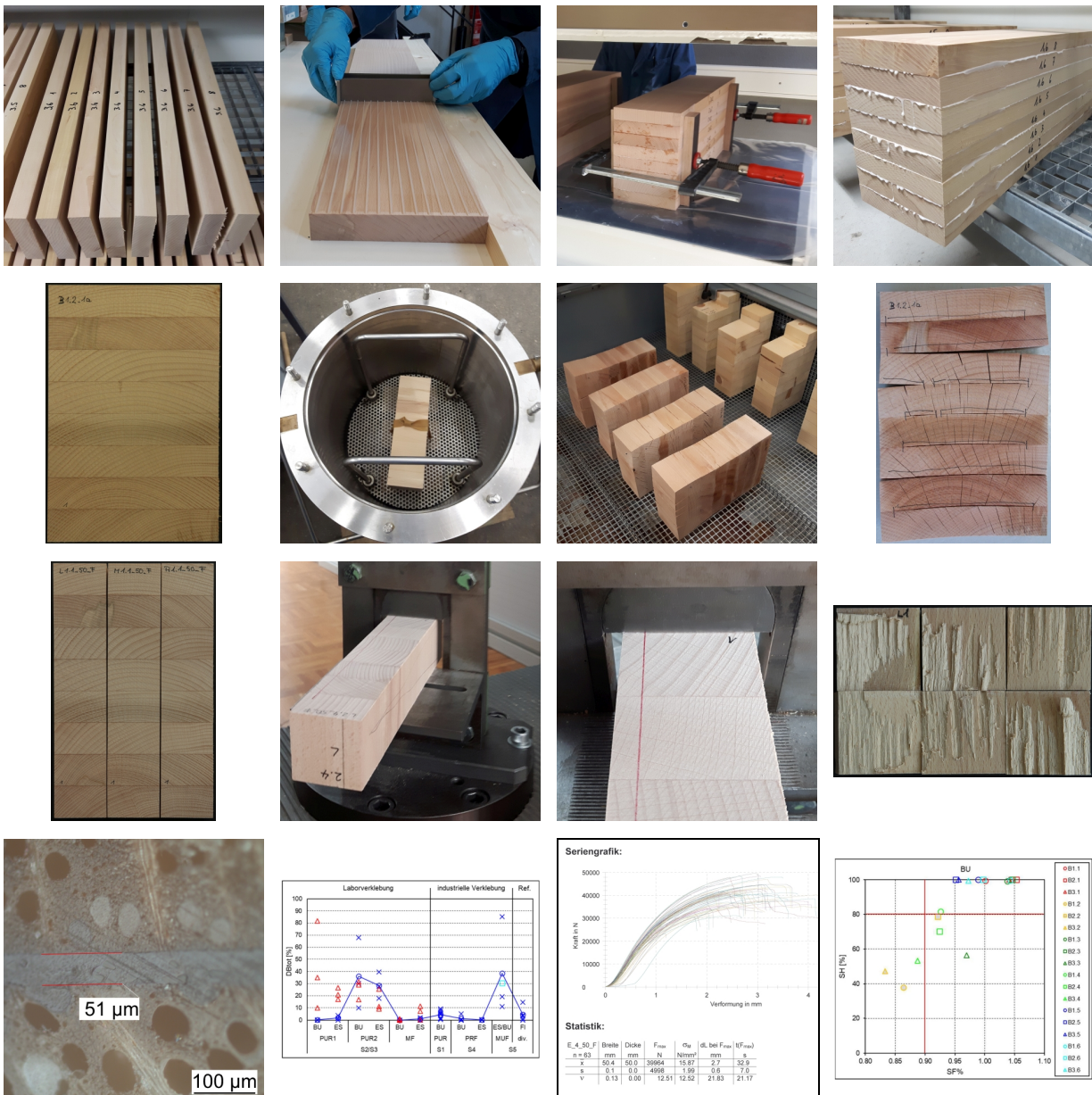


WHFF-Projekt Nr. 2017.18

Qualitätskontrolle der Flächenverklebung bei Brettschichtholz aus Laubholz (QS LH-BSH)

Wissenschaftlicher Schlussbericht



Kontakt:

Martin Arnold
Empa, Cellulose & Wood Materials
Ueberlandstr. 129
8600 Dübendorf

Tel.: 058 / 765 46 83 (direkt)
E-Mail: martin.arnold@empa.ch

Inhalt

Zusammenfassung	3
1 Grundlagen	5
1.1 Hintergrund	5
1.2 Aktueller Wissensstand	5
1.2.1 Nationaler und internationaler Stand des Wissens	5
1.2.2 Forschungsarbeiten und Wissen an der Empa	6
1.3 Projektplan	7
1.3.1 Ziele	7
1.3.2 Forschungsfragen	7
1.3.3 Bedeutung des Projektes für Forschung und Praxis	7
1.3.4 Thematische Eingliederung in die Schwerpunkte des WHFF	7
1.3.5 Projektorganisation	7
1.3.6 Arbeitsprogramm	8
1.3.7 Zeitplan	9
2 Material und Methoden	10
2.1 Qualitätskontrolle der Flächenverklebung gemäss SN EN 14080	10
2.2 Methoden	10
2.2.1 Delaminierung	11
2.2.2 Blockscherprüfung	12
2.2.3 Klebfugendicke	13
2.3 Versuchsreihen	14
2.3.1 Probenserie S1	14
2.3.2 Probenserien S2 und S3	15
2.3.3 Probenserie S4	19
2.3.4 Probenserie S5	19
2.4 Datenauswertung	19
3 Ergebnisse	21
3.1 Gesamtüberblick Verklebungsqualität	21
3.2 Detailspekte / Einflussfaktoren	23
3.2.1 Zusammenhänge der Qualitätsparameter	23
3.2.2 Blockscherprüfung: Relative Fugenfestigkeit	25
3.2.3 Einzelfugenwerte versus Querschnittsproben-Mittelwert	27
3.2.4 Erkennung von 'schwachen' Klebfugen	28
3.2.5 Jahrringstellung der Lamellen	31
3.2.6 Hybrider Querschnittsaufbau	34
3.2.7 Delaminierung: Effekt der Verfahren / Prüfzyklen	36
3.2.8 Blockscherprüfung: Volumeneinfluss / Effekt Probenhöhe	38
3.2.9 Klebfugendicke	40
3.3 Festlegung und Überprüfung von Qualitätsanforderungen	42
4 Schlussfolgerungen	45
4.1 Zielerreichung	45
4.2 Beantwortung der Forschungsfragen	46

4.3 Empfehlungen / Input Normierung bezüglich WPK	47
4.4 Offene Fragen / Weiterer Forschungsbedarf	48
Literatur	49
Normen	50
Abkürzungen	51
Anhang	52
Anhang 1: Übersicht Probenmaterial	53
Anhang 2: Beispiele Zustand Probenquerschnitte nach Delaminierung	54

Zusammenfassung

Im Zuge der vermehrten Nutzung von Laubholz wird in der Schweiz zunehmend auch Brettschichtholz (BSH) aus Buche und Esche hergestellt und verwendet. Für die qualitätsgesicherte Produktion fehlen im Gegensatz zum Brettschichtholz aus Nadelholz (SN EN 14080) dafür bis jetzt jedoch einheitliche und verbindliche Vorgaben zu den Prüfmethoden und Leistungsanforderungen. Mit dem vorgeschlagenen Projekt sollten die entsprechenden Grundlagen zur Qualitätskontrolle der Flächenverklebung von Brettschichtholz aus Laubholz erarbeitet werden (v.a. für die werkseigene Produktionskontrolle).

Projektziele

Das Projekt verfolgte folgende Ziele:

- Erarbeitung von Grundlagen zur Qualitätskontrolle von BSH aus Laubholz (Hauptziel ist dabei die Erkennung von Fehlverklebungen).
- Überprüfung der Eignung der (bisher nur für Nadelholz) verwendeten Prüfmethoden sowie Definition der Leistungsanforderungen für:
 - Erstprüfung und werkseigene Produktionskontrolle (WPK)
 - Zustandsbeurteilung der Klebfugen bei verbautem BSH (z.B. anhand von Bohrkernen mit Klebfuge im Rahmen von SIA 269/5)
- Bereitstellung von Input für eine zukünftige europäische Produktnorm für BSH aus Laubholz [EN 14080-2].

Vorgehensweise

Ausgangspunkt für die im Projekt angewendeten Prüfverfahren waren die in der SN EN 14080 für Nadelholz festgelegten Verfahren für die Delaminierungs- und Blockscher-Tests. Das untersuchte Probenmaterial umfasste sowohl 'Labor'-Verklebungen als auch BSH-Abschnitte aus industrieller Produktion mit verschiedenen Holzarten-Klebstoff-Kombinationen. Das angewendete Konzept zur Qualitätskontrolle berücksichtigt die Aussagekraft resp. Eignung der zwei Prüfmethoden und enthält einen Vorschlag für einen für Buche und Esche geeigneten Satz von Qualitätsanforderungen.

Ergebnisse

Die Projektergebnisse erlauben die folgenden generellen Schlussfolgerungen:

- Grundsätzlich sind die bei Brettschichtholz aus Nadelholz für die Qualitätskontrolle angewendeten Prüfverfahren (Delaminierungs- und Scherprüfung) auch für Brettschichtholz aus Laubholz geeignet. Vereinzelt sind aber Anpassungen der Prüfparameter an die spezifischen Eigenschaften des Laubholzes notwendig.
- Mit einer geeigneten Verklebungstechnik sind auch bei Laubholz einwandfreie Verklebungen möglich. Die Verklebungsqualität ist aber abhängig vom Klebstoff und den Verklebungsparametern.
- Im Gegensatz zum Nadelholz treten beim Laubholz vermehrt lokale, fatale Fehlverklebungen einzelner Fugen auf. Mit einer Qualitätsprüfung können solche Fehlverklebungen meist rechtzeitig erkannt werden. Deren Ursache bleibt aber oft unklar.
- Die Qualitätsprüfung der Flächenverklebung kann bei Buche und Esche grundsätzlich mit den gleichen Methoden und Anforderungen erfolgen. Gewisse Holzarten-spezifische Unterschiede sind jedoch vorhanden und zu beachten.

Die wichtigsten Empfehlungen zur Normierung der werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) sind:

- Als Ziele der WPK sollten die Sicherstellung resp. Überwachung einer gleichbleibenden Verklebungsqualität und die Erkennung von Fehlverklebungen explizit definiert werden.

- Aus Konsistenzgründen sollten die Prüfverfahren für Nadelholz und Laubholz möglichst ähnlich sein. Eine Anlehnung an die SN EN 14080 erscheint daher sinnvoll.
- Delaminierung und Blockscherprüfung liefern unterschiedliche, sich ergänzende Informationen über die Qualität von Flächenverklebungen. Die Anwendung der zwei Prüfverfahren sollte klarer als in der SN EN 14080 und unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften der zwei Methoden geregelt werden.
- Es ist ein Grundsatzentscheid erforderlich, ob Nutzungsklassen-abhängige Prüfverfahren und/oder Anforderungen definiert werden sollen.
- Verschiedene Anpassungen bei der Prüfmethodik erscheinen notwendig. Für die Delaminierung sollte z.B. ein Standard-Verfahren festgelegt werden und klar definiert sein, wann davon abgewichen werden soll/kann. Bei der Blockscherprüfung wird wegen der hohen axialen Druckbelastung eine Reduktion der Standard-Scherhöhe von 50 mm auf 40 mm empfohlen.
- Der entwickelte Vorschlag für einen möglichen Satz von Qualitätsanforderungen bei der Delaminierungs- und Blockscherprüfung von Laubholz-Flächenverklebungen berücksichtigt bereits bestehende oder vorgeschlagene Regelungen und umfasst anspruchsvolle Ziele (siehe untenstehende Tabelle). Bei der Definition von Anforderungen sind sowohl Grenzwerte für Querschnitts-Mittelwerte als auch für Einzelfugen festzulegen, um auch einzelne Klebfugen mit einer ungenügenden Verklebungsqualität auszuschliessen. Die Datengrundlage zur Festlegung von Anforderungswerten für Einzelfugen bei der Blockscherprüfung ist allerdings zur Zeit noch ungenügend.

Prüfung	Parameter	Daten-Niveau	Kriterium ¹⁾	Anlehnung an
Delaminierung	Klebfugen-Öffnungen	Querschnitts-Mittelwert	$D_{\text{tot}} \leq 4\%$	SN EN 14080, Tabelle 9, Verfahren B nach 1 Zyklus
		Einzelfuge	$D_{\text{max}} \leq 30\%$	SN EN 14080, Paragraph 5.5.5.2.2
Blockscherung	Scherfestigkeit	Querschnitts-Mittelwert	$f_{v,f} \geq 0.9 f_{v,H}$	Aicher 2018
		Einzelfuge	(festzulegen)	Datengrundlage ungenügend für Festlegung
	Holzbruchanteil	Querschnitts-Mittelwert	$HB \geq 80\%$	Aicher 2018
		Einzelfuge	(festzulegen)	Datengrundlage ungenügend für Festlegung

¹⁾ D_{tot} : Gesamtprozentsatz Delaminierung, D_{max} : Höchstprozentsatz Delaminierung, $f_{v,f}$: Scherfestigkeit Klebfugen, $f_{v,H}$: Scherfestigkeit Holz, HB: Holzbruchanteil

Im Zusammenhang mit der Qualitätskontrolle der Flächenverklebung von BSH aus Laubholz bleiben verschiedene offene Fragen, z.B.:

- Die aktuelle Regelung der Zuweisung von Prüfmethoden in Abhängigkeit von der Nutzungsklasse ist nicht eindeutig. Für BSH aus Laubholz sollte diesbezüglich eine klare Regelung definiert werden. Zu überlegen wäre, ob allenfalls auch Nutzungsklassen-abhängige Anforderungen sinnvoll/möglich wären. Hierzu fehlen aber gegenwärtig noch die Grundlagen und Erfahrungen.
- Die Qualitätsprüfungen im Rahmen der WPK ergeben primär einen Hinweis auf die Verklebungsqualität unmittelbar nach der Produktion. Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der WPK und der Dauerhaftigkeit resp. dem Langzeitverhalten der Verklebung fehlen bis anhin.

1 Grundlagen

1.1 Hintergrund

Eine effektive Qualitätskontrolle ist ein entscheidender Faktor für zuverlässige Bauprodukte. Dies trifft insbesondere auch für geklebte Vollholzprodukte für den Ingenieur-Holzbau zu, welche gemäss Bauproduktengesetz als regulierte Bauprodukte gelten. Zur geforderten Sicherstellung und Überprüfung der Produktqualität müssen geeignete Prüfverfahren sowie Leistungsanforderungen definiert sein.

Für Brettschichtholz (BSH) aus Nadelholz und Pappel ist dies in der Produktnorm SN EN 14080:2013 'Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen' geregelt. Für BSH aus Laubholz fehlen in Europa zur Zeit jedoch noch entsprechende normative Regelungen. Die zuständige Normenkommission CEN TC 124 'Holzbauwerke' hatte das Thema bereits einmal ins Arbeitsprogramm aufgenommen, dieses Vorhaben jedoch angesichts der fehlenden Grundlagendaten und Erfahrungen zurückgestellt [Empa 2013]. In der Zwischenzeit sind die Arbeiten aber wieder aufgenommen worden (CEN / TC 124 / WG3 / TG1 'Glued timber products – Hardwood glulam').

Wegen der fehlenden Normierung ist vorderhand keine CE-Kennzeichnung von BSH aus Laubholz möglich. Für das Inverkehrbringen entsprechender Produkte ist auf europäischer Ebene der Weg über eine Europäische Technische Zulassung (ETA) offen. National sind je nach Bauvorschriften Sonderanwendungen möglich (z.B. in Deutschland durch eine allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung). Bei beiden Lösungen sind die Anwendungsgebiete aber meist eingeschränkt. In der Schweiz konnten aufgrund der relativ liberalen Bauvorschriften bereits verschiedene Anwendungen von Laubholz-BSH realisiert werden.

Bezüglich Qualitätskontrolle der Verklebung ist bei BSH zu unterscheiden zwischen den Keilzinkenverbindungen und der Flächenverklebung der Lamellen. Das vorliegende Projekt befasst sich ausschliesslich mit der Flächenverklebung. Bei BSH aus Nadelholz erfolgt die Qualitätskontrolle der Flächenverklebung entweder durch eine Delaminierungs- oder eine Scherprüfung. Die in der SN EN 14080 definierten Verfahren und Leistungsanforderungen sind jedoch für Nadelholz entwickelt worden und für eine Anwendung bei Laubholz muss erst überprüft werden, ob diese grundsätzlich auch dafür geeignet sind. Angesichts der spezifischen Eigenschaften von Laubholz ist zu erwarten, dass gewisse Anpassungen notwendig sind.

Die Scherprüfung spielt zusätzlich auch im Rahmen der Zustandserfassung von Holztragwerken eine besondere Rolle, da an entnommenen Bohrkernen aus verbautem BSH der Zustand der Klebfugen überprüft werden kann [Empa 2013, Franke 2014, Dietsch 2015]. Für BSH aus Laubholz fehlen jedoch im Moment auch hierzu die grundlegenden Erfahrungs- und Grenzwerte.

Angesichts der auch in der Schweiz vermehrten Herstellung und Verwendung von BSH aus Laubholz (insb. Buche und Esche) besteht hier Handlungsbedarf, welcher auch bereits in Projekten im Rahmen des Aktionsplans Holz erkannt wurde [Steiger 2013, Steiger 2014a]. In den laufenden Laubholz-Projekten im Aktionsplan Holz wird dieses Thema jedoch nicht abgedeckt, weshalb in Zusammenarbeit mit den BSH-Herstellern ein entsprechendes Projekt vorgeschlagen wurde.

1.2 Aktueller Wissensstand

1.2.1 Nationaler und internationaler Stand des Wissens

Die Bemühungen um eine vermehrte Nutzung der Laubholzressourcen haben in den letzten Jahren zu einer Vielfalt von Forschungsaktivitäten, Produkten und Anwendungen geführt [Aicher 2014]. Kürzlich wurde dazu auch ein europäisches Forschungsprojekt (EU Hardwoods) durchgeführt, dessen Ergebnisse für die vorliegenden Fragestellungen wichtig sind [Rubick 2017]. Diesbezüglich bestehen Kontakte mit der MPA in Stuttgart (Dr. Simon Aicher und Dr. Dill-Langer), um entsprechende Erfahrungen auszutauschen. Die Ergebnisse bezüglich der im Rahmen des europäischen Projektes durchgeführten Untersuchungen zur Scherfestigkeit wurden in der Zwischenzeit publiziert [Aicher 2018].

Ein Fokus vieler Laubholz-Forschungsaktivitäten liegt bei der Verklebung, da diese als besonders anspruchsvoll gilt [Aicher 2011, Knorz 2014, Konnerth 2016]. Erste Vorschläge zu den Leistungsanforderungen bei der Qualitätskontrolle sind bereits vorhanden [Rubick 2017, Aicher 2011, Aicher 2018].

Verschiedene BSH-Hersteller befassen sich intensiv mit der Verwendung von Laubholz und verfügen aufgrund von realisierten Anwendungen bereits über eigene Praxiserfahrungen [Blumer 2010, Abplanalp 2017]. Mit dem Schwerpunkt 'Verwertung von Laubholz' im Aktionsplan Holz wurde auch in der Schweiz die Bedeutung des Themas betont und entsprechend neue Forschungsaktivität ausgelöst. Unter anderem ist ein grösseres Projektpaket den Eigenschaften von Buchen-Brettschichtholz gewidmet [Lehmann 2018, Steiger 2019].

1.2.2 Forschungsarbeiten und Wissen an der Empa

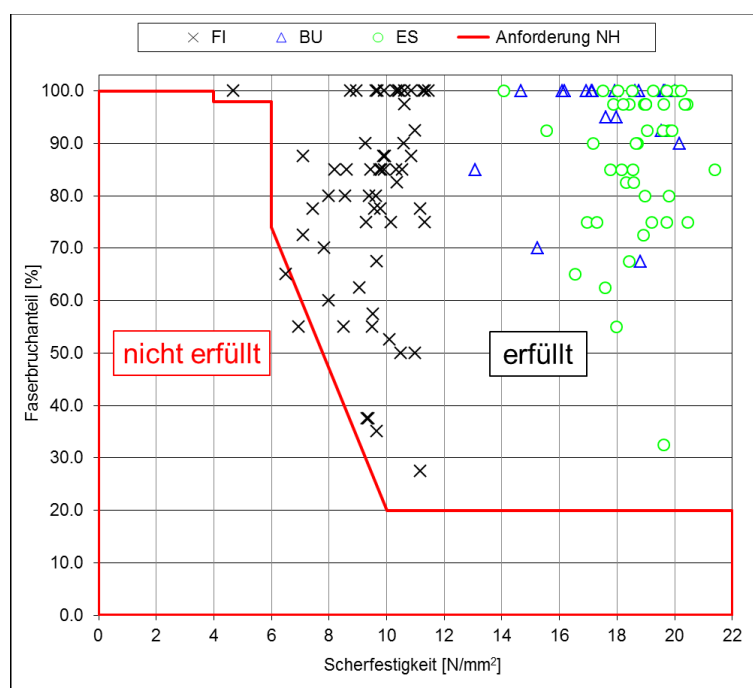
An der Empa ist bereits in früheren Projekten die Thematik Qualitätsprüfung von BSH bearbeitet worden und es sind entsprechende Erfahrungen vorhanden. Im Fokus stand dabei bisher BSH aus Nadelholz. Die Prüfmethodik kommt zudem auch bei Zustandserfassungen von BSH-Tragwerken regelmässig zur Anwendung [SIA 269/5].

Schwerpunkte von zwei durchgeführten WHFF-Projekten waren methodische Verbesserungen bei der Blockscherprüfung [Steiger 2009, Steiger 2010], sowie die Zusammenhänge zwischen der Delaminierungs- und der Blockscherprüfung [Steiger 2011, Steiger 2014b].

Erste Erfahrungen mit der Qualitätskontrolle von BSH aus Laubholz wurden im Rahmen des WHFF-Projektes 2009.16 'Qualitätskontrolle von Brettschichtholz: Vergleich der Prüfverfahren Blockschertest und Delaminierungstest' gesammelt [Steiger 2011]. Bei der Blockscherprüfung wurde deutlich, dass infolge der erhöhten Holzfestigkeiten bei Laubholz die (für Nadelholz gültigen) Leistungsanforderungen nicht zielführend sind (Bild 1). Ferner hat sich auch gezeigt, dass die Delaminierungsprüfung bei Laubholz erhöhte Anforderungen an die Klebfugen stellt, welche jedoch durch geeignete Massnahmen (Oberflächenqualität, Primer) erfüllt werden können.

Ein weiteres WHFF-Projekt befasste sich mit der Verbesserung der Bestimmung des Faserbruch- resp. Holzbruchanteils im Rahmen der Scherprüfung mittels Färbemethoden und bildanalytischer Flächenmessung [Künniger 2007].

Bild 1. Scherfestigkeit und Faserbruchanteil bei BSH aus Buche und Esche im Vergleich zu Fichte, mit eingezeichneten Leistungsanforderungen für Einzelfugen bei Nadelholz (rote Linie).



1.3 Projektplan

1.3.1 Ziele

Das Projekt verfolgte folgende Ziele:

- Erarbeitung von Grundlagen zur Qualitätskontrolle von BSH aus Laubholz (Hauptziel ist dabei die Erkennung von Fehlverklebungen).
- Überprüfung der Eignung der (bisher nur für Nadelholz) verwendeten Prüfmethode sowie Definition der Leistungsanforderungen für:
 - Erstprüfung und werkseigene Produktionskontrolle (WPK)
 - Zustandsbeurteilung der Klebfugen bei verbautem BSH (z.B. anhand von Bohrkernen mit Klebfuge im Rahmen von SIA 269/5)
- Bereitstellung von Input für eine zukünftige europäische Produktnorm für BSH aus Laubholz [EN 14080-2].

1.3.2 Forschungsfragen

Der Definition des Forschungsplanes liegen folgende Fragen zu Grunde:

- Sind die bei BSH aus Nadelholz für die Qualitätskontrolle angewendeten Prüfverfahren (Delaminierungs- und Scherprüfung) grundsätzlich auch für BSH aus Laubholz geeignet?
 - Sind Holzarten-spezifische Prüfparameter und Leistungsanforderungen notwendig?
- Delaminierung:
 - Sollte bei der Wahl des Delaminierungsverfahrens die vorgesehene Nutzungsklasse berücksichtigt werden?
 - Muss die erhöhte Wasseraufnahme und (verzögerte) Trocknung von Laubholz berücksichtigt werden?
- Scherprüfung:
 - Können (wie bei Nadelholz) die Anforderungen bezüglich Scherfestigkeit und Faserbruchanteil miteinander verknüpft werden?
 - Sollen (wie bei Nadelholz) Anforderungen sowohl für Einzelfugen als auch Querschnitts-Mittelwerte festgelegt werden?
 - Ist die in der SN EN 14080 angegebene Korrektur bei einer Abweichung der Höhe (Dicke) der Scherfläche auch für Laubholz gültig?

1.3.3 Bedeutung des Projektes für Forschung und Praxis

Eine sachgerechte und praktikable Regulierung der Qualitätskontrolle ist für die Schweizer Hersteller von BSH aus Laubholz von grosser Bedeutung. Sie ist auch Voraussetzung für eine vermehrte Verwendung von Laubholz in diesem Produktesegment. Für Forschung und Normung ist die Definition eines umfassenden und möglichst einheitlichen Konzeptes für die Qualitätssicherung von BSH aus Nadel- und Laubholz eine grosse Herausforderung.

1.3.4 Thematische Eingliederung in die Schwerpunkte des WHFF

Das Projekt befasst sich mit der vermehrten Nutzung von Laubholz und bezieht sich somit auf die WHFF-Schwerpunkte 3 'Die Arten- und Dimensionsvielfalt des Rohstoffes Holz wird in Produkte der Wald- und Holzwirtschaft umgesetzt' sowie 4 'Innovation bei der Entwicklung neuer Verwendungsmöglichkeiten'.

1.3.5 Projektorganisation

Funktion und Aufgaben der Projektpartner sind in Tabelle 1 summarisch zusammengestellt.

Tabelle 1: Projektpartner - Funktion und Aufgaben

Partner	Personen / Firma	Aufgaben / Know-how
Empa, Cellulose & Wood Materials	Martin Arnold	Projektleitung, Datenauswertung, Berichterstattung
	Walter Risi, Daniel Heer	Probenvorbereitung, Versuchsdurchführung
Empa, Ingenieur-Strukturen	René Steiger	Projektbegleitung (Einbezug Ingenieurholzbau, Link zu Aktionsplan Holz-Projekt 'Buchen-BSH', Normierung)
Wirtschaftspartner 1	Fachgruppe Leimholz Holzindustrie Schweiz	Industrie-Unterstützung, Hersteller-Kontakte, Umsetzung
Wirtschaftspartner 2	neue Holzbau AG, Lungern	Erfahrung mit LH-BSH, Bereitstellung von Probenmaterial

Die Projektleitung lag bei der Abteilung 'Cellulose & Wood Materials' der Empa in Dübendorf, wo auch die Versuchsarbeiten durchgeführt wurden.

Zur Sicherstellung des Informationsaustausches mit dem Aktionsplan Holz-Projekt 'Buchen-BSH' und den entsprechenden Normungsaktivitäten begleitete R. Steiger aus der Arbeitsgruppe 'Holzbau' der Abteilung 'Ingenieur-Strukturen' das Projekt.

Als Wirtschaftspartner unterstützten die Fachgruppe Leimholz von Holzindustrie Schweiz (HIS) sowie die neue Holzbau AG, Lungern (n'H) das Projekt. Die Wirtschaftspartner stellten den Einbezug von Praxiserfahrungen und -bedürfnissen sicher und ermöglichten die Bereitstellung von Probenmaterial aus industrieller Produktion sowie die direkte Umsetzung der Ergebnisse.

1.3.6 Arbeitsprogramm

Die Projektarbeiten waren in 5 thematische Arbeitspakete aufgeteilt (Tabelle 2).

Tabelle 2: Arbeitspakete und Methoden

Arbeitspaket		Inhalt	Methoden / Ergebnisse
1	Grundlagen	aktueller Wissensstand	Literaturstudie, Normen
		vorhandene Konzepte / Praxiserfahrung	Sammlung, Aufbereitung
		Versuchsplanung	Festlegung Versuchsvarianten (Holzarten, Klebstoffe, BSH-Aufbau), Zeitplan
2	Bereitstellung Probenmaterial	Labor-Verklebungen	verschiedene Holzarten-Klebstoff-Kombinationen, Hybrid-Aufbau (z.B. ES-FI), Fehlverklebungen
		Abschnitte aus industrieller Produktion	Praxischeck, Material für Ringversuch WPK
		Probenzuschnitt	Parallelproben für Delaminierung und Scherprüfung
3	Methoden Qualitätskontrolle	Prüfung Klebfugen (Flächenverklebung)	Delaminierungsprüfung
			Blockscherprüfung
4	Umsetzung	Definition Qualitätskontrolle	Bewertung Aussagekraft Prüfmethode (mit Bezug auf Einsatzbereich)
			Vorschlag geeigneter Prüfmethode
			Vorschlag Anforderungswerte
5	Projektleitung	Berichterstattung	Projektsitzungen, Zwischen- und Schlussbericht
		Administration	administrative Projektabwicklung

Ergänzende Erläuterungen zu den Arbeitspaketen:

AP1 Grundlagen

- Hauptziel der Qualitätskontrolle ist die zuverlässige und reproduzierbare Erkennung von Fehlverklebungen. Darauf sollen die Prüfmethoden und Leistungsanforderungen ausgerichtet sein.
- Bereits vorhandene Konzepte und Praxiserfahrungen bei Wirtschafts- und Forschungspartnern (z.B. MPA Stuttgart) werden einbezogen.
- Der Fokus liegt auf BSH aus Buche und Esche (evtl. Hybride mit Nadelholz) und verschiedenen, bereits als geeignet identifizierten und in der Industrie eingesetzten Klebstoffen (MUF, PUR, fallweise mit Primer).
- Als Probenmaterial werden sowohl Prüfkörper aus Labor-Verklebungen (inkl. gewollten Fehlverklebungen) sowie aus BSH-Abschnitten aus industrieller Produktion einbezogen.
- In der Regel werden parallele Delaminations- und Blockschertests der Flächenverklebung am gleichen Probenmaterial durchgeführt, um die Zusammenhänge beider Prüfverfahren untersuchen zu können.

AP2 Bereitstellung Probenmaterial

- Der Einbezug von verschiedenen Holzarten-Klebstoff-Kombinationen macht die Herstellung von Prüfkörpern durch Labor-Verklebungen notwendig. Die Herstellung solcher Prüfkörper ist aufwendig und macht einen grossen Teil des Projektaufwandes aus.
- Zur Erkennung von Fehlverklebungen ist eine möglichst klare Trennung der Qualitätsmerkmale von einwandfreien und fehlerhaften Verklebungen notwendig. Zur Definition dieser 'Trennlinie' werden deshalb auch Prüfkörper mit gewollten Fehlverklebungen hergestellt und geprüft.
- Als Praxischeck werden je nach Verfügbarkeit BSH-Abschnitte aus industrieller Produktion einbezogen. Die Bereitstellung dieses Materials erfolgt durch die Wirtschaftspartner.
- Für erste Versuche konnten vor Projektbeginn vorsorglich einige Abschnitte aus BSH-Trägern des Aktionsplan Holz Projektes 'Buchen-BSH' zur späteren Verwendung im Projekt entnommen und eingelagert werden. Der Einbezug dieses Probenmaterials ergibt einen wertvollen Link zwischen den mechanischen Eigenschaften der Träger und den Qualitätsmerkmalen der Flächenverklebung.

AP3 Methoden Qualitätskontrolle

- Ausgangspunkt für die Prüfverfahren sind die in der SN EN 14080 für Nadelholz festgelegten Verfahren. Wo nötig, werden Anpassungen an die spezifischen Eigenschaften des Laubholzes vorgeschlagen und getestet.
- Richtschnur für die Methodenentwicklung sind die unter 1.3.2 aufgelisteten Forschungsfragen.

1.3.7 Zeitplan

Das Projektgesuch wurde am 28.09.2017 eingereicht und am 12.01.2018 genehmigt. Der Projektstart erfolgte am 01.02.2018 mit einer vorgesehenen Projektlaufzeit von 18 Monaten.

2 Material und Methoden

2.1 Qualitätskontrolle der Flächenverklebung gemäss SN EN 14080

Im Rahmen der Konformitätsbewertung macht die SN EN 14080 insbesondere im Kapitel 6 detaillierte Vorgaben für die Qualitätskontrolle bei BSH aus Nadelholz und Pappel. Unterschieden wird dabei zwischen Kontrollen für die Erstprüfung (ITT) und für die werkseigene Produktionskontrolle (WPK/FPC).

Die Überprüfung der Qualität der Flächenverklebung erfolgt dabei entweder durch eine Delaminierungs- oder eine Blockscherprüfung (Anhänge C und D der SN EN 14080). Die Auswahl der zugelassenen Methoden zum Nachweis der Klebfestigkeit der Klebfugen wird dabei in Abhängigkeit der QS-Phase und der vorgesehenen Nutzungsklasse gemäss SN EN 1995-1-1 definiert (Tabelle 3). Die zu erfüllenden Anforderungswerte bei den Qualitätsprüfungen sind jedoch unabhängig von den Nutzungsklassen.

Für die Erstprüfung ist grundsätzlich ein Delaminierungstest erforderlich, während bei der werkseigenen Produktionskontrolle ausser für die Nutzungsklasse 3 sowohl eine Delaminierungs- als auch eine Scherprüfung möglich ist. Für die Nutzungsklasse 3 ist das Delaminierungsverfahren A oder B durchzuführen (resp. das Delaminierungsverfahren C nicht zulässig). Bei der werkseigenen Produktionskontrolle ist jeweils zusätzlich auch die Klebfugendicke zu überprüfen.

Für die Erstprüfung sind für jede Kombination aus Holzart und Klebstoff 10 Prüfkörper aus dem vollen Querschnitt eines BSH-Abschnittes zu prüfen. Bei der werkseigenen Produktionskontrolle ist pro 20 m³ Herstellungsvolumen je ein Prüfkörper aus einem vollen BSH-Querschnitt zu entnehmen.

Tabelle 3: Gemäss SN EN 14080 zugelassene/geforderte Testmethoden zur Überprüfung der Qualität der Flächenverklebung in Abhängigkeit der QS-Phase und der vorgesehenen Nutzungsklasse (NK)

QS-Phase	NK gemäss SN EN 1995-1-1		Delaminierung			Scherprüfung	Klebfugen- dicke
		mittlere Holzfeuchte	A	B	C		
Erstprüfung (ITT)	1	≤ 12%	X	X	X		?
	2	12% bis 20%	X	X	X		
	3	> 20%	X	X	?		
werkseigene Produktionskontrolle (WPK / FPC)	1	(wie oben)	X	X	X	X	X
	2		X	X	X	X	X
	3		X	X		?	X

X	Methode zugelassen/gefordert
	Methode nicht zugelassen
?	unklare Regelung

2.2 Methoden

Ausgangspunkt für die im Projekt angewendeten Prüfverfahren sind die in der SN EN 14080 für Nadelholz festgelegten Verfahren für die Delaminierungs- und Blockscher-Tests. Wo nötig, wurden Anpassungen an die spezifischen Eigenschaften des Laubholzes definiert und getestet. Nachstehend werden nur die wichtigsten Vorgaben oder Abweichungen beschrieben. Für weitere Details wird auf die SN EN 14080 verwiesen.

Das Versuchskonzept basiert auf parallelen Delaminierungs- und Blockscher-Tests der Flächenverklebung an axial gepaartem Probenmaterial (Bild 2). Damit können Zusammenhänge beider Prüfverfahren bis auf das Niveau von Einzelfugen detailliert untersucht werden.

Bild 2: Prinzip der Delaminierungs- (links) und der Blockscher-Prüfung (rechts)



2.2.1 Delaminierung

Im Anhang C der SN EN 14080 sind drei verschiedene Prüfzyklen resp. Verfahren (A, B und C) für den Delaminierungstest an Querschnittsproben mit einer Länge (in Faserrichtung) von 75 mm festgelegt (Tabelle 4). Alle Prüfzyklen beinhalten eine Wasserlagerung gefolgt von einer Rücktrocknung (Bild 2 links), an deren Ende auf den Querschnittflächen das Ausmass der offenen Fugen erfasst wird. Die Prüfzyklen unterscheiden sich vor allem in der Intensität der Wasserlagerung sowie der Temperatur und Dauer der Rücktrocknungsphase. Dies resultiert in einer stark unterschiedlichen Gesamtdauer der Delaminierungsprüfung zwischen 15 und 95 h. Für die drei Prüfzyklen gelten leicht unterschiedliche Anforderungen an die maximal zulässige Delaminierung (unterste Zeile in Tabelle 4).

Die Ergebnisse des Delaminierungstests werden mit folgenden Kennwerten ausgedrückt:

- 1) Gesamtprozentsatz der Delaminierung eines Prüfkörpers $D_{\text{tot}} = 100 \frac{l_{\text{tot, delam}}}{l_{\text{tot, glueline}}}$
- 2) Höchstprozentsatz der Delaminierung einer einzelnen Klebfuge $D_{\text{max}} = 100 \frac{l_{\text{max, delam}}}{2l_{\text{glueline}}}$

mit (alle Masse in mm):

- $l_{\text{tot, delam}}$ Gesamtlänge der Delaminierung
- $l_{\text{tot, glueline}}$ Gesamtlänge aller Klebfugen an beiden Hirnholzflächen jedes Prüfkörpers
- $l_{\text{max, delam}}$ Grösste delaminierte Länge einer Klebfuge
- $2l_{\text{glueline}}$ Doppelte Länge der Klebfuge (beide Querschnittseiten)

Viele BSH-Hersteller verwenden wegen der einfachen und schnellen Durchführung standardmässig den Prüfzyklus B. Prüfzyklus C gilt wegen der moderateren Trocknungsbedingungen als weniger anspruchsvoll und Prüfzyklus A wird in der Schweiz kaum für die WPK eingesetzt. Im Projekt angewendet wurden deshalb die Prüfzyklen B und C. Zusätzlich wurde zur besseren Berücksichtigung der spezifischen Laubholz-Eigenschaften ein alternativer Prüfzyklus definiert, dessen Parameter zwischen den Prüfzyklen B und C liegen und eine maximale Prüfdauer von 2 Tagen ermöglichen (Zyklus X in Tabelle 4).

Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden in diesem Projekt, nicht wie in der SN EN 14080 vorgesehen, keine Wiederholungszyklen durchgeführt.

Tabelle 4: Übersicht über die Delaminierungsverfahren (die wichtigsten resp. unterschiedlichen Parameter sind grau hinterlegt)

Verfahrensparameter			Verfahren gemäss SN EN 14080:2013			Testvariante
			A	B	C	X
Vakuum-Druck-Zyklus	Wassertemperatur [°C]		10 bis 20			10 bis 20
	Vakuum	absoluter Druck [kPa]	15 bis 30			15 bis 30
		Dauer [min]	5	30	30	15
	Druck	absoluter Druck [kPa]	600 bis 700			600 bis 700
		Dauer [min]	60	120	120	60
	Wässerungszyklen		2	1	2	1
	Dauer gesamt [min]		130	150	300	75
Trocknungszyklus	Temperatur [°C]		65 ± 5	70 ± 5	27.5 ± 2.5	50 ± 3
	Luftfeuchtigkeit [%]		<15	9 ± 1	30 ± 5	20 ± 5
	Luftgeschwindigkeit [m/s]		2 bis 3			2 bis 3
	Trocknungsdauer [h]		21 bis 22	10 bis 15	90	(39 bis 50)
Anzahl Zyklen Zus. Wiederholungen ² Dauer gesamt [h]	Abbruchkriterium ¹		Trocknungs- dauer	m _e = 100 % bis 110 % m _a	Trocknungs- dauer	m _e = 100 % bis 110 % m _a
			2	1	1	1
			1	1	0	0
		48 (72)	ca. 15 (30)	95	(40 bis 52)	
Maximal zulässige Delaminierung [%] gemäss SN EN 14080:2013	Fuge		30			-
	gesamt Prüfkörper Zyklus 1		-	4	10	-
	gesamt Prüfkörper Zyklus 2		5	(8)	-	-
	gesamt Prüfkörper Zyklus 3		(10)	-	-	-

¹⁾ m_a : Masse der Probe am Anfang des Trocknungszyklus, m_e : Masse der Probe am Ende des Trocknungszyklus

²⁾ Zusätzliche Wiederholungen, wenn der Gesamtprozentsatz der Delaminierung grösser ist als der maximal zulässige Wert.

2.2.2 Blockscherprüfung

Die Blockscherprüfung ist im Anhang D der SN EN 14080 definiert. Bei diesem Test werden die Klebfugen zwischen den Lamellen unter monotoner Belastung einer Scherbeanspruchung bis zum Bruch ausgesetzt (Bild 2 rechts). Im Falle von Querschnittsproben aus einem BSH-Abschnitt werden dazu ein oder mehrere nebeneinanderliegende Probestreifen (Probestäbe) mit einer Breite von 40-50 mm und einer Dicke (Länge in Faserrichtung) von 40-50 mm zugeschnitten. Es sind mindestens drei Klebfugen, jeweils im unteren, mittleren und oberen Teil, zu prüfen. Bei weniger als 10 Lamellen werden alle Klebfugen getestet.

Bei Laborversuchen sind die Prüfkörper vor der Prüfung im Normalklima 20°C / 65% RH zu klimatisieren. Für die werkseigene Produktionskontrolle muss die Holzfeuchte gleichmässig über den Prüfkörper verteilt sein und zwischen 8% und 13% liegen.

Weitere Details und methodische Aspekte zur Blockscherprüfung sind in früheren Projektberichten enthalten [Steiger 2009, Steiger 2010].

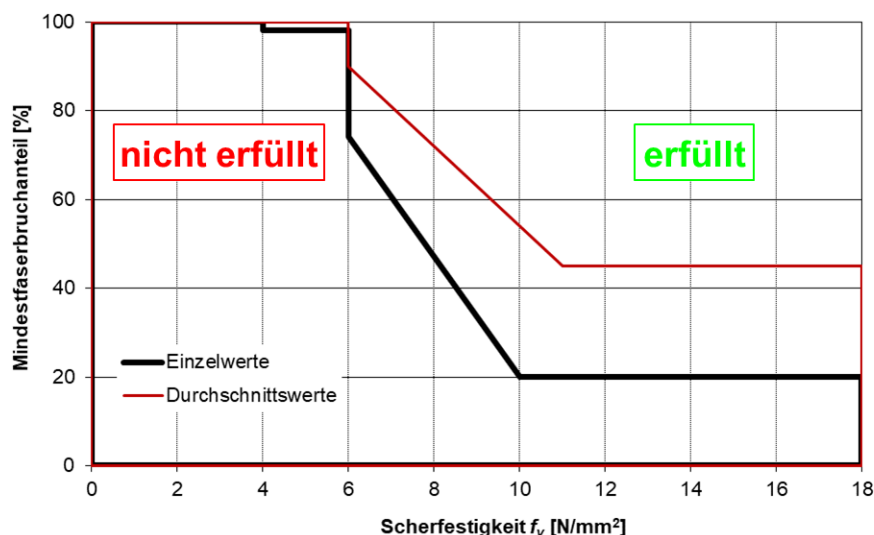
Die Blockscherprüfung liefert 2 Kennwerte:

- 1) Scherfestigkeit $f_v = k \frac{F_u}{A}$
- mit:
- A Scherfläche (in mm²): $A = b \cdot t$
 - k Korrekturfaktor in Funktion der Prüfkörperdicke: $k = 0.78 + 0.0044 \cdot t$
 - b Prüfkörperbreite (in mm)
 - t Prüfkörperdicke in Faserrichtung (in mm)
 - F_u Bruchlast (in N)

- 2) Faserbruchanteil (im Bericht meist als Holzbruchanteil bezeichnet)
visuelle Schätzung des Holzbruchanteils in der Scherfläche, abgestuft in 5%-Schritten

Die SN EN 14080 stellt sowohl für Einzelfugen als auch für Mittelwerte über alle Fugen einer Querschnittsprobe verknüpfte Anforderungen an die Scherfestigkeit und den Faserbruchanteil. Die entsprechenden Annahme- resp. Verwerfungsbereiche sind in Bild 3 graphisch dargestellt.

Bild 3: Annahme- resp. Verwerfungsbereiche für die Blockscher-Eigenschaften gemäss SN EN 14080 für Brettschichtholz aus Nadelholz und Pappel (Probenhöhe 50 mm, adaptiert aus [Steiger 2011])



2.2.3 Klebfugendicke

Gemäss SN EN 14080 (Tabelle 16 resp. Abschnitt I.5.8) ist im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) auch die (angestrebte resp. vom Klebstoffhersteller empfohlene) maximale Klebfugendicke zu überwachen. Die Dicke der Klebfuge ist mit einem Vergrößerungsglas zu überprüfen, mit dem die Klebfugendicke mit einer Genauigkeit von 10 % ermittelt werden kann. Einzelne örtliche Abweichungen, z. B. infolge von Hobelschlägen, dürfen ausser Acht gelassen werden.

Die Klebfugendicke wurde nur bei den Laborverklebungen der Versuchsserien S2 und S3 (siehe Kapitel 2.3.2) erfasst, da dort die genauen Verklebungsparameter bekannt waren. Die Messung erfolgte mit einem Lichtmikroskop im Auflichtmodus unter 20facher Vergrößerung via integriertem Massstab im Okular, jeweils an den einzelnen Klebfugen entlang der linken und rechten, mit einer Rasierklinge überschrittenen Kante einer Querschnittscheibe (Auflösung: 5 µm).

2.3 Versuchsreihen

Das untersuchte Probenmaterial bestand aus 5 Probenserien (S1-S5) unterschiedlicher Herkunft und Zusammensetzung (Tabelle 5). Eine detailliertere Übersicht über die verfügbaren BSH-Abschnitte ist als Anhang 1 angefügt.

Die Probenserien S1, S4 und S5 repräsentieren Material aus industrieller Produktion. Die Probenserien S2 und S3 beinhalten Laborverklebungen mit bekannten und kontrollierten Herstellungsbedingungen. Insgesamt wurden 570 Klebfugen aus 65 BSH-Abschnitten einbezogen.

Tabelle 5: Überblick über das Probenmaterial in den 5 Versuchsserien

Serie	Probenmaterial	Details	Holzarten	Lamellen- dicken	Klebstoffe	Anzahl Proben / Fugen
S1	Abschnitte aus Aktionsplan Holz-Projekt 'Buchen-BSH'	Biegeträger GL55c	BU	25 mm	PUR	10 / 150
S2	Labor- Verklebungen	nach Vorschrift / Fehlverklebung	BU	30 mm	PUR, MF	18 / 126
S3			ES			18 / 126
S4	Abschnitte aus industrieller Produktion	div. Träger n'H (19.04.2018)	BU, ES, EI/FI-Hybrid	22-40 mm	PRF	9 / 63
S5		Daten aus WHFF Projekt 2009.16	BU, ES, ES/FI-Hybrid	30-41 mm	MUF	5 / 54
			FI (=Referenz)	34-41 mm	MUF, PUR, UF, RF	5 / 51
						Total: 65 / 570

2.3.1 Probenserie S1

Noch vor der Bewilligung des Projektes erfolgte auf Initiative des Projektteams vorsorglich die Entnahme von 14 End-Abschnitten von BSH-Biegeträgern (L x B x H 7600 x 160 x 400 mm³) des Aktionsplan Holz Projektes 'Buchen-BSH' (Bild 4).

Bild 4: Entnahme von End-Abschnitten von geprüften BSH-Biegeträgern des Aktionsplan Holz Projektes 'Buchen-BSH' (links) und Beispiel eines BSH-Abschnittes für den nachfolgenden Zuschnitt von Delaminierungs- und Scherproben (rechts)



Diese Träger sind aus 16 Lamellen mit einer Dicke von 25 mm aufgebaut. Der Querschnittsaufbau ist bezüglich Festigkeit und Jahrringstellung der Lamellen inhomogen, indem für die äusseren 4 Lamellen jeweils Seitenbretter mit erhöhter Zugfestigkeit verwendet wurden, während im mittleren Bereich vorwiegend Halbrift- und Rift-Lamellen mit geringerer Zugfestigkeit eingesetzt wurden [Erhart 2019].

Die Entnahme der 900 mm langen End-Abschnitte erfolgte nach Abschluss der Biegeprüfung, d.h. das Probenmaterial war vorgängig bereits mechanisch belastet und wies teilweise Schubrisse auf. Dafür stand bereits bei Projektbeginn Probenmaterial von industriell mit PUR verklebtem Buchen-BSH für erste Versuche zur Verfügung, welches zusätzlich einen wertvollen Link zwischen den mechanischen Eigenschaften der Biegeträger und den Qualitätsmerkmalen der Flächenverklebung ermöglicht.

2.3.2 Probenserien S2 und S3

Um gezielt Probenmaterial in verschiedenen Holzarten-Klebstoff-Kombinationen zur Verfügung zu haben, wurden 36 BSH-Abschnitte in Labor-Verklebungen hergestellt. Die Prüfkörper ($L \times B \times H$ 660 x 160 x 240 mm³) in 2 Holzarten- (BU, ES) und 6 Verklebungs-Varianten (PUR, MF) mit jeweils 3 Wiederholungen sind aus 8 Lamellen mit einer Dicke von 30 mm aufgebaut (Bild 5).

Bild 5: In Paketen zu 8 Stück sortierte, 4 m lange BSH-Rohlamellen (links) und frisch verklebte BSH-Abschnitte zur Konditionierung im Klimaraum vor der Prüfkörper-Entnahme (rechts)



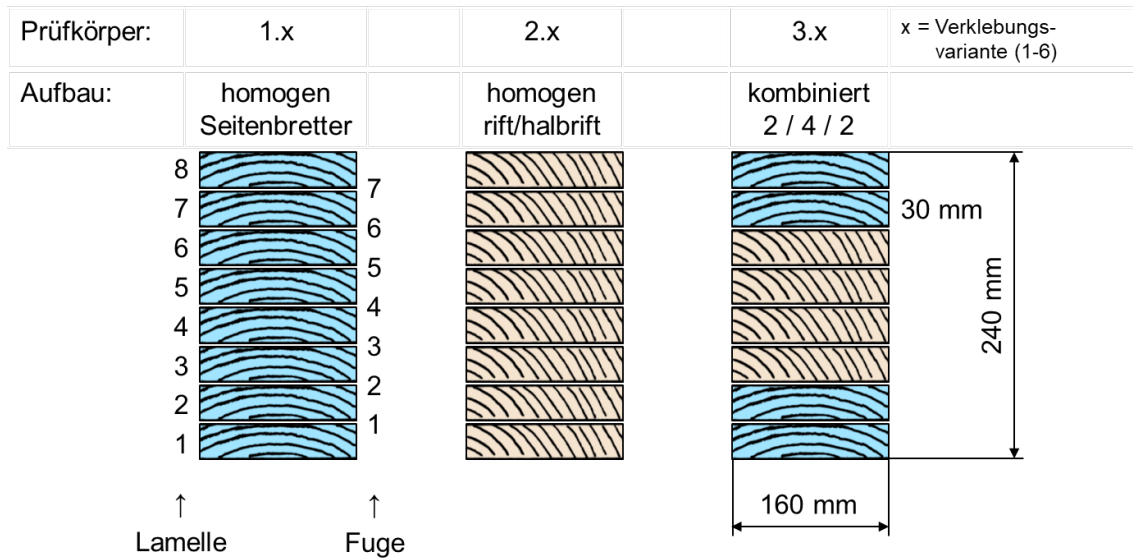
In Anlehnung an die BSH-Biegeträger des Aktionsplan Holz Projektes 'Buchen-BSH' wurden verschiedene systematische Aufbauten des BSH-Querschnittes definiert, um den Einfluss der Jahrringstellung der Lamellen auf die Qualität der Klebfugen zu untersuchen. Je einer der 3 Wiederholungs-BSH-Prüfkörper wurde homogen mit Seitenbrettern oder Halbrift-/Rift-Brettern sowie kombiniert aufgebaut (Bild 6).

Dazu wurden im Holzhandel vorgehobelte, 4m lange, astfreie Brettschichtholzlamellen mit entweder liegender oder Rift-/Halbrift-Jahrringstellung bestellt und zu entsprechenden Paketen à 8 Lamellen zusammengestellt (Bild 5 links). Diese Pakete wurden dann in der Länge in 6 Abschnitte aufgeteilt und den 6 Verklebungsvarianten zugeordnet (siehe weiter unten). Dadurch wurde ein direkt vergleichbarer Lamellen-Aufbau der Prüfkörper mit den verschiedenen Verklebungsvarianten sichergestellt.

Um eine entsprechend der vorgesehenen Nutzungsasse (NK1) angepasste Holzfeuchte bei der Verklebung einzuhalten, sollten die Lamellen auf eine Holzfeuchte von 8% getrocknet sein. Die Kontrolle bei der Lieferung ergab für Buche eine durchschnittliche Holzfeuchte von 8.9% und bei Esche von 11.5%.

Vor dem Hobeln/Verkleben erfolgte eine weitere Klimatisierung der aufgeteilten Lamellen bei 23°C / 50% RH. Die verklebten Teile wurden danach für die Aushärtung wieder bei 23°C / 50% RH gelagert. Für die Qualitätstests wurden die zugeschnittenen Prüfkörper abschliessend bei 20°C / 65% RH klimatisiert.

Bild 6: Querschnittaufbau der Prüfkörper



Die Verklebung erfolgte in 6 Varianten (Tabelle 6).

Ausgewählt wurden 3 handelsübliche Klebstoffe (anonymisiert bezeichnet als PUR1, PUR2 und MF), welche gemäss Klebstoffliste der MPA Universität Stuttgart für Allgemeine Zwecke für Nadelholz zur Verwendung für Brettschichtholz gemäss SN EN 14080 zugelassen sind.

Um eine Fehlverklebung zu simulieren resp. eine mögliche Trennung der Qualitätsmerkmale von einwandfreien und fehlerhaften Verklebungen zu untersuchen, wurde neben der Verklebung entsprechend den Vorgaben (technische Merkblätter) der Klebstoffhersteller (Varianten-Bezeichnungen PUR1, PUR2, MF) für jeden Klebstoff auch eine von den Empfehlungen abweichende Variante definiert, um eine Fehlverklebung zu provozieren (Varianten-Bezeichnungen PUR1-, PUR2-, MF-).

Das Hobeln der Lamellen und die Oberflächenvorbehandlungen erfolgten jeweils unmittelbar vor der Verklebung (Bild 7).

Bild 7: Klebstoffauftrag mit einem Rakel (links) und zwei BSH-Abschnitte in der Presse (rechts)

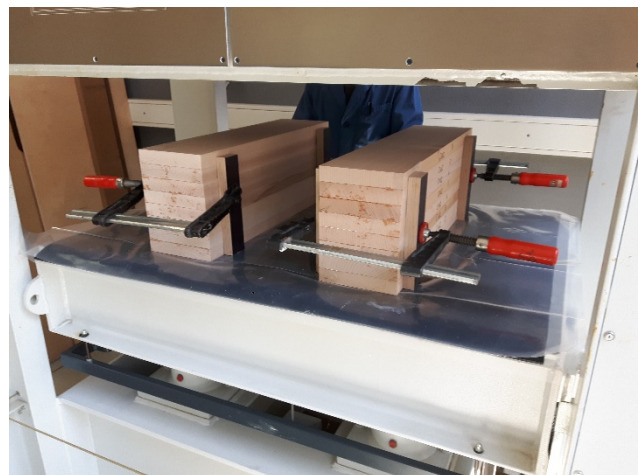


Tabelle 6: Verklebungsvarianten der Versuchsserien S2 und S3, teilweise mit Abweichungen von den Vorgaben der Klebstoffhersteller (grau hinterlegt)

Variante	1	2	3	4	5	6
Klebstoff	PUR1		PUR2		MF	
Bezeichnung	PUR1	PUR1-	PUR2	PUR2-	MF	MF-
Verarbeitung	nach Vorgabe	mit Abweichung	nach Vorgabe	mit Abweichung	nach Vorgabe	mit Abweichung
Vorbehandlung Typ Auftragsmenge [g/m²] Auftragsart Einwirkzeit [min]						
	Primer	–	Wasser	–	–	
	20-25		20-25			
	Sprühen		Sprühen			
	10		10			
Verklebung Anzahl Komponenten Mischverhältnis Harz : Härter Auftragsmenge [g/m²] Auftragsart geschlossene Zeit [min] Pressdruck [N/mm²]						
	1		1		2	
	-		-		100:20	
	180		200	150	400	350
	einseitig mit Rakel		einseitig mit Spachtel		einseitig mit Spachtel	
	10		10	0	60	0
	1.2		1.0	0.3	1.0	
Abweichungen gegenüber Vorgaben Klebstoffhersteller		kein Primer		kein zusätzl. Wasser		
				geringere Klebstoffmenge		geringere Klebstoffmenge
				geringerer Pressdruck		keine geschl. Zeit

Die Prüfkörper für die einzelnen Qualitätsprüfungen wurden nach einem festgelegten Schema aus den BSH-Abschnitten entnommen (Bild 8):

- 4 Scheiben (75 mm) für die Delaminierungsprüfung (verschiedene Verfahren)
- 6 Scheiben (je 2x 50 mm, 40 mm und 26 mm) für die Scherprüfungen (jeweils für Fugen- und Holzfestigkeit)
- 1 Scheibe (15 mm) zur Messung der Klebfugendicke

Die Scherproben wurden zur Erfassung des Volumeneffekts (Probenhöhe) in 3 verschiedenen Dicken (Höhen) hergestellt: 50 mm und 40 mm entsprechend der oberen und unteren Grenze der Bandbreite gemäss SN EN 14080, 26 mm entsprechend der resultierenden Prüfhöhe bei Bohrkernen mit 35 mm Durchmesser für die Zustandserfassung von verbautem BSH.

Der Querschnitt der BSH-Abschnitte erlaubte die Entnahme von 3 parallelen, 50 mm breiten Probestreifen (**L**inks, **M**itte, **R**echts) für die Scherprüfung (Bild 9).

Die Klassierung der Jahrringstellung der Lamellen erfolgte grundsätzlich gemäss ihrer Zuordnung beim Aufbau der BSH-Abschnitte (Bild 6). Da die Jahrringstellung innerhalb der Lamellen aber davon abweichen kann, wurde diese bei den Scherproben für jeden Probestreifen separat klassiert in **R**ift, **H**albrift und **T**angential bezogen auf die Klebfugenebene (Bild 9).

Bild 8: Entnahmeschema für die Püfkörper aus den BSH-Abschnitten

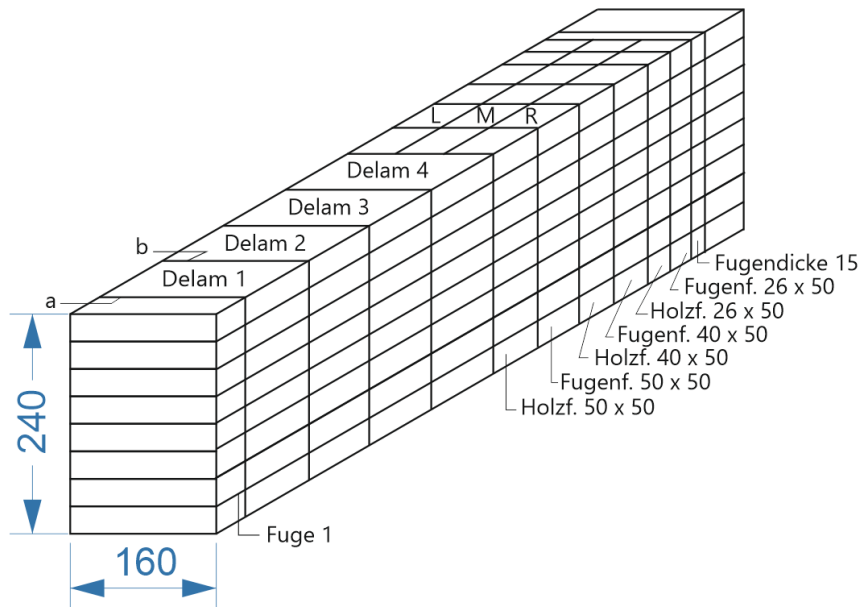
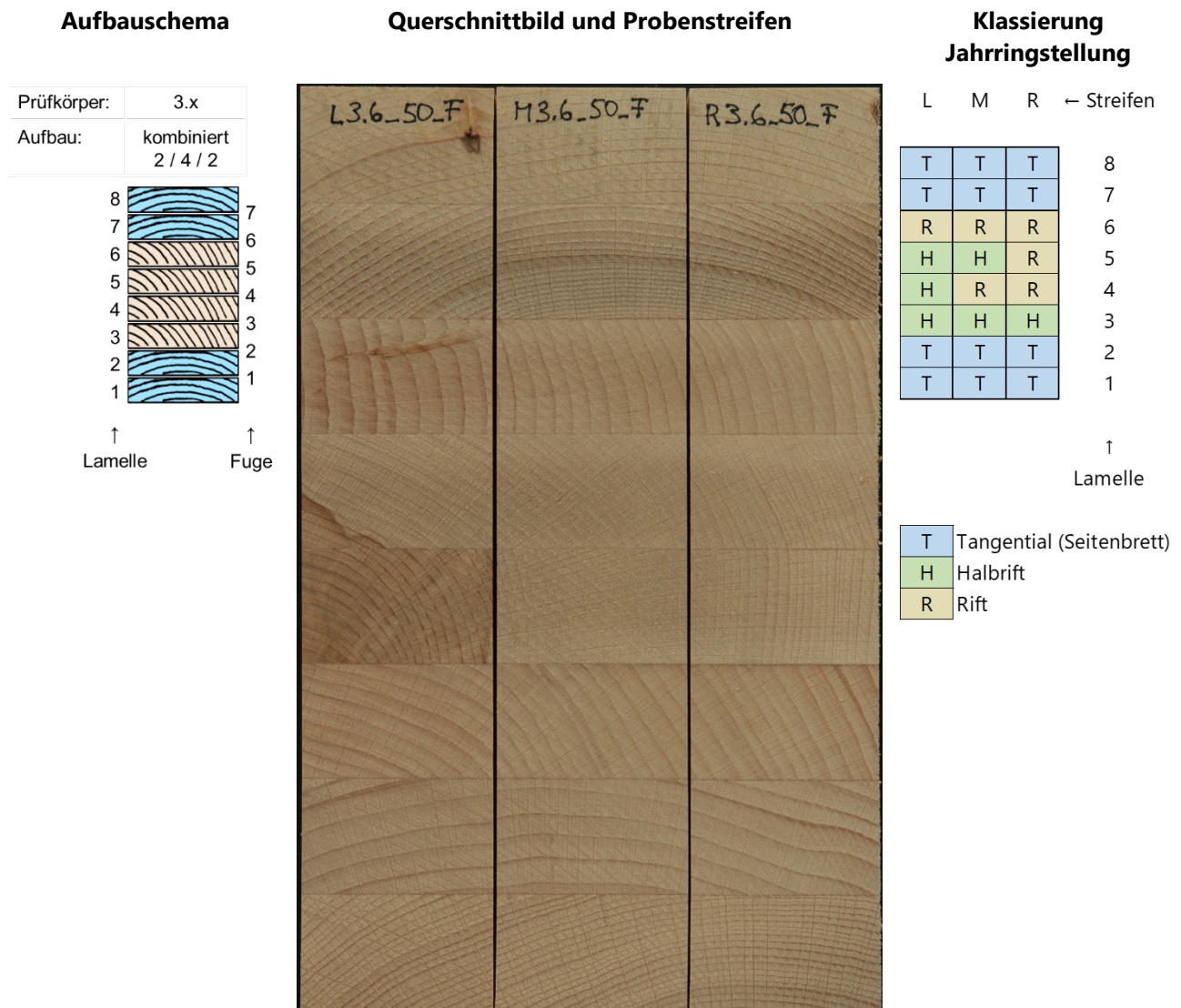


Bild 9: Probenstreifen für den Blockschertest aus einem BSH-Querschnitt mit Klassierung der Jahrringstellung



2.3.3 Probenserie S4

Unter der Probenserie S4 wurden die durch den Wirtschaftspartner neue Holzbau AG aus der laufenden Produktion zur Verfügung gestellten BSH-Abschnitte gesammelt. Zur Verfügung standen 24 BSH-Abschnitte mit PRF-Verklebung, aus verschiedenen Holzarten (BU, ES, EI/FI-Hybrid) und mit verschiedenen Abmessungen zur Verfügung (Bild 10). Aufgrund der sehr heterogenen Zusammensetzung bezüglich Abmessungen, Aufbau, Holzarten und Klebstofftyp dient diese Probenserie als Praxis-Check.

Bild 10: BSH-Abschnitte des Wirtschaftspartners neue Holzbau AG (links) und Beispiel-Querschnitt (B x H 200 x 200 mm²) eines BSH-Abschnittes aus Esche (rechts)



2.3.4 Probenserie S5

Als ergänzende Daten von industriell hergestelltem BSH wurden schliesslich ausgewählte Proben aus dem WHFF-Projekt 2009.16 'Qualitätskontrolle von Brettschichtholz: Vergleich der Prüfverfahren Blockschertest und Delaminierungstest' [Steiger 2011] in die Auswertungen einbezogen. Zum einen waren dies mit MUF verklebte Laubholz-Proben, zum anderen mit verschiedenen Klebstoffen verklebte Fichten-Proben, welche hier als Referenzwerte für Nadelholz verwendet werden (siehe detaillierte Probenliste im Anhang 1).

2.4 Datenauswertung

Details zu den verfügbaren Proben und den durchgeführten Prüfungen pro BSH-Abschnitt sind im Anhang 1 aufgelistet. Wo nicht anders angegeben, beziehen sich die Auswertungen jeweils auf die markierten Hauptvarianten (grau hinterlegte Spalten).

Die zur Verfügung stehenden Kennwerte der Klebfugenqualität sind in der Tabelle 7 zusammengestellt. Für die einfachere Darstellung der Ergebnisse werden fallweise die aufgeführten Kurzbezeichnungen verwendet.

Neben den in der SN EN 14080 festgelegten Kennwerten wurden folgende zusätzliche Kennwerte berechnet:

- **intakter Klebfugenanteil:** Um eine mit dem Holzbruchanteil gleichläufige Kenngrösse zu erhalten (höhere Werte bedeuten bessere Klebfugenqualität), wurden die Delaminierungskennwerte durch Differenzbildung zu 100 in einen intakten Klebfugenanteil umgerechnet. Dieser Kennwert hat auch den Vorteil, dass seine Streuung direkt mit derjenigen des Holzbruchanteils verglichen werden kann.

- **relative Fugenfestigkeit:** Um Holzarten-spezifische Unterschiede bei der Scherfestigkeit zu umgehen, wurde eine mit der Holzfestigkeit der Lamellen 'normierte' Fugenfestigkeit berechnet (siehe Kapitel 3.2.2). Bei einem ganzen Prüfkörper wird die durchschnittliche Fugenfestigkeit auf die durchschnittliche Holzfestigkeit aller beteiligten Lamellen bezogen. Bei einer Einzelfuge ist der Bezugswert der Mittelwert der 2 benachbarten Lamellen.

Bei der Interpretation der dargestellten Ergebnisse zu beachten ist jeweils auch die Betrachtungsebene gemäss Tabelle 8.

Tabelle 7: Kennwerte der Klebfugenqualität und deren Kurzbezeichnungen

Prüfung	Kürzel	Kennwert	Einheit
Delaminierung	DB	Delaminierung einer einzelnen Klebfuge, Verfahren B	%
	D_{tot} (D _{tot})	Gesamtprozensatz der Delaminierung eines ganzen Prüfkörpers, zu spezifizierendes Verfahren	
	DB_{tot} (DB _{tot})	Gesamtprozensatz der Delaminierung eines ganzen Prüfkörpers, Verfahren B	
	D_{max} (D _{max})	Höchstprozensatz der Delaminierung der schlechtesten Klebfuge, zu spezifizierendes Verfahren	
	DB_{max} (DB _{max})	Höchstprozensatz der Delaminierung der schlechtesten Klebfuge, Verfahren B	
	IB	intakter Klebfugenanteil einer einzelnen Klebfuge (100-D _{tot}), Verfahren B	
	IB_{tot}	intakter Klebfugenanteil eines ganzen Prüfkörpers (100-D _{tot}), Verfahren B	
	IB_{min}	intakter Klebfugenanteil der schlechtesten Klebfuge (100-D _{max}), Verfahren B	
Block-Scherprüfung	SF	Scherfestigkeit einer oder mehrerer Klebfugen (ohne weitere Spezifizierung bei 50 resp. 45 mm Probenhöhe)	N/mm ²
	SH	Holzbruchanteil einer oder mehrerer Klebfugen (ohne weitere Spezifizierung bei 50 resp. 45 mm Probenhöhe)	%
	SL	Scherfestigkeit des Holzes einer oder mehrerer Lamellen (in Lamellenmitte, ohne weitere Spezifizierung bei 50 resp. 45 mm Probenhöhe)	N/mm ²
	SF%	Fugenfestigkeit in % der mittleren Holzfestigkeit der beteiligten Lamellen (ohne weitere Spezifizierung bei 50 resp. 45 mm Probenhöhe)	%
Klebfugendicke	KD	Klebfugendicke	µm

Tabelle 8: Betrachtungsebenen für die Ergebnisse

Betrachtungsebene	Delaminierung	Scherprüfung
Teilbereich einer Einzelfuge	-	Einzelprüfwert eines Probenstreifens (Teilfuge)
Einzelfuge	Summe aller Teil-Delaminierungen in einer Klebfuge	Mittelwert aus mehreren nebeneinanderliegenden Probenstreifen (L-M-R)
Querschnittsprobe	Mittelwert über alle Einzelfugen eines BSH-Querschnittes	
aggregierter Mittelwert	Gesamt-Mittelwert über mehrere Querschnittsproben-Mittelwerte (z.B. mehrere Proben pro Versuchsvariante, Klebstoff, Schichtproduktion, ...)	

3 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse ist in drei Teile gegliedert. Im Kapitel 3.1 werden alle Versuchsserien zusammengefasst betrachtet, um einen Gesamtüberblick über die beobachteten Wertebereiche der Delaminierungs- und Scherprüf-Kennwerte zu erhalten. Im Kapitel 3.2 werden verschiedene Detailspekte mit Daten aus einzelnen oder mehreren Versuchsserien dargestellt, um mögliche Einflussfaktoren auf die Klebfugenqualität und die Prüfmethodik zu beleuchten. Im Kapitel 3.3 werden schliesslich unter Annahme von provisorischen Anforderungswerten Möglichkeiten zur Überprüfung der Qualitätsanforderungen dargestellt.

3.1 Gesamtüberblick Verklebungsqualität

Eine Voraussetzung zur Festlegung von Anforderungswerten an die Verklebungsqualität ist die Kenntnis des aktuellen 'Standes der Technik'. Dazu werden nachfolgend alle verfügbaren Daten aus Labor- und industriellen Verklebungen (Versuchsreihen S1 bis S5 mit Hauptvarianten gemäss Anhang 1) zusammengefasst und gesamthaft betrachtet.

Die Wertebereiche der Qualitätsparameter für die Delaminierung (Verfahren B) und die Blockscherprüfung (Probenhöhe 50 resp. 45 mm) bei BSH aus Laubholz sind aufgeteilt in einzelne Probengruppen der 5 Versuchsreihen in Bild 11 zusammengestellt. Die Zusammenhänge zwischen den Qualitätsparametern der 2 Prüfmethoden sind in Bild 12 ersichtlich. Alle Darstellungen zeigen Querschnittsproben-Mittelwerte.

Feststellungen / Bewertung:

- Delaminierung - Gesamtprozentsatz: Der Gesamtprozentsatz der Delaminierung für Querschnittsproben-Mittelwerte zeigt eine grosse Streuung von 0% bis über 80% (Bild 11 oben links). Von den erfassten 58 LH-Querschnitten zeigten 11 gar keine Delaminierung und bei 37 lag der Gesamtprozentsatz der Delaminierung unter 10%.
- Delaminierung - Höchstprozentsatz einer Klebfuge: Der Höchstprozentsatz der Delaminierung einer einzelnen Klebfuge pro BSH-Querschnitt streute praktisch im ganzen Wertebereich zwischen 0% und 100% (Bild 11 oben rechts). Von den erfassten 58 LH-Querschnitten zeigten 33 eine maximale Fugendelaminierung von 30% (Anforderung für Einzelfugen in SN EN 14080).
- Delaminierung - Einflussfaktoren: Bezüglich Delaminierung zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit von der Verklebung (geringe Delaminierung bei PRF, erhöhte Delaminierung bei PUR2 und MUF). Die Folgen von Abweichungen bei der Verklebung gegenüber den Vorgaben der Klebstoffhersteller sind nicht bei allen Klebstoffen gleich ausgeprägt. Die Unterschiede zwischen Buche und Esche sind eher gering, mit einer schwachen Tendenz zu geringerer Delaminierung bei Esche. Die als Referenzwerte einbezogenen Fichtenproben liegen auf Mittelwertsniveau in einem ähnlichen Bereich wie die LH-Proben, zeigen aber geringere Höchstwerte.
- Blockscherprüfung - Scherfestigkeit: Basierend auf den unterschiedlichen Rohdichten zeigt die Scherfestigkeit eine ausgeprägte Holzarten-Abhängigkeit (Bild 11 unten links), mit höheren Festigkeiten bei Buche (MW 19.0 N/mm²) als bei Esche (MW 16.8 N/mm²) und deutlich tieferen Festigkeiten bei den Fichte-Referenzproben (MW 9.6 N/mm²). Bezüglich Verklebung sind kaum Unterschiede erkennbar.
- Blockscherprüfung - Holzbruchanteil: Der mittlere Holzbruchanteil liegt zwischen 40% und 100% (Bild 11 unten rechts). Von den erfassten 53 LH-Querschnitten zeigten 31 Proben einen Holzbruchanteil $\geq 95\%$. Die Folgen von Abweichungen bei der Verklebung gegenüber den Vorgaben sind teilweise sehr ausgeprägt (PUR1 bei S2/S3), bei anderen Verklebungen wiederum nicht erkennbar (PUR2 und MF bei S2/S3).
- Zusammenhänge Qualitätsparameter: Durch eine zweidimensionale Darstellung lassen sich allfällige Zusammenhänge zwischen den Qualitätsparametern untersuchen (Bild 12). Bei der Delaminierung ist ein loser, nicht linearer Zusammenhang zwischen der mittleren und der maximalen Delaminierung eines BSH-Querschnittes vorhanden (Bild 12 links). Bei der Blockscherprüfung sind Unterschiede zwischen den Holzarten, aber kein genereller Zusammenhang zwischen der Festigkeit und dem Holzbruchanteil zu erkennen (Bild 12 rechts).

- Insgesamt lässt sich feststellen, dass im Vergleich zu Nadelholz bei Laubholz vermehrt lokale, fatale Fehlverklebungen (einzelner Fugen) auftreten. Mit einer angepassten Verklebungstechnik sind aber auch bei Laubholz einwandfreie Verklebungen möglich.

Bild 11. Wertebereich der Qualitätsparameter bei BSH aus Laubholz für einzelne Probengruppen in den Versuchsreihen S1 bis S5 (ohne Hybrid-Proben)

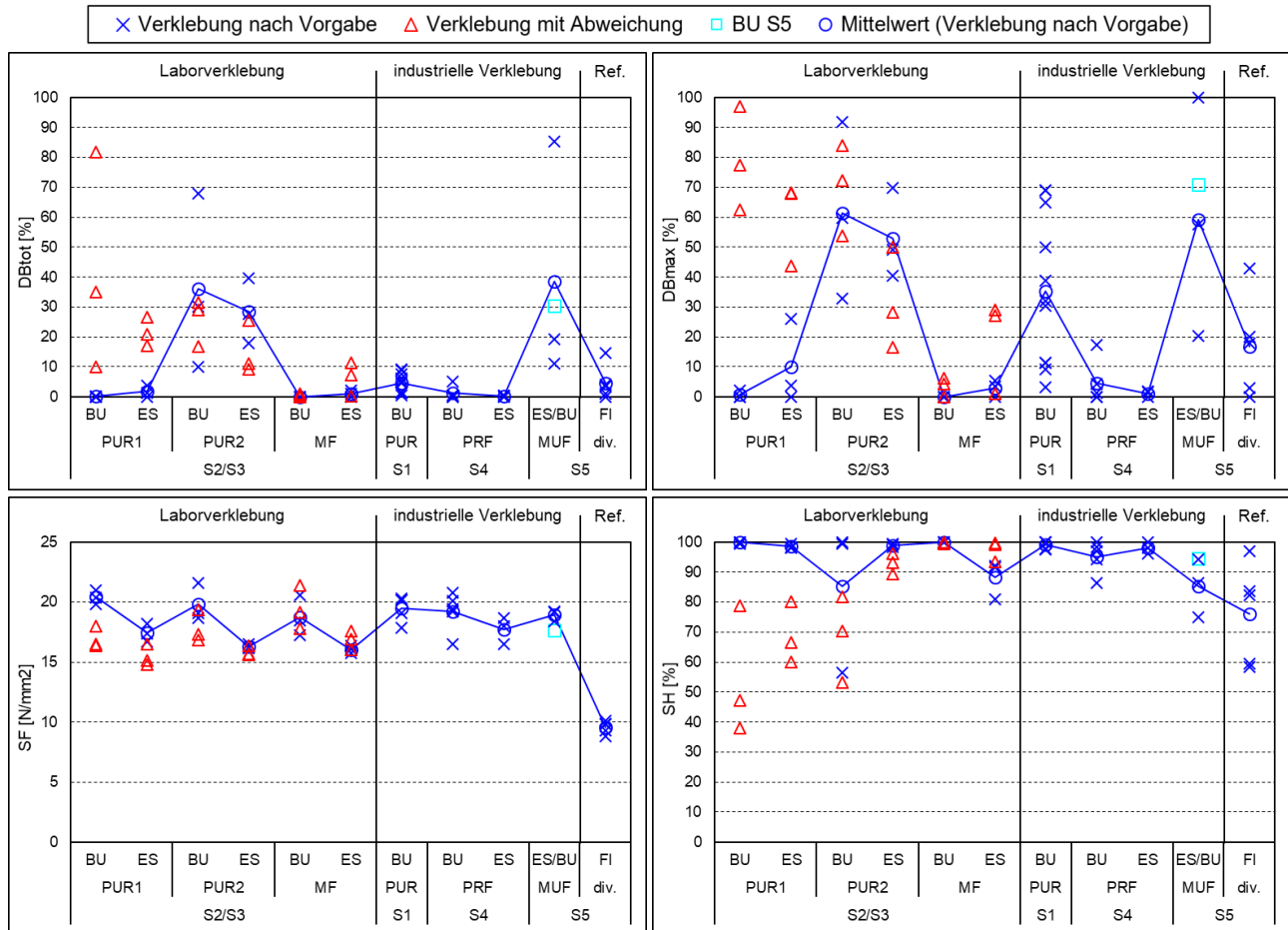
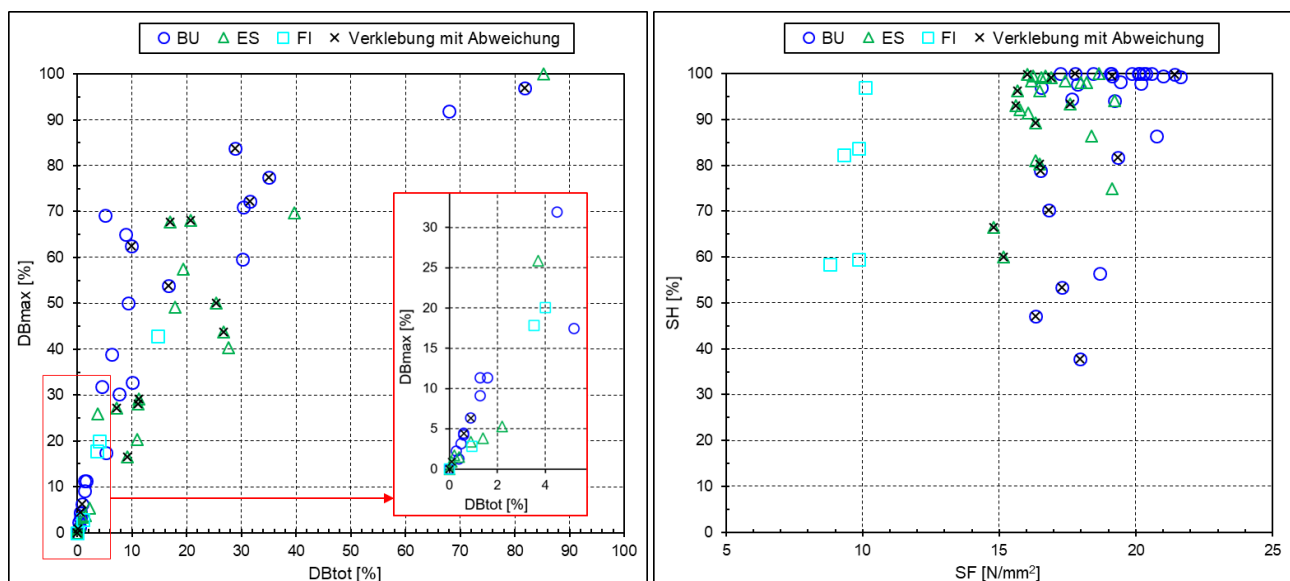


Bild 12. Zusammenhang der Qualitätsparameter bei Delaminierung (links) und Blockscherprüfung (rechts)



3.2 Detailaspekte / Einflussfaktoren

Bei der Festlegung von Anforderungswerten gilt es auch, Zusammenhänge und mögliche Einflussfaktoren auf die Klebfugenqualität zu kennen und zu berücksichtigen. Die nachfolgenden Kapitel beleuchten jeweils basierend auf den Ergebnissen in einzelnen oder mehreren Versuchsserien ausgewählte Aspekte.

3.2.1 Zusammenhänge der Qualitätsparameter

Die Kenntnis über grundlegende Zusammenhänge zwischen Parametern, welche die Verklebungsqualität beschreiben, ist wichtig für die Wahl einer zielführenden Prüfmethodik. Erste Zusammenhänge innerhalb der einzelnen Prüfmethoden wurden schon im Kapitel 3.1 (Bild 12) diskutiert. Nachfolgend werden nun auch Zusammenhänge zwischen Parametern der verschiedenen Prüfmethoden betrachtet.

Als Datenbasis werden wiederum die zusammengefassten Daten aus allen Labor- und industriellen Verklebungen der Versuchsreihen S1 bis S5 verwendet. In Bild 13 sind die Qualitätsparameter IBtot, IBmin, SH, SF und SL (Parameterbeschreibung siehe Tabelle 7) aufgeteilt in die einzelnen Versuchsreihen als Liniengrafiken dargestellt. Aus der Lage der Linien ist erkennbar, ob einzelne BSH-Querschnitte eine gute resp. unterdurchschnittliche Verklebungsqualität aufweisen (höhere Werte sind Hinweis auf eine bessere Qualität). Die Gleichläufigkeit zweier Linien weist dabei einen positiven Zusammenhang hin, eine Gegenläufigkeit deutet einen negativen Zusammenhang an. Die zweidimensionalen Darstellungen in Bild 14 zeigen ergänzend den paarweisen Zusammenhang zwischen Delaminierung und Scherfestigkeit resp. Holzbruchanteil.

Feststellungen / Bewertung:

- Die Parameter für die Delaminierung (IBtot, IBmin) weisen übereinstimmend und deutlich auf eine verminderte Verklebungsqualität bei den Verklebungsvarianten PUR1-, PUR2 und PUR2- in den Versuchsreihen S2 und S3 hin (Bild 13 oben). Teilweise trifft dies auch beim Holzbruchanteil (SH) zu. Die Scherfestigkeit (SF) ist nur bei besonders schlechten Verklebungen auffällig (PUR1-). Die einzelnen Prüfkörper (1.x, 2.x, 3.x) zeigen aufgrund des unterschiedlichen Lamellenaufbaus deutlich unterschiedliche Verklebungsqualitäten (siehe Kapitel 3.2.5).
- Gut erkennbar ist auch die ungenügende Verklebungsqualität der MUF-Verklebungen in der Versuchsreihe S5 (Bild 13 unten rechts).
- Die Scherfestigkeit der Klebfugen (SF) zeigt einen deutlichen Zusammenhang mit der Scherfestigkeit des Holzes der Lamellen (SL). Bei Buche erreicht oder übersteigt die Scherfestigkeit der Klebfugen bei einzelnen Verklebungen diejenige des Holzes (Bild 13 oben).
- Zwischen Delaminierung und Scherfestigkeit besteht kein offensichtlicher Zusammenhang (Bild 14 links), während wie schon bei Nadelholz [Steiger 2014b] zwischen Delaminierung und Holzbruchanteil ein tendenzieller, positiver Zusammenhang zu erkennen ist (Bild 14 rechts).

Bild 13. Zusammenhang der Delaminierungs- und Scherprüfungs-Parameter IB_{tot} , IB_{min} , SH , SF und SL bei Buche und Esche in den Versuchsreihen S1 bis S5

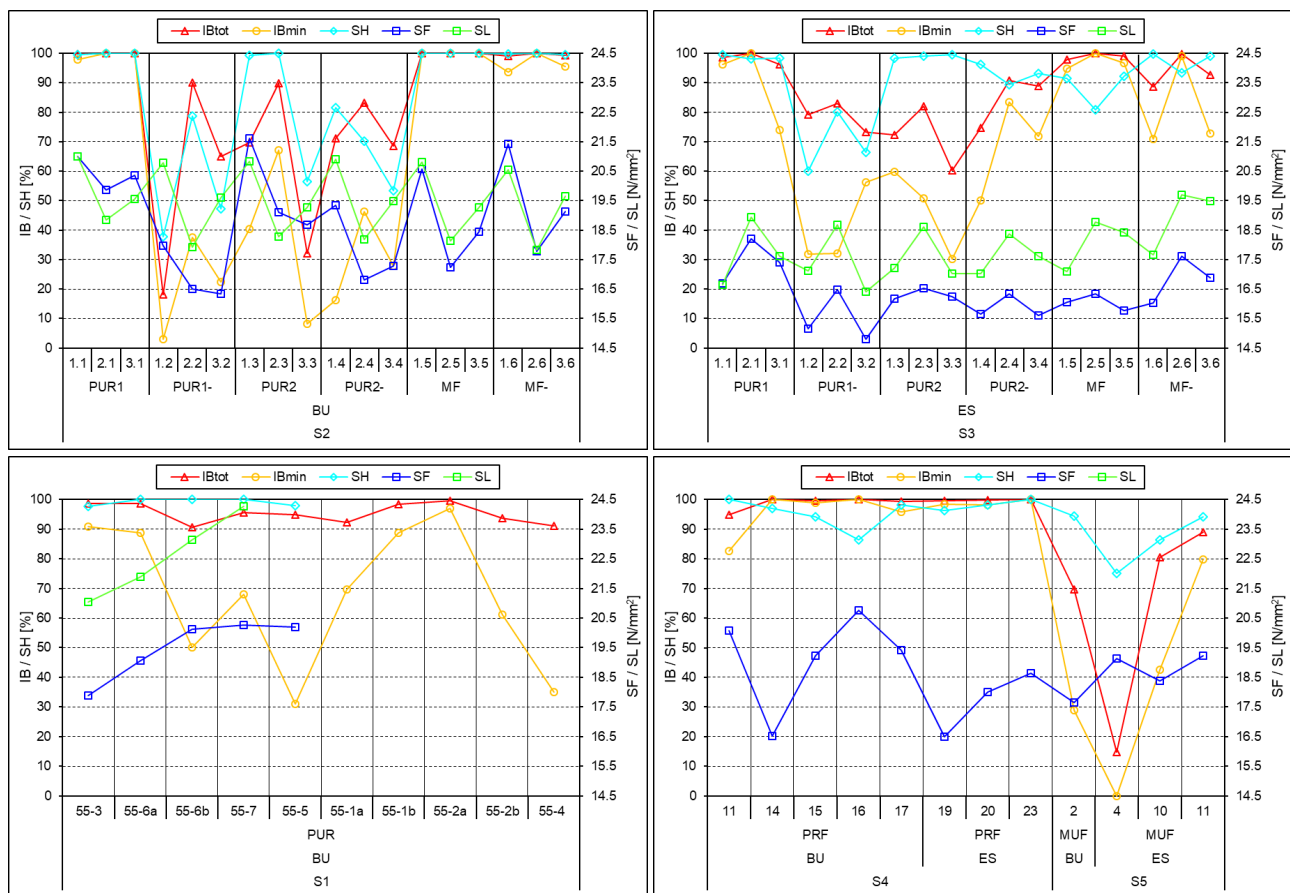
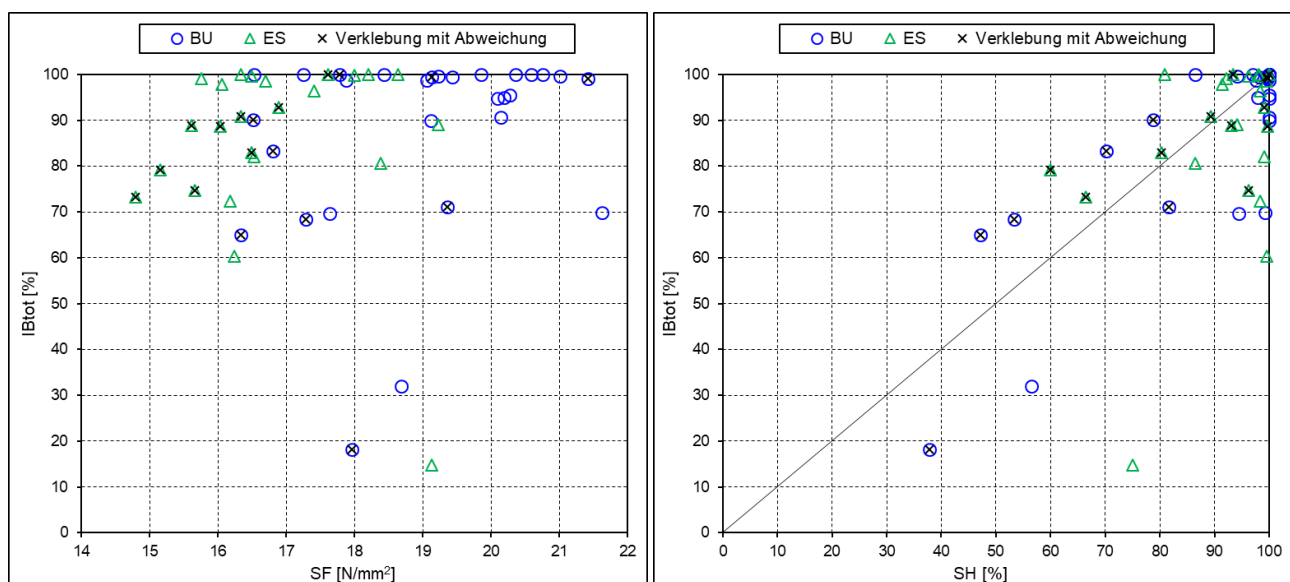


Bild 14. Paarweiser Zusammenhang zwischen Delaminierung (IB_{tot}) und Scherfestigkeit (SF) resp. Holzbruchanteil (SH) bei Buche und Esche in den Versuchsreihen S1 bis S5



3.2.2 Blockscherprüfung: Relative Fugenfestigkeit

Für Nadelholz und Pappel ist in der SN EN 14080 eine fixe Grenzlinie für die Scherfestigkeit der Klebfugen vorgegeben (siehe Bild 3). Aufgrund der Rohdichte-abhängigen, unterschiedlichen absoluten Scherfestigkeiten (siehe Kapitel 3.1) scheint ein solches Vorgehen bei Laubholz nicht praktikabel. Eine alternative Möglichkeit ist die Verwendung einer relativen Fugenfestigkeit, in welcher die Scherfestigkeit der Klebfugen in Prozent der Scherfestigkeit des Holzes ausgedrückt wird [ANSI A190-2, Aicher 2018].

Als entsprechende Bezugs-Scherfestigkeit des Holzes kommen 2 Möglichkeiten in Frage:

- 'Erfahrungs'-Mittelwert pro Holzart
- direkt am Probenmaterial gemessene Scherfestigkeit (Scherebene parallel zur Klebfuge in Dickenmitte der Lamellen)

Für die Berechnung der relativen Fugenfestigkeit bestehen 2 Varianten:

- Niveau Querschnittsproben-Mittelwerte: Verhältnis der Querschnittsproben-Mittelwerte der Scherfestigkeit der Klebfugen und des Holzes
- Niveau Einzelfugen (Probenstreifen): Verhältnis der Scherfestigkeit einer Klebfuge zum Mittelwert der Scherfestigkeit des Holzes der 2 miteinander verklebten Lamellen

Bild 15. Beispiele der aus der Scherfestigkeit einzelner Fugen (SF) und der Holzfestigkeit der 2 benachbarten Lamellen (SL) berechneten relativen Fugenfestigkeit (SF%) für die Buchenproben B1.1 und B1.2 aus Versuchsreihe S2 (oben) und die Eschenproben E1.1 und E1.2 aus Versuchsreihe S3 (unten)

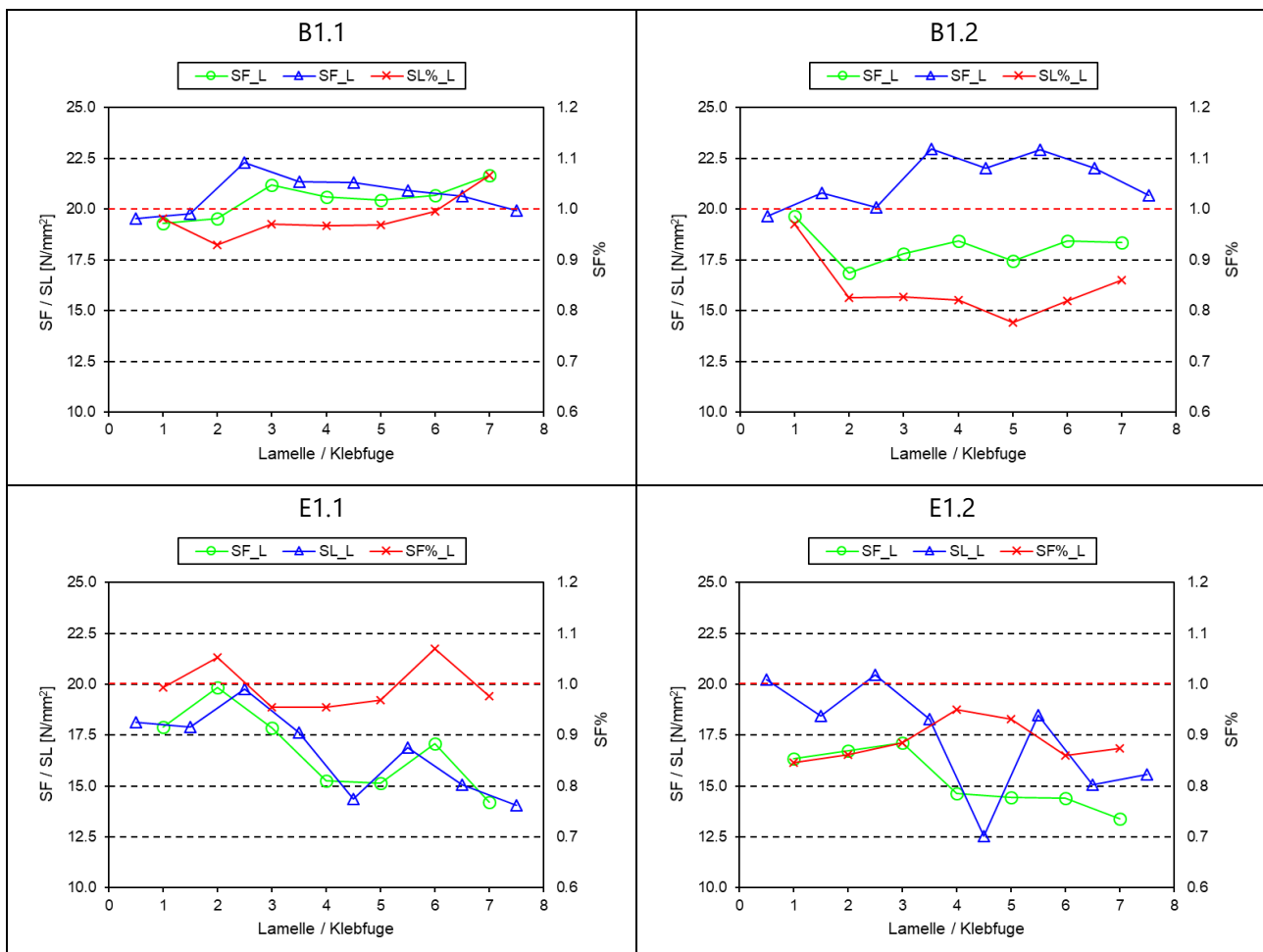


Bild 15 zeigt Beispiele der relativen Festigkeit der Klebfugen in einzelnen BSH-Querschnitten berechnet aus der Scherfestigkeit der Fugen und der Holzfestigkeit der 2 benachbarten Lamellen. Bild 16 gibt einen Überblick über die relative Festigkeit aller Klebfugen der einzelnen Probenstreifen in den Versuchsreihen S2 und S3. Und aus Bild 17 geht anhand des Zusammenhangs zwischen der absoluten und der relativen Fugenfestigkeit die Gruppierung der Proben nach Verklebungsvarianten und Lamellenaufbau hervor.

Bild 16. Relative Festigkeit (SF%) aller Klebfugen der einzelnen Probenstreifen über die Verklebungsvarianten und Prüfkörper aus Buche (links) und Esche (rechts) in den Versuchsreihen S2 und S3

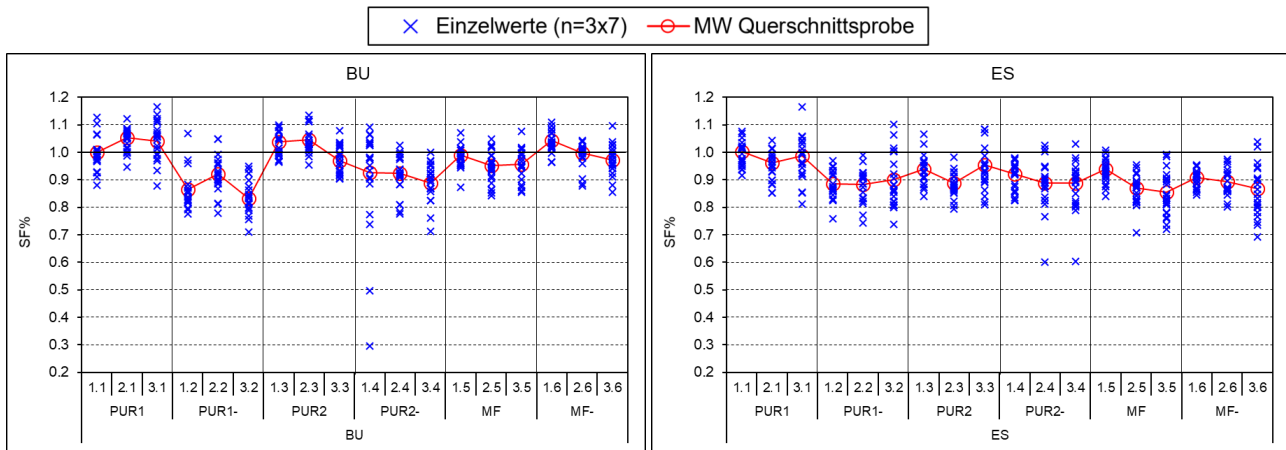
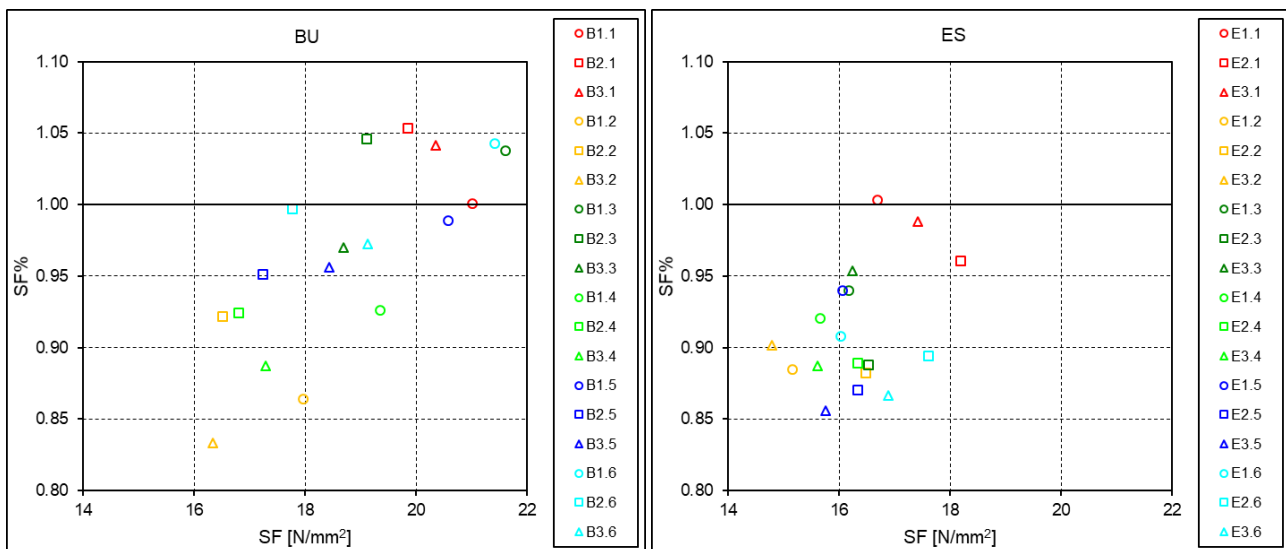


Bild 17. Zusammenhang zwischen den Querschnittsproben-Mittelwerten der absoluten (SF) und der relativen (SF%) Fugenfestigkeit bei Buche (links) und Esche (rechts) in den Versuchsreihen S2 und S3. Die Verklebungsvarianten sind durch die gleiche Farbe und der Lamellenaufbau durch das gleiche Symbol gekennzeichnet.



Feststellungen / Bewertung:

- Als Folge der Streuung der lokalen Holzeigenschaften (Rohdichte, Jahrringstellung, Strukturstörungen) schwankt die Scherfestigkeit des Holzes von Lamelle zu Lamelle (Bild 15). Zwischen der Scherfestigkeit des Holzes und der Klebfugen besteht grundsätzlich ein positiver Zusammenhang. Individuelle Abweichungen sind aufgrund lokaler Gegebenheiten aber möglich. Dabei kann die Scherfestigkeit der Klebfuge die Holzfestigkeit der beteiligten Lamellen sogar überschreiten. Bei einer einwandfreien Verklebung schwankt die relative Fugenfestigkeit um den Wert 1 (Proben B1.1 und E1.1 in Bild 15), bei einer ungenügenden Verklebungsqualität liegt sie oft deutlich darunter (Proben B1.2 und E1.2).

- Die Mehrheit der einzelnen Klebfugen zeigt bei einer einwandfreien Verklebung eine relative Fugenfestigkeit im Bereich zwischen 0.9 und 1.1 (Bild 16). Bei einer ungenügenden Verklebungsqualität kann die relative Fugenfestigkeit auf 0.7 oder tiefer sinken. Als spezifischer Holzarten-Unterschied ist festzustellen, dass bei einer einwandfreien Verklebung die Querschnittsproben-Mittelwerte bei Buche meist nahe bei 1 liegen (Fugenfestigkeit entspricht Holzfestigkeit), während bei Esche die typische relative Fugenfestigkeit eher 0.9 beträgt (Fugenfestigkeit ist kleiner als Holzfestigkeit).

Bei den Buchen-Proben auffällig sind die tiefen Werte bei der Verklebungsvariante PUR1-. Demgegenüber fallen bei Esche die hohen Werte der relativen Fugenfestigkeit bei der Verklebungsvariante PUR1 auf.

- Aus dem Zusammenhang zwischen der absoluten und der relativen Fugenfestigkeit wird eine relativ klare Gruppierung nach Verklebungsvarianten (siehe Tabelle 6) und Lamellenaufbau sichtbar (Bild 17): Die höchsten Klebfugen-Festigkeiten zeigt bei beiden Holzarten die Verklebungsvariante 1 (PUR1), während die geringsten Werte tendenziell bei der Verklebungsvariante 2 (PUR1-) festzustellen sind, wo bei der Verklebung bewusst von den Vorgaben des Klebstoffherstellers abgewichen wurde.

3.2.3 Einzelfugenwerte versus Querschnittsproben-Mittelwert

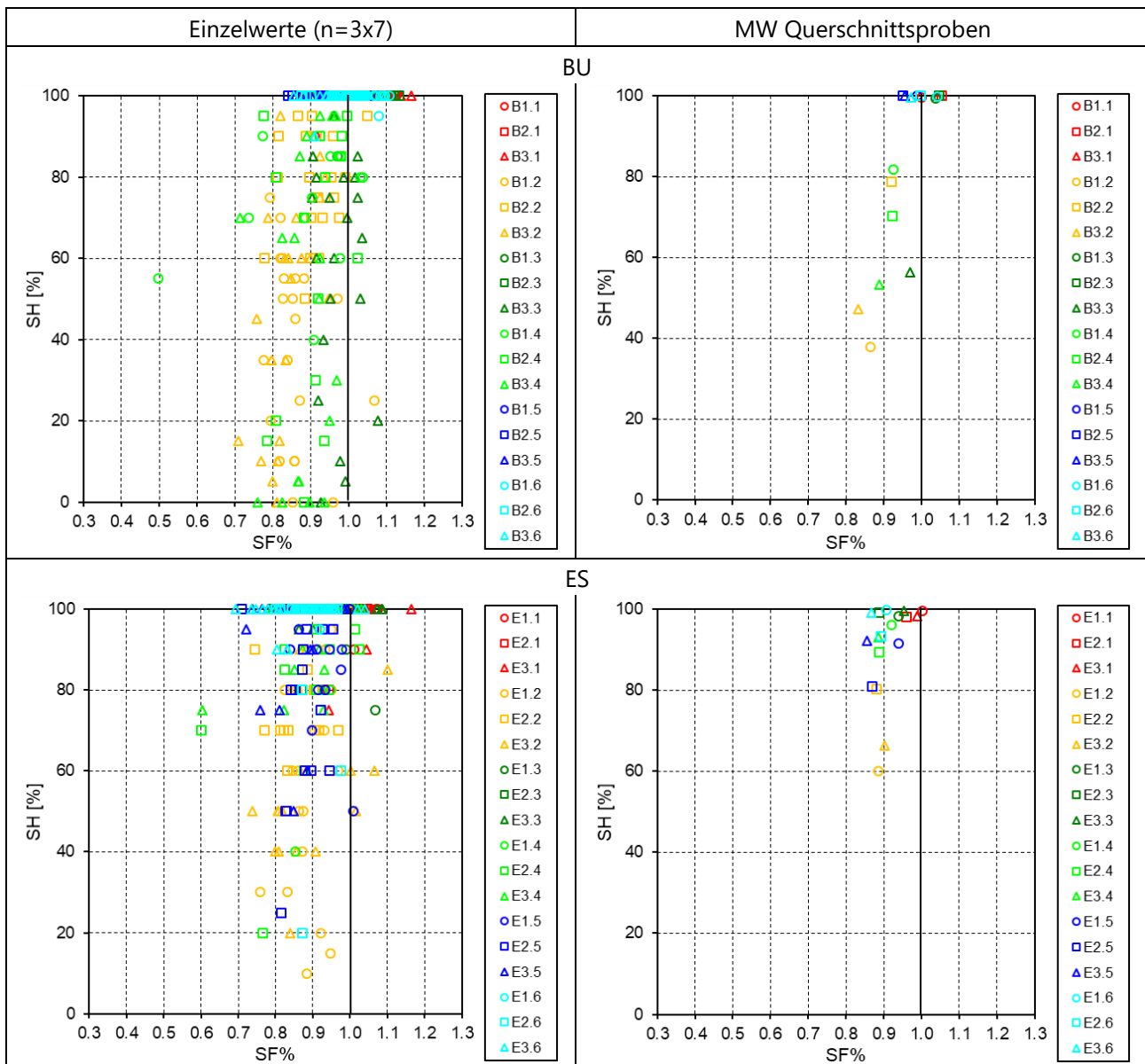
Von grosser Bedeutung für die korrekte Bewertung der Prüfergebnisse sind die in der Tabelle 8 aufgelisteten verschiedenen Betrachtungsebenen. Besonders wichtig ist dabei die Unterscheidung zwischen Einzelprüfwerten und (berechneten) Querschnittsproben-Mittelwerten. Für Nadelholz und Pappel sind in der SN EN 14080 sowohl bei der Delaminierung als auch bei der Scherprüfung separate Anforderungen an Einzelwerte wie auch an Querschnittsproben-Mittelwerte definiert (siehe Tabelle 4 und Bild 3).

Am Beispiel der Scherprüfung sind in Bild 18 die Daten der Einzelwerte und der Querschnittsproben-Mittelwerte einander gegenübergestellt. Für die Delaminierung sind analoge Betrachtungen anhand von Bild 12 (links) möglich.

Feststellungen / Bewertung:

- Die Einzelwerte streuen naturgemäss über einen wesentlich grösseren Wertebereich (Bild 18 linke Spalte) als die Querschnittsproben-Mittelwerte (Bild 18 rechte Spalte). Insbesondere der Holzbruchanteil (SH) schwankt bei den Einzelfugen im ganzen Wertebereich zwischen 0% und 100%, wobei bei Esche eine Abnahme der Häufigkeit bei den tiefen Holzbruchanteil-Werten festzustellen ist.
- Die Betrachtung der Einzelprüfwerte ermöglicht die Identifizierung von einzelnen, besonders schlechten Klebfugen, während die Querschnittsproben-Mittelwerte besser geeignet sind für die Unterscheidung zwischen unterschiedlichen Verklebungsvarianten.
- Die unterschiedliche Streuung von Einzelwerten und Querschnittsproben-Mittelwerten ist bei der Festlegung von Anforderungswerten zu beachten.

Bild 18. Einzelwerte (links) und Querschnittsproben-Mittelwerte (rechts) der Buchenproben der Versuchsserie S2 (oben) und der Eschenproben der Versuchsserie S3 (unten)



3.2.4 Erkennung von 'schwachen' Klebfugen

Ein erklärtes Ziel der Qualitätskontrolle von BSH ist die Erkennung von Fehlverklebungen resp. von besonders 'schwachen' Klebfugen (siehe Kapitel 1.3.1). In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob schwache Klebfugen mit beiden Prüfmethoden gleichermassen erkannt werden.

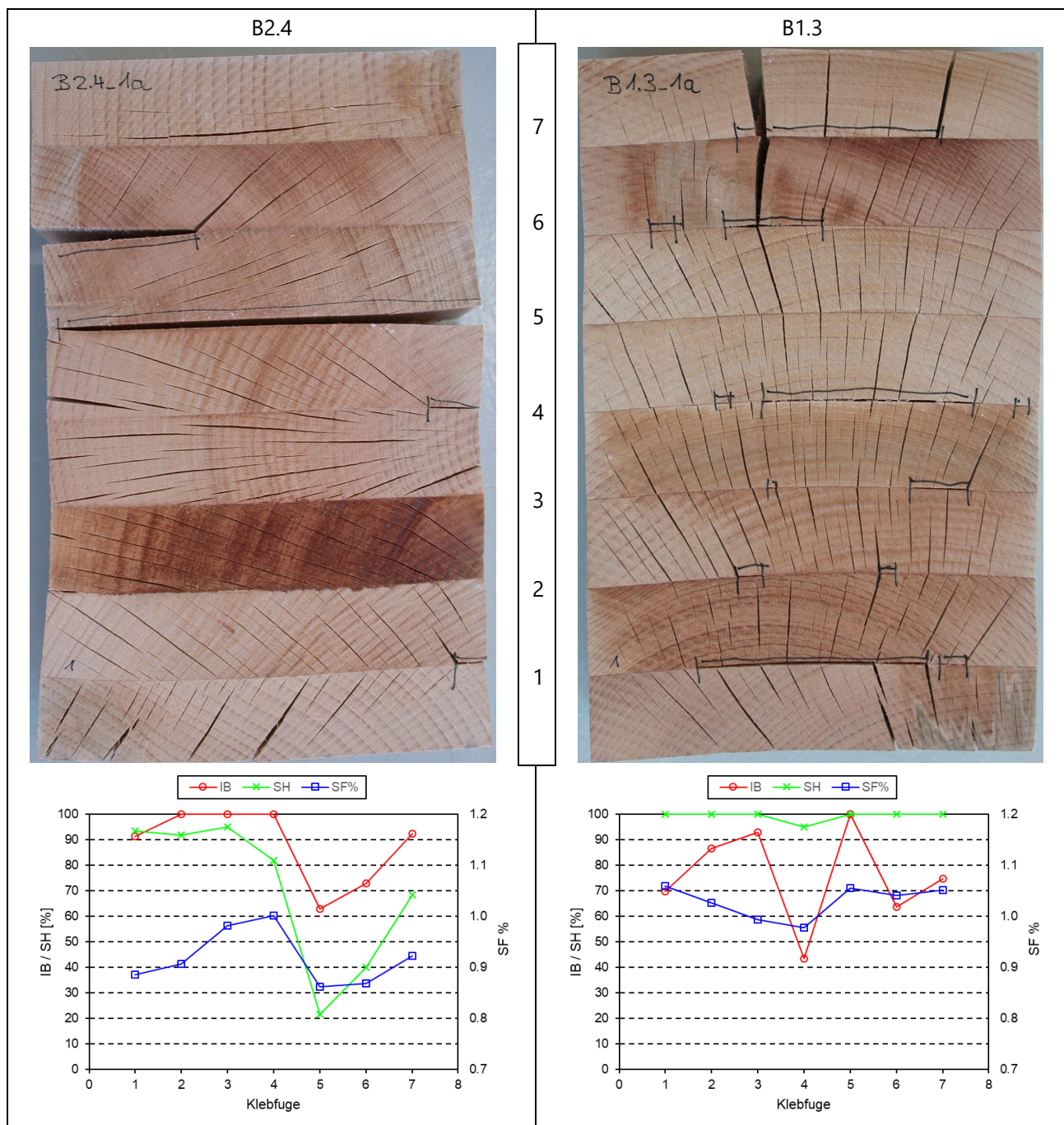
Die Bilder 19 und 20 zeigen Beispiele von Einzelfugendaten bei Buchen und Esche mit unterschiedlichen Hinweisen auf schwache Klebfugen.

Feststellungen / Bewertung:

- Bei der Buchen-Probe B2.4 (Bild 19 links) verlaufen die Fugenwerte für den intakten Klebfugenanteil (IB) und den Holzbruchanteil (SH) nahezu parallel und deuten auf eine ungenügende Verklebungsqualität der Klebfugen 5 und 6 hin. Auch die relative Fugenfestigkeit (SF%) zeigt für diese Fugen auffällig tiefe Werte.

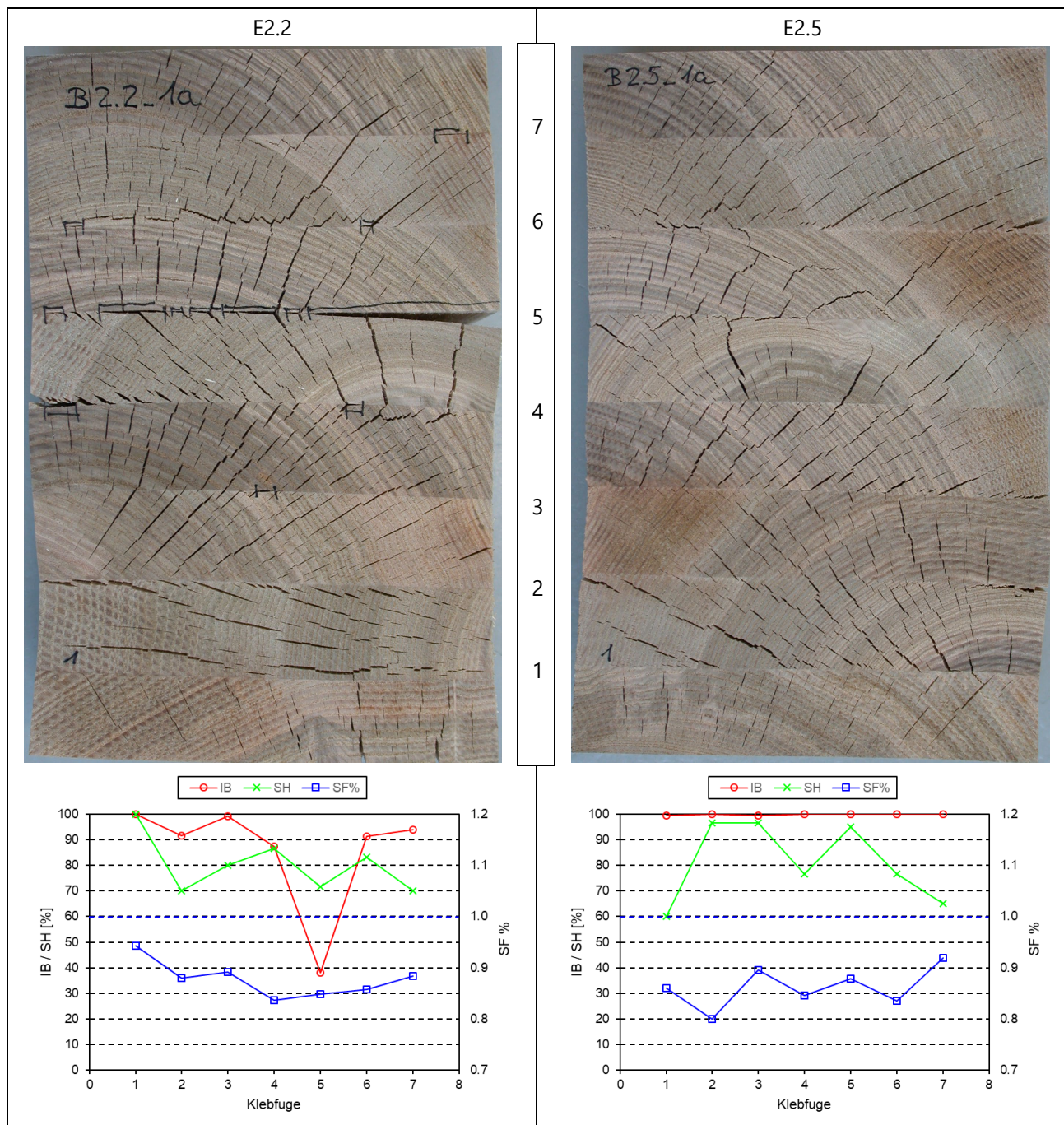
- Probe B1.3 (Bild 19 rechts) zeigt für die Klebfuge 4 einen auffällig geringen intakten Klebfugenanteil (IB). Die Ergebnisse der Scherprüfung ergeben hingegen sowohl bezüglich relativer Fugenfestigkeit (SF%) als auch bezüglich Holzbruchanteil (SH) nur einen leichten Hinweis auf eine Schwachstelle bei dieser Klebfuge.
- Bei der Eschen-Probe E2.2 (Bild 20 links) deutet der geringe intakte Klebfugenanteil (IB) auf eine mögliche Fehlverklebung bei Klebfuge 5 hin. Der Holzbruchanteil (SH) bei dieser Klebfuge ist ebenfalls reduziert. Dies gilt allerdings auch für die Fugen 2 und 7, welche aber nur eine geringfügige Delaminierung aufweisen. Die relative Fugenfestigkeit (SF%) ist für alle Klebfugen unauffällig.

Bild 19. Beispiele von Einzelfugendaten bei Buche (Versuchsserie S2) mit entsprechendem Querschnitts-Bild nach dem Delaminierungstest (Verfahren B). Die Daten des Blockschertests (SF%, SH) sind Mittelwerte aus 3 Probenstreifen.



- Ein etwas ungewöhnliches Beispiel ist Probe E2.5 (Bild 20 rechts), wo der Holzbruchanteil (SH) bei den Klebfugen 1, 4, 6 und 7 reduziert ist. Sowohl der intakte Klebfugenanteil (IB) als auch die relative Fugenfestigkeit (SF%) zeigen aber keine Hinweise auf eine mögliche Fehlverklebung.
- Bezüglich Erkennung von schwachen Klebfugen ergeben die beiden Prüfmethoden Delaminierung und Blockscherntest nicht immer das gleiche Ergebnis. Relativ häufig zeigen das Ausmass der Delaminierung und der Holzbruchanteil aufgrund des generellen Zusammenhangs (siehe Kapitel 3.2.1) auf die gleichen Klebfugen als Schwachpunkte. Die relative Fugenfestigkeit für sich allein ist hingegen selten ein verlässlicher Indikator für eine schwache Klebfuge.

Bild 20. Beispiele von Einzelfugendaten bei Esche (Versuchsserie S3) mit entsprechendem Querschnitts-Bild nach dem Delaminierungstest (Verfahren B). Die Daten des Blockscherntests (SF%, SH) sind Mittelwerte aus 3 Probenstreifen.



3.2.5 Jahrringstellung der Lamellen

Für BSH aus Nadelholz ist gemäss der SN EN 14080 ein Querschnittsaufbau aus Seitenbrettern vorgesehen (SN EN 14080 I.5.4). Aufgrund der limitierten Verfügbarkeit solcher Lamellen beim Laubholz und in Anlehnung an den Aufbau der BSH-Biegeträger im Aktionsplan Holz Projekt 'Buchen-BSH' wurde im vorliegenden Projekt der Einfluss der Jahrringstellung der Lamellen auf die Klebfestigkeit näher untersucht.

Aus Bild 21 ist exemplarisch der Einfluss der Jahrringstellung der Lamellen bei der Delaminierung anhand einer Probe aus der Versuchsreihe S1 erkennbar. Die Ergebnisse der systematischen Variation des Querschnittsaufbaus der Prüfkörper in den Versuchsreihen S2 und S3 (siehe Kapitel 2.3.2) sind in Bild 22 dargestellt und in Bild 23 schematisch zusammengefasst.

Feststellungen / Bewertung:

- Aufgrund des maximalen Quellmasses von über 10% in tangentialer Richtung quellen die Lamellen mit tangentialer Jahrringstellung während der Wasserlagerung von anfänglich 160 mm Breite auf rund 175 mm (Bild 21). Durch den inhomogenen Lamellenaufbau (4x Seitenbrett / 8x rift/halbrift / 4x Seitenbrett) und die damit verbundene unterschiedliche Quellung ergibt sich im gequollenen Zustand ein Sanduhr-förmiger Querschnitt.

Bei der Trocknung entsteht nachfolgend ein mehr oder weniger ausgeprägtes Feuchtegefälle zwischen Innen und Aussen, und die resultierenden Spannungen führen zu Holzrissen und geöffneten Klebfugen. Im dargestellten Beispiel sind die stärksten Delaminierungen in der Übergangsfuge zwischen den Lamellen mit tangentialer und Rift/Halbrift Jahrringstellung zu beobachten.

- Bei der Delaminierung (DBtot, DBmax) der systematischen Querschnitts-Varianten ergaben sich beim Rift/Halbrift-Aufbau als Folge der geringeren Schwind- und Quell-Beanspruchung deutlich bessere Ergebnisse als bei liegender Jahrringstellung (Bild 22 oben links). Bei liegender Jahrringstellung war die Delaminierung bei Buche zudem deutlich höher als bei Esche.
- Bei der Scherfestigkeit zeigten Buche und Esche bezüglich Jahrringstellung ein unterschiedliches, bisher kaum dokumentiertes Verhalten (Bild 22 unten): Bei Buche lag die Scherfestigkeit sowohl der Klebfugen als auch des Holzes der Lamellen bei liegenden Jahrringen deutlich höher als bei einer Rift/Halbrift Jahrringstellung. Der Grund dafür ist vermutlich die Schwächung durch die Holzstrahlen in der Radialebene. Bei Esche lagen die Scherfestigkeiten wie bereits erwähnt insgesamt tiefer als bei Buche, aber im Gegensatz zur Buche waren die Scherfestigkeiten bei einer Rift/Halbrift Jahrringstellung höher als bei liegenden Jahrringen. Die Schwachstelle bei der Scherung von liegenden Jahrringen ist vermutlich das ringporige Frühholz.
- Beim Holzbruchanteil (SH) war bezüglich Querschnittsaufbau resp. Jahrringstellung der Lamellen kein eindeutiger Trend zu beobachten (Bild 22 oben rechts).
- Aus der schematischen Zusammenfassung des Einflusses der Jahrringstellung der Lamellen ist ersichtlich, dass bezüglich Delaminierungsverhalten grundsätzlich eine Rift/Halbrift Jahrringstellung zu bevorzugen wäre (Bild 23). Bezüglich Scherfestigkeiten muss zwischen den Holzarten unterschieden werden: Bei Buche ist eine liegende Jahrringstellung von Vorteil, bei Esche jedoch Rift/Halbrift.

Bild 21. Beispiel des Einflusses der Jahrringstellung der Lamellen bei der Delaminierung (Verfahren C) anhand der Buchenprobe 55-6b aus der Versuchsreihe S1: Zustand nach Wasserlagerung (links) und am Ende der Trocknungsphase (rechts). Die gestrichelte rote Linie markiert den Nennquerschnitt 160x400 mm.

Probenserie: S1, Probe: 55-6b

Aufbau: BU, **4x Seitenbrett / 8x Rift/Halbrift / 4x Seitenbrett**, Klebstoff: PUR

Querschnitt: 160 x 400 mm, Lamellen: 25 mm

nach Wasserlagerung

nach Trocknung



Bild 22. Einfluss der Jahrringstellung der Lamellen auf Delaminierung und Schereigenschaften (Mittelwert über alle Buchen- und Eschenproben der Versuchsreihen S2 und S3)

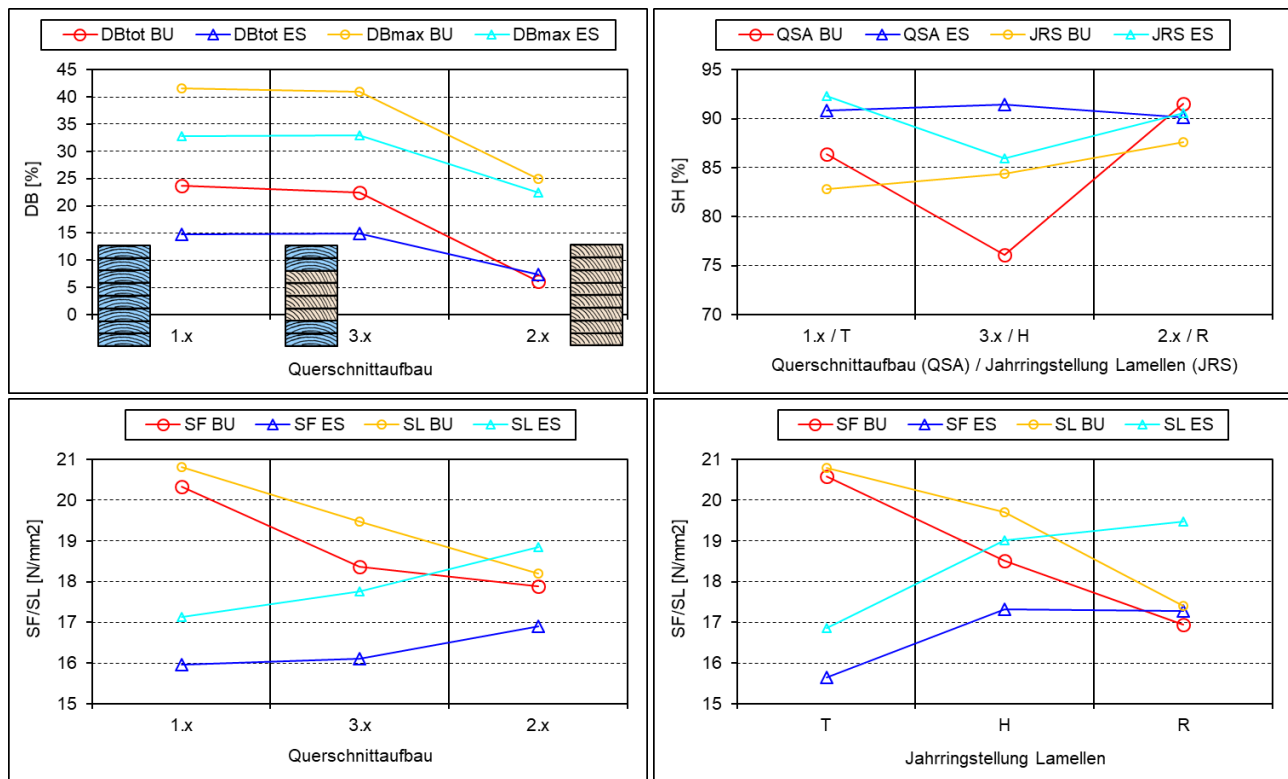
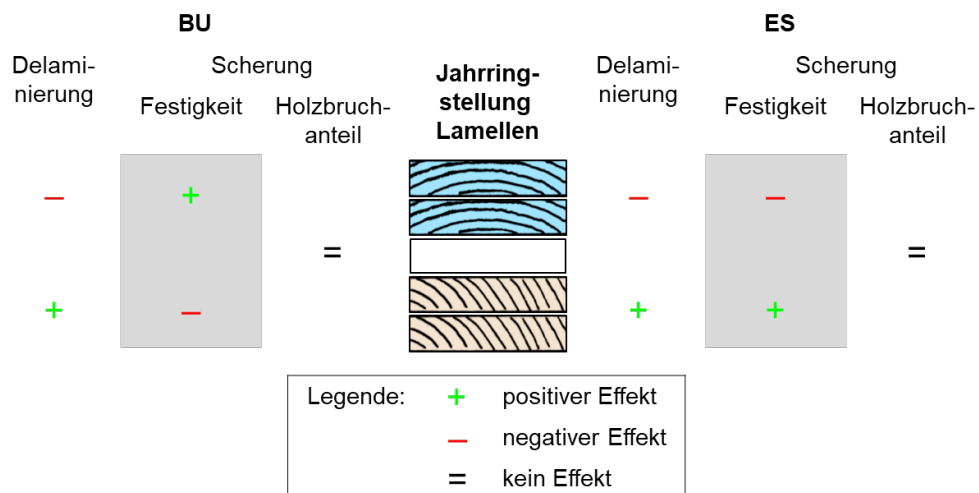


Bild 23. Schematische Zusammenfassung des Einflusses der Jahrringstellung der Lamellen auf die Klebfestigkeit von BSH aus Buche (links) und Esche (rechts)



3.2.6 Hybrider Querschnittsaufbau

Ein hybrider Querschnittsaufbau aus verschiedenen Holzarten ist gemäss der SN EN 14080 (Paragraph 5.5.2) zwar nicht zugelassen, wird in der Schweiz für Spezialfälle jedoch gelegentlich angewendet (z.B. Aussenlamellen aus Laubholz/Kernlamellen aus Nadelholz oder gezielte lokale Verstärkungen durch Laubholzlamellen). Als potentiell kritischer Punkt bezüglich Verklebungsqualität ist bei hybriden Querschnittsaufbauten der Übergangsbereich zwischen verschiedenen Holzarten zu vermuten. Zudem stellt sich die Frage, welche Anforderungswerte bei einer Qualitätsprüfung angewendet werden könnten.

Aufgrund der wenigen verfügbaren Proben kann der Aspekt des hybriden Querschnittsaufbaus nur exemplarisch dargestellt werden. Bild 24 enthält zwei Beispiele von BSH-Abschnitten aus industrieller Produktion mit Querschnitts-Bildern nach der Delaminierungsprüfung und Einzelfugendaten aus der Delaminierungs- und Scherprüfung (Mittelwert aus 2 resp. 3 Probenstreifen).

Feststellungen / Bewertung:

- Beim dargestellten ES/FI-Hybridbau (Bild 24 links) ist das unterschiedliche Verhalten der Eschen- und Fichten-Lamellen deutlich erkennbar. Insbesondere die Klebfuge 9 ist stark delaminiert (DB) und weist auch einen tiefen Holzbruchanteil (SH) auf. Dadurch ist auch die Scherfestigkeit (SF) bei dieser Klebfuge tiefer als bei einer ES-ES-Fuge zu erwarten wäre (vgl. Klebfuge 1). Trotz dem Fehlen klarer Anforderungswerte ist die Verklebungsqualität der Eschen-Lamellen bei dieser Probe sicher als kritisch zu betrachten
- Das zweite Beispiel mit einer Eichen-Decklamelle auf einem Fichten-BSH (PRF-Verklebung) zeigt hingegen eine einwandfreie Verklebungsqualität (Bild 24 rechts). Es wurde keine Delaminierung festgestellt und der Holzbruchanteil lag bei fast allen Klebfugen bei 100%. Die FI/EI-Klebfuge 5 weist eine etwas erhöhte Scherfestigkeit von rund 15 N/mm² auf.
- Ein hybrider Querschnittsaufbau aus verschiedenen Holzarten bedingt sicherlich eine für alle beteiligten Holzarten geeignete Verklebungstechnik (z.B. Klebstoff, Pressdruck). Ein besonderes Augenmerk ist auf den Übergang zwischen Laubholz- und Nadelholz-Lamellen zu richten. Angesichts der vielen Kombinationsmöglichkeiten (LH/LH, LH/NH, NH/NH) dürfte eine praktikable Definition von Anforderungswerten schwierig sein.

Bild 24. Beispiele des Verhaltens von hybriden Querschnittsaufbauten: Zustand nach Delaminierung mit Verfahren B (oben) und Delaminierungs- resp. Scherprüfkennwerte pro Klebstoffuge (unten)

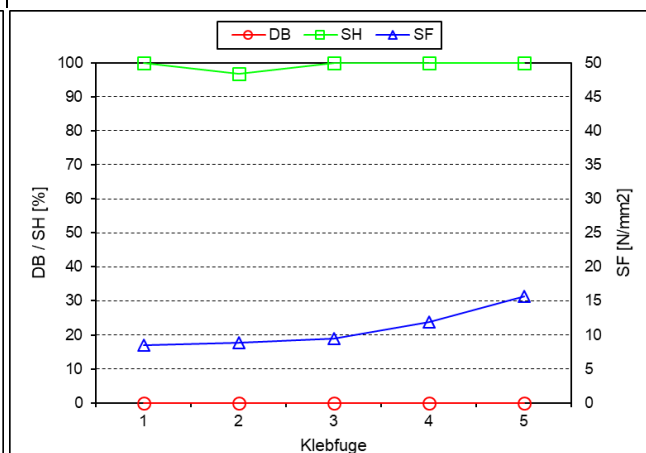
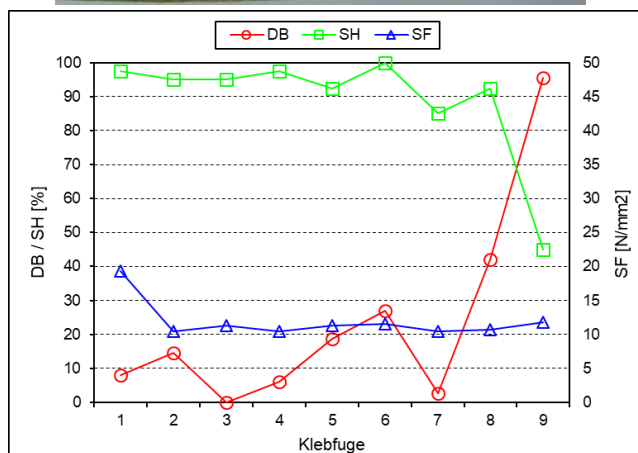
Probenserie: S5, Probe: 5

Aufbau: 2x ES/ 6x FI / 2x ES, Klebstoff: MUF
Querschnitt: 160 x 400 mm, Lamellen: 41 mm



Probenserie: S4, Probe: 21

Aufbau: 5x FI / 1x EI, Klebstoff: PRF
Querschnitt: 150 x 200 mm, Lamellen: 22/38 mm



3.2.7 Delaminierung: Effekt der Verfahren / Prüfzyklen

Die Definition und Wahl der Delaminierungsverfahren gibt immer wieder Anlass zu Diskussionen. Dem Ruf nach realistischen Beanspruchungsbedingungen steht die Forderung nach möglichst einfachen und schnellen Prüfmethode gegenüber. Mit der Verwendung von Laubholz verschärft sich diese Problematik noch, da Feuchteverhalten und die damit verbundenen Dimensionsänderungen von Holzart zu Holzart stark schwanken und in der Regel gegenüber Nadelholz ungünstiger sind.

Zur besseren Berücksichtigung der spezifischen BU/ES-Eigenschaften wurde im vorliegenden Projekt zusätzlich zu den in der SN EN 14080 beschriebenen Prüfzyklen B und C ein weiterer Prüfzyklus (X) definiert und getestet (siehe Kapitel 2.2.1 resp. Tabelle 4). Der durchgeführte Vergleich der Testbedingungen und der Delaminierungs-Ergebnisse basiert auf Untersuchungen an gepaartem Probenmaterial (aufeinanderfolgende Querschnittsscheiben) und ist daher grundsätzlich bis auf Einzelfugenniveau möglich.

In der Tabelle 9 werden Dauer und Feuchtezustände bei verschiedenen Delaminierungsverfahren und Holzarten verglichen. Der Zusammenhang der Ergebnisse bei verschiedenen Prüfzyklen (basierend auf Einzelproben) ist in Bild 25 dargestellt. Beispielhafte paarweise Vergleiche von BSH-Querschnitten nach verschiedenen Delaminierungsverfahren sind in Anhang 2 angefügt. Und in der Tabelle 10 sind die durchschnittlichen Veränderungen im Ausmass der Delaminierung bei den Verfahren X und C bezogen auf das Verfahren B zusammengestellt.

Feststellungen / Bewertung:

- Durch die Wasserlagerung erhöht sich die Holzfeuchte der BSH-Querschnitte von rund 10% Ausgangsfeuchte Holzarten-spezifisch auf rund 100% bei Buche und 80-90% bei Esche (Tabelle 9). Bei Fichte liegen die Holzfeuchtwerte nach der Wasserlagerung bei über 120%. Die Rücktrocknung erfolgt in die Bandbreite von 100-110% der Ausgangsmasse resp. auf eine Holzfeuchte zwischen 15 und 23%.
- Die Dauer der Delaminierungsprüfung wird primär vom Prüfzyklus bestimmt und beträgt beim Verfahren B rund 1 Tag, beim Verfahren C 4 bis 5 Tage und beim alternativen Verfahren X 2 Tage (Tabelle 9). Die Dauer der Delaminierungsprüfung ist infolge der längeren Rücktrocknung bei Laubholz generell höher als bei Nadelholz, und bei Esche deutlich höher als bei Buche.
- Der visuelle Vergleich von ausgewählten BSH-Querschnitten zeigt überwiegend ein gut übereinstimmendes Delaminierungsbild, insbesondere bezüglich den besonders 'schwachen' Klebfugen (siehe Fotos in Anhang 2). Das Ausmass der Delaminierungen liegt bei den verschiedenen Prüfzyklen sowohl bezüglich Gesamtdelaminierung (D_{tot}) als auch bezüglich der maximalen Fugendelaminierung (D_{max}) insgesamt in der gleichen Grössenordnung und zeigt einen grundsätzlichen Zusammenhang (Bild 25). Es ist aber erkennbar, dass die Buchenproben nach Verfahren X (blaue Kreise) tendenziell tiefer liegen als nach Verfahren B, während dies bei den Eschenproben (rote Dreiecke) umgekehrt ist.
- Diese Beobachtungen werden durch den Vergleich der durchschnittlichen Delaminierung resp. der prozentualen Veränderung bestätigt (Tabelle 10): Die Gesamtdelaminierung (D_{tot}) ist bei den Buchenproben nach Verfahren X 24% geringer als nach Verfahren B, bei den Eschenproben jedoch 29% höher. Der Unterschied ist vermutlich im unterschiedlichen Trocknungsverhalten von Buche und Esche begründet. Die Gesamtdelaminierung nach Verfahren C ist aufgrund der moderaten Trocknungsbedingungen deutlich geringer als nach Verfahren B. Die Differenzen zwischen den verschiedenen Delaminierungsverfahren sind bei der maximalen Fugendelaminierung (D_{max}) durchwegs geringer als bei der Gesamtdelaminierung (D_{tot}).
- Bei der Definition von alternativen Prüfzyklen sind immer auch die Konsequenzen auf die Versuchsdauer zu beachten. Eine rasche Auffeuchtung ist praktisch nur mit einer Wasserlagerung möglich. Die Dosierung des Trocknungsstresses erfolgt primär über die Trocknungstemperatur resp. die Trocknungsgeschwindigkeit. Angesichts des sehr unterschiedlichen Trocknungsverhaltens der verschiedenen Holzarten ist als Trocknungsziel immer der Bereich von 100-110% der Ausgangsmasse (und nicht eine fixe Trocknungszeit) zu definieren.

Tabelle 9: Dauer und Feuchtezustände bei verschiedenen Delaminierungsverfahren und Holzarten

Verfahren	Holzart	Dauer total [h]	Masse [%] ¹⁾		Holzfeuchte [%] ²⁾	
			nach Wasserlagerung	nach Trocknung	nach Wasserlagerung	nach Trocknung
B	BU	16.1	181.6	108.2	99.4	19.2
	ES	31.3	173.9	105.4	92.3	17.0
	FI	14.4	202.6	107.2	124.9	19.0
C	BU	90.0	182.0	107.1	100.3	17.8
	ES	123.0	166.8	110.7	85.0	22.9
X	BU	40.4	180.1	104.7	99.6	15.9
	ES	48.4	162.7	110.3	79.7	21.8

¹⁾ bezogen auf Masse beim Start, ²⁾ Annahme für Ausgangsholzfeuchte: 10-11%

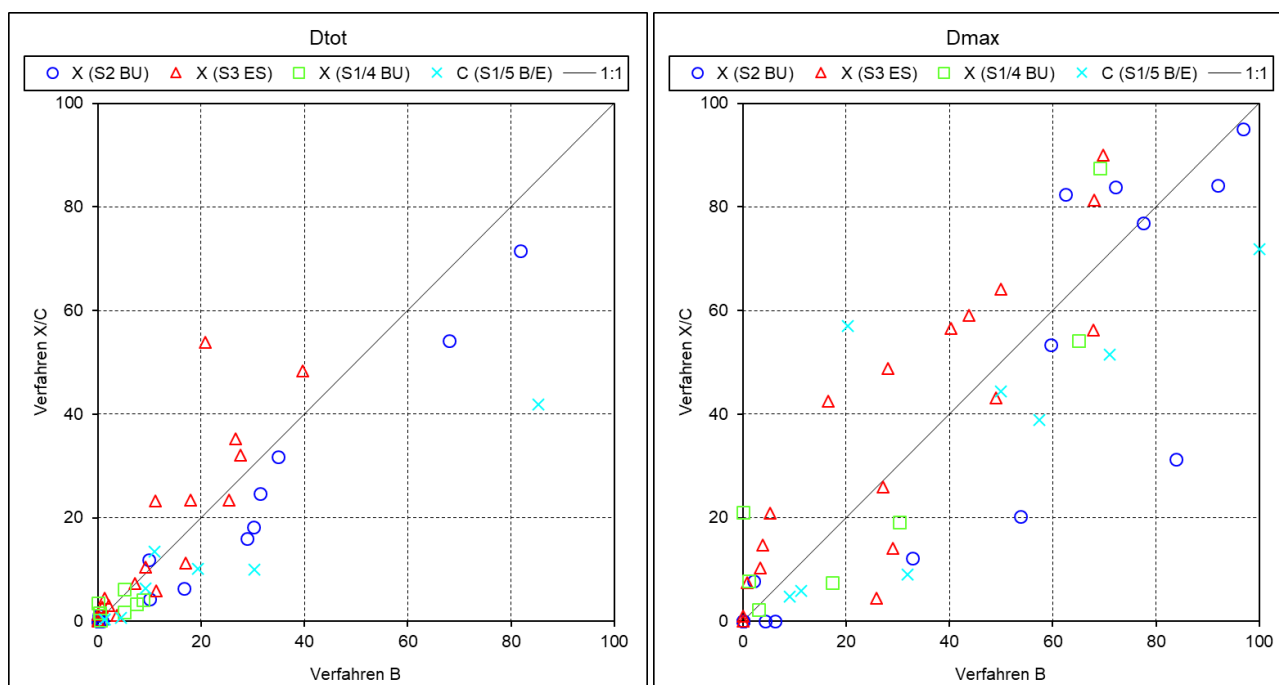
Bild 25. Zusammenhang der Ergebnisse der verschiedenen Delaminierungsverfahren (basierend auf Einzelproben): Gesamtdelaminierung D_{tot} (links) und maximale Fugendelaminierung D_{max} (rechts)

Tabelle 10: Vergleich der durchschnittlichen Delaminierung mit den alternativen Verfahren X resp. C bezogen auf das Verfahren B

Serie	Holzart	D_{tot} [%]				D_{max} [%]			
		B	X	C	X/C vs B	B	X	C	X/C vs B
S2	BU	17.4	13.3		-24%	35.8	30.4		-15%
S3	ES	12.4	16.0		+29%	29.4	35.6		+21%
S1/4	BU	3.9	3.0		-25%	26.6	28.5		+7%
S1/5	BU/ES	20.3		10.4	-49%	43.9		35.4	-19%

3.2.8 Blockscherprüfung: Volumeneinfluss / Effekt Probenhöhe

Bei der Interpretation der absoluten Scherfestigkeiten ist ein Volumeneinfluss bezüglich der Scherhöhe zu beachten, welcher gemäss SN EN 14080 bei der Umrechnung der Scherfestigkeit auf eine Standardhöhe von 50 mm mit einem Korrekturfaktor berücksichtigt wird (siehe Kapitel 2.2.2). Diese Umrechnung ist notwendig für die Überprüfung mit den für 50 mm Probehöhe festgelegten Anforderungen (Bild 3) und um Werte von relativ dünnen Bohrkernen mit solchen von würfelförmigen Normproben vergleichen zu können.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass dieser Korrekturfaktor für Nadelholz entwickelt wurde (Die Datengrundlage dafür ist leider nicht bekannt). Die Untersuchungen im Rahmen des vorliegenden Projektes sollten zeigen, ob dieser Korrekturfaktor auch bei Laubholz gültig ist oder allenfalls angepasst werden muss.

Im Rahmen der Versuchsreihen S2 und S3 wurden deshalb die Scherversuche systematisch mit 3 verschiedenen Probenhöhen durchgeführt: 50 mm als Standardhöhe, 40 mm als reduzierte Höhe und 26 mm für Bohrkern mit 35 mm Durchmesser (siehe Bild 8). Einbezogen wurden sowohl die Scherfestigkeit der Klebfugen (SF) als auch die Scherfestigkeit des Holzes der Lamellen (SL). Um den grundsätzlichen Volumeneinfluss zu erfassen und allenfalls fehlerhafte Proben auszuschliessen, wurden nur Proben mit einem Holzbruchanteil von $\geq 90\%$ einbezogen. Mit diesem Vorgehen konnte der Einfluss der Probehöhe auf die Scherfestigkeit bei Buche und Esche detailliert erfasst und mögliche Korrekturen untersucht werden.

Feststellungen / Bewertung:

- Wie bekannt, nehmen die absoluten Scherfestigkeiten aufgrund des Volumeneinflusses mit zunehmender Probehöhe ab (Bild 26 links). Die Scherfestigkeiten des Holzes der Lamellen liegen generell über derjenigen der Fugenfestigkeit. Trotz unterschiedlichem Festigkeitsniveau von Buche und Esche ist der Volumeneinfluss bei beiden Holzarten in der gleichen Grössenordnung, scheint aber nicht linear zu sein.
- Ein Vergleich der empirischen Umrechnungsfaktoren auf eine Probehöhe von 50 mm bei Buche und Esche zeigt, dass der in der SN EN 14080 verwendete Korrekturfaktor ($k_{v\text{ EN14080}} = 0.78 + 0.0044 \cdot t$) zu klein ist (Bild 26 rechts). Da die verfügbaren Daten keine separate Behandlung von Buche und Esche als zwingend erscheinen lassen, wurde für beide Holzarten ein gemeinsamer Korrekturfaktor abgeleitet:

$$k_{v\text{ BU/ES}} = 0.65 + 0.0069 \cdot t$$

(mit t = Höhe der Scherfläche in Faserrichtung [mm], in der SN EN 14080 als 'Dicke' bezeichnet).

- Bei der Definition des Volumeneffektes sind neben der Probehöhe verschiedene weitere Einflussfaktoren auf den Korrekturfaktor zu berücksichtigen:
 - Der Korrekturfaktor bildet den Volumeneinfluss primär auf Mittelwertsniveau ab. Einzelproben zeigen eine recht grosse Streuung und können erheblich vom Mittelwertsniveau abweichen. Insbesondere ist häufig ein nicht-linearer Volumeneinfluss zu beobachten (Bild 27).
 - Der Volumeneinfluss ist auch abhängig von der Höhe der Scherfestigkeit, mit einem zunehmenden Einfluss bei höheren Festigkeiten (Bild 28 links). Dieser Effekt wurde auch schon anderweitig beobachtet [Gaspar 2018]. Der durch die höheren Festigkeiten bei Buche und Esche erhöhte Volumeneinfluss dürfte auch der Grund sein für den berechneten höheren Korrekturfaktor (siehe oben).
 - Der Volumeneinfluss ist bei der Scherprüfung der Klebfugen entgegen den Erwartungen über den ganzen Wertebereich des Holzbruchanteils festzustellen und scheint unabhängig vom Holzbruchanteil zu sein (Bild 28 rechts).

Bild 26. Mittelwerte der Scherfestigkeiten der Klebfugen (SF) und des Holzes der Lamellen (SL) in Abhängigkeit von der Probenhöhe (links) und Umrechnungsfaktoren auf eine Standard-Probenhöhe von 50 mm (rechts). Die Fugenfestigkeiten wurden nur bei einem Holzbruchanteil von $\geq 90\%$ einbezogen.

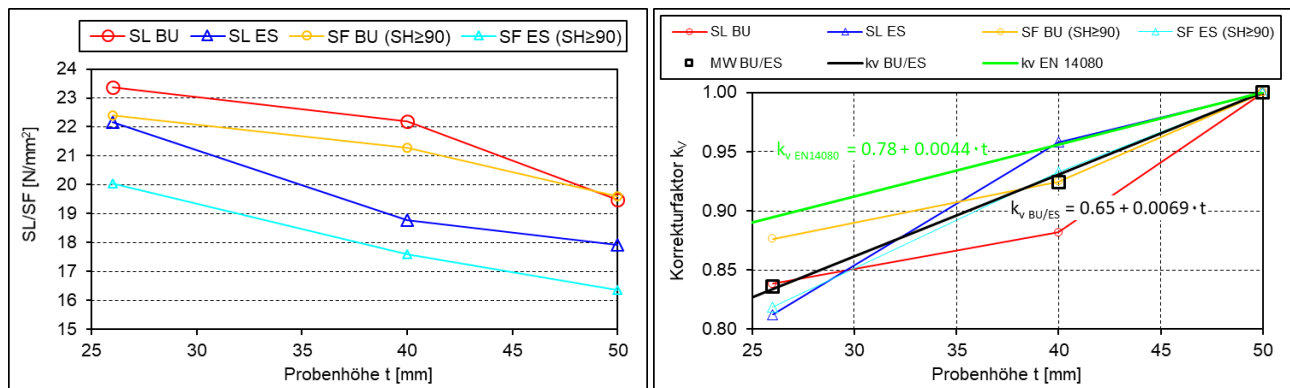


Bild 27. Verhältnis der Scherfestigkeiten bei verschiedenen Probenhöhen (bezogen auf 50 mm Probenhöhe) bei den einzelnen Klebfugen der Probe B3.5 (links) und der Scherfestigkeit des Holzes der Lamellen bei Probe E1.4 (rechts)

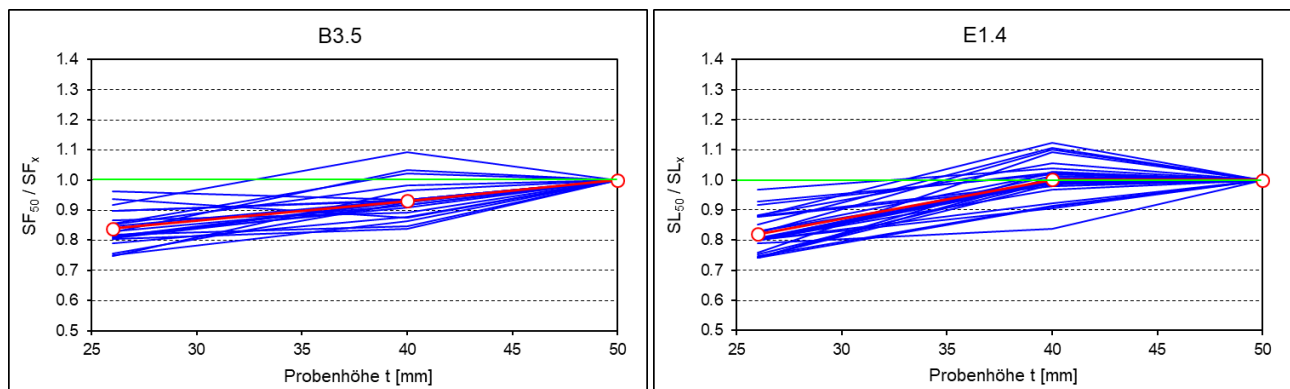
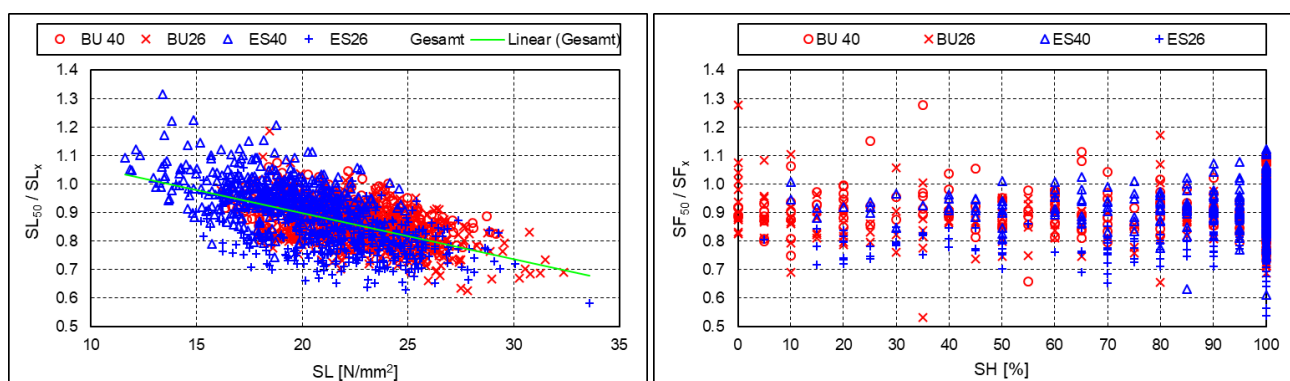


Bild 28. Abhängigkeit des Verhältnisses der Scherfestigkeit bei verschiedenen Probenhöhen (bezogen auf 50 mm Probenhöhe) von der Höhe der Scherfestigkeit des Holzes (links) und vom Holzbruchanteil bei Klebfugen (rechts)



3.2.9 Klebfugendicke

Die Klebfugendicke ist ein wichtiger und relativ einfach zu kontrollierender Indikator zur Überwachung der Verklebungsqualität. Die Klebfugendicke soll dabei den durch die Klebstoffhersteller gemachten Empfehlungen und den Vorgaben der SN EN 14080 (Paragraph I.5.8) entsprechen. Zwischen und innerhalb der Produktionschargen soll die Streuung der Klebfugendicke möglichst gering sein.

Die Klebfugendicke wurde nur bei den Laborverklebungen der Versuchsreihen S2 und S3 gemessen, bei denen auch die genauen Verklebungsbedingungen (Tabelle 6) bekannt sind.

Feststellungen / Bewertung:

- Die Genauigkeit der Messung der Klebfugendicke ist generell limitiert, da die Abgrenzung zwischen durchgehender Klebstoffuge und der Klebstoffeindringung (z.B. bei gefüllten Gefässen im Laubholz) nicht immer einfach ist (Bild 30). Dadurch ergeben sich vielfach lokale Schwankungen, welche von systematischen oder fehlerbedingten Schwankungen des Verklebungsprozesses zu unterscheiden sind. Mittelwerte über mehrere Einzelmessungen erlauben aber in der Regel die verlässliche Quantifizierung einer 'durchschnittlichen' Klebfugendicke'.
- Die Klebfugendicke ist bei den gemessenen Beispielen ausgeprägt Klebstoff-spezifisch, mit sehr geringer Dicke beim Klebstoff PUR1 und relativ dicken Klebfugen bei den Klebstoffen PUR2 und MF (Bilder 29 und 30).
- Bei beiden PUR-Klebstoffen ist die Klebfugendicke bei Buche etwas grösser als bei Esche (Bild 29). Bei der MF-Verklebung ist es umgekehrt.
- Bei der PUR2-Verklebung wirkt sich die geringere Auftragsmenge des Klebstoffes und der reduzierte Pressdruck nicht erkennbar auf die Klebfugendicke aus (Bild 29). Beim einem Verzicht auf die geschlossene Wartezeit bei der MF-Verklebung wird jedoch offenbar der Klebstoff beim Pressen mehr verdrängt, was sich bei beiden Holzarten in einer deutlich reduzierten Klebfugendicke zeigt.
- Die Versuche mit den verschiedenen Querschnittsaufbauten bezüglich der Jahrringstellung in den Lamellen geben keinen Hinweis auf einen Einfluss der Jahrringstellung auf die Klebfugendicke.

Bild 29. Klebfugendicken bei Buche und Esche in den verschiedenen Verklebungsvarianten der Versuchsreihen S2 und S3 (vertikaler Balken = Standardabweichung, jeweils 3x7x2 = 42 Klebfugenmessungen)

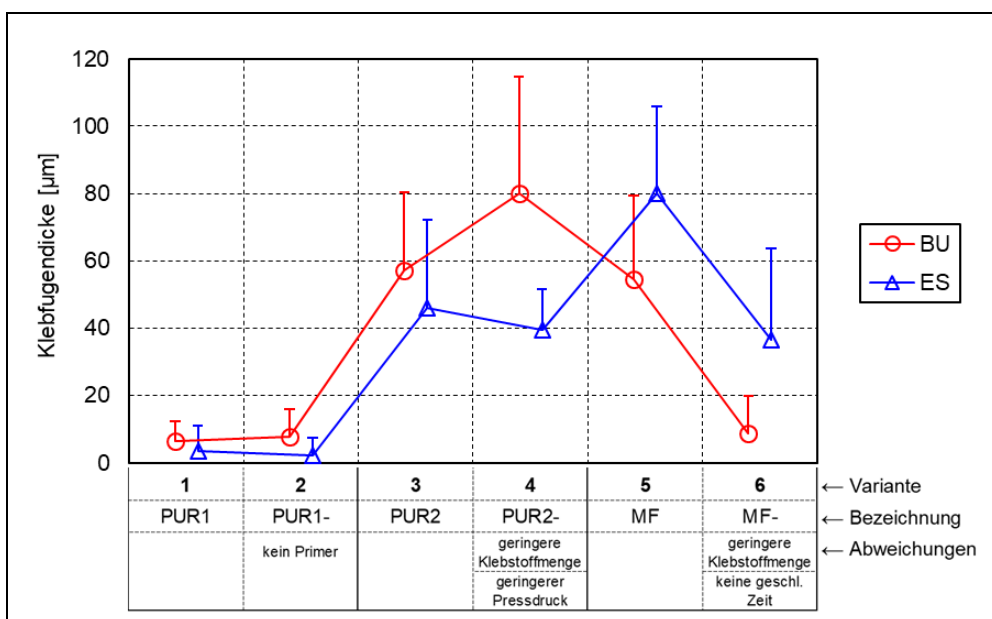
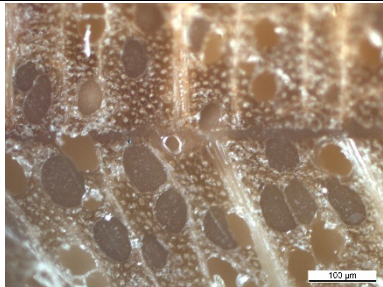
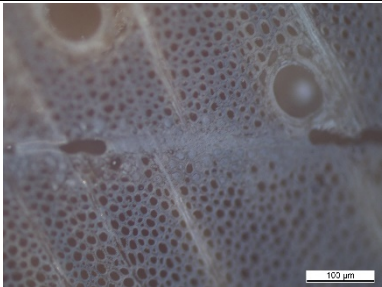
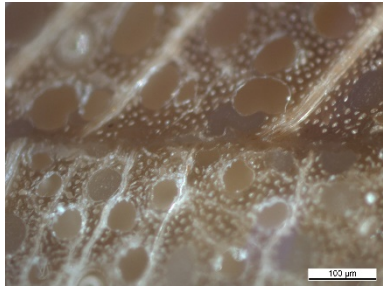
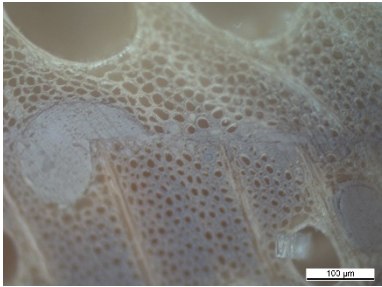
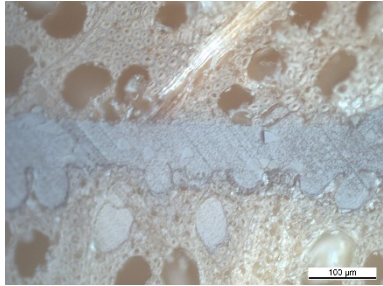

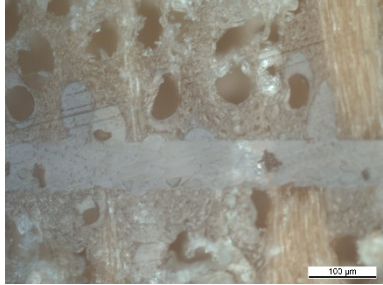
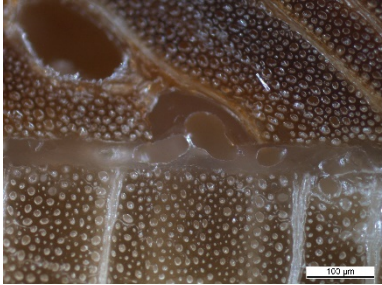
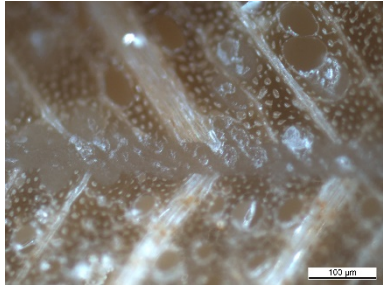
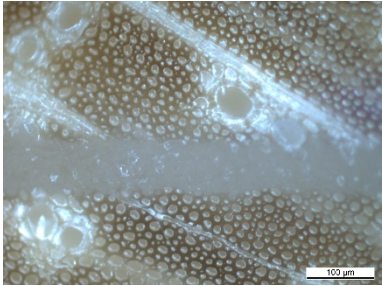
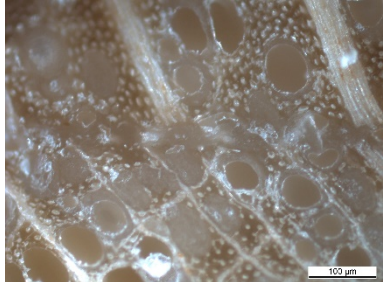
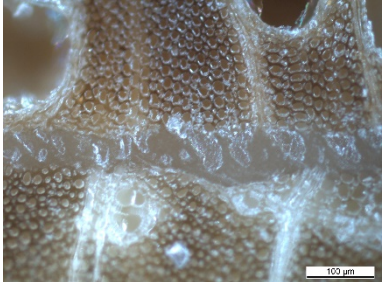


Bild 30: Ausgewählte mikroskopische Aufnahmen der Klebfugen in Versuchsserie S2 und S3

Variante	Klebstoff	Abweichungen	Buche (S2)	Esche (S3)
1	PUR1			
2	PUR1-	- kein Primer		
3	PUR2			
4	PUR2-	- geringere Klebstoffmenge - geringerer Pressdruck		
5	MF			
6	MF-	- geringere Klebstoffmenge - keine geschl. Wartezeit		

3.3 Festlegung und Überprüfung von Qualitätsanforderungen

Die Festlegung der Qualitätsanforderungen kann kaum auf physikalisch/mechanisch fundierte Kriterien abgestützt werden. Vielmehr müssen dazu die erreichbaren Leistungswerte aus Versuchen und aus der Praxiserfahrung herangezogen werden. Das Ziel wäre, eine möglichst klare Trennung der Qualitätsmerkmale von einwandfreien und fehlerhaften Verklebungen zu finden.

Tabelle 11 enthält einen Vorschlag für einen möglichen, anspruchsvollen Satz von Qualitätsanforderungen bei der Delaminierungs- und Blockscherprüfung von Laubholz-Flächenverklebungen. Der Vorschlag beruht auf folgenden Überlegungen:

- Um keine grundsätzliche Differenz zu den Vorgaben beim Nadelholz zu schaffen, sollten die Anforderungen an das Konzept der SN EN 14080 angelehnt sein. Die Grundlagen zur Herleitung der in der SN EN 14080 festgelegten Anforderungen bezüglich Delaminierung und Blockscherprüfung der Flächenverklebung bei BSH aus Nadelholz sind allerdings in der Norm nicht dokumentiert und den Projektbearbeitern nicht bekannt.
- Die im Projekt durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass die nach Verfahren B durchgeführte Delaminierungsprüfung grundsätzlich auch bei Laubholz zu plausiblen Ergebnissen führt. Die Erfüllung der entsprechenden Anforderungen ($D_{\text{tot}} \leq 4\%$, $D_{\text{max}} \leq 30\%$) ist anspruchsvoll, aber machbar, und wurde daher übernommen. Auf die Möglichkeit der Durchführung von Zusatzzyklen wurde verzichtet. Als besonders wichtig und angebracht wird die Definition einer maximalen Fugendelaminierung von $\leq 30\%$ angesehen, um einzelne Klebfugen mit einer ungenügenden Verklebungsqualität auszuschliessen.
- Bezüglich Blockscherfestigkeit haben die im Projekt durchgeführten Versuche gezeigt, dass die Festlegung von absoluten Scherfestigkeiten nicht zielführend wäre, da viele Einflussfaktoren diesen Wert beeinflussen (z.B. Holzart, Jahrringstellung Lamellen). Alternativ wird die Verwendung einer 'relativen' Fugenfestigkeit vorgeschlagen (siehe Kapitel 3.2.2). Dieses Vorgehen wurde auch von [Aicher 2018] gewählt, wo basierend auf Arbeiten im 'EU Hardwoods'-Projekt konkrete Anforderungswerte vorgeschlagen werden. Diese Anforderungswerte sind grundsätzlich sehr anspruchsvoll, werden aber als 'Startwerte' in den Vorschlag übernommen.
- Wie bei der Delaminierung und bei den bestehenden Anforderungen für Nadelholz, sollten auch bezüglich der Scherprüfung von Einzelfugen Anforderungswerte definiert werden, um Klebfugen mit einer ungenügenden Verklebungsqualität auszuschliessen. Dazu erscheint aber die Datengrundlage noch ungenügend, da keine offensichtliche Trennung zwischen einwandfreien und fehlerhaften Verklebungen möglich ist (siehe Bild 18 links). Auch in [Aicher 2018] gibt es diesbezüglich keine Empfehlung. Die entsprechenden Anforderungen müssten sicher tiefer angesetzt sein als für die Querschnitts-Mittelwerte und allenfalls auch ein zusätzliches Ausschlusskriterium für Proben mit sowohl tiefer Scherfestigkeit als auch tiefem Holzbruchanteil enthalten (wie bei bestehender Anforderung an Einzelwert bei Nadelholz gemäss Bild 3).

Tabelle 11: Vorschlag für Anforderungswerte bezüglich Qualität der Flächenverklebung bei Laubholz

Prüfung	Parameter	Daten-Niveau	Kriterium ¹⁾	Anlehnung an
Delaminierung	Klebfugen-Öffnungen	Querschnitts-Mittelwert	$D_{\text{tot}} \leq 4\%$	SN EN 14080, Tabelle 9, Verfahren B nach 1 Zyklus
		Einzelfuge	$D_{\text{max}} \leq 30\%$	SN EN 14080, Paragraph 5.5.5.2.2
Blockscherung	Scherfestigkeit	Querschnitts-Mittelwert	$f_{v,f} \geq 0.9 f_{v,H}$	Aicher 2018
		Einzelfuge	(festzulegen)	Datengrundlage ungenügend für Festlegung
	Holzbruchanteil	Querschnitts-Mittelwert	$HB \geq 80\%$	Aicher 2018
		Einzelfuge	(festzulegen)	Datengrundlage ungenügend für Festlegung

¹⁾ D_{tot} : Gesamtprozentsatz Delaminierung, D_{max} : Höchstprozentsatz Delaminierung, $f_{v,f}$: Scherfestigkeit Klebfugen, $f_{v,H}$: Scherfestigkeit Holz, HB: Holzbruchanteil

Die Anwendung dieser Anforderungswerte auf die Daten der Versuchsreihen S2 und S3 ist in den Tabellen 12 und 13 sowie in Bild 31 illustriert.

Feststellungen / Bewertung:

- Die Trennung zwischen einwandfreien und fehlerhaften Verklebungen erscheint bei Buche klarer als bei Esche, wo mehr Proben im Grenzbereich liegen (Bild 31). Bei der Delaminierung der Buchenproben überschreiten alle 'nicht erfüllt'-Proben sowohl die Anforderungen an den Querschnitts-Mittelwert (DBtot) als auch an die maximale Delaminierung einer Fuge (DBmax).
- In der Tabelle 12 ist die Anzahl der Proben für die zwei Prüfmethoden und Holzarten zusammengestellt, welche die Anforderungen erfüllen resp. nicht erfüllen.

Bei der Delaminierung der Buchenproben erfüllen je 9 der 18 Proben die Anforderungen resp. erfüllen sie nicht. Bei den Eschenproben erfüllen mit 7 von 18 Proben etwas weniger als die Hälfte der Proben die Anforderungen, wobei interessanterweise 4 Proben lediglich aufgrund der Anforderungen an den Querschnitts-Mittelwert (DBtot) nicht erfüllen.

Bei der Blockscherprüfung erfüllen bei Buche 12 von 18 Proben die Anforderungen und bei Esche 8 von 18. Bei Esche ist das Erreichen einer Klebfugenfestigkeit von 90% der Holzfestigkeit der Lamelle offenbar eine eher schwer zu erfüllende Anforderung.

Insgesamt erfüllen bei Buche etwas mehr Proben die Anforderungen als bei Esche.

- Eine weitere Überprüfung der Anforderungen auf der Basis von einzelnen BSH-Querschnitten ist in der Tabelle 13 enthalten. Es ist klar ersichtlich, dass die Anforderungen bei den Verklebungsvarianten 2, 3 und 4 und beiden Holzarten häufig nicht erfüllt werden. Die Delaminierung zeigt dabei ein einheitlicheres und bei beiden Holzarten ein besser übereinstimmendes Muster als bei der Blockscherprüfung.

Tabelle 12: Anzahl der Proben in den Versuchsreihen S2 und S3, welche die Anforderungen erfüllen resp. nicht erfüllen

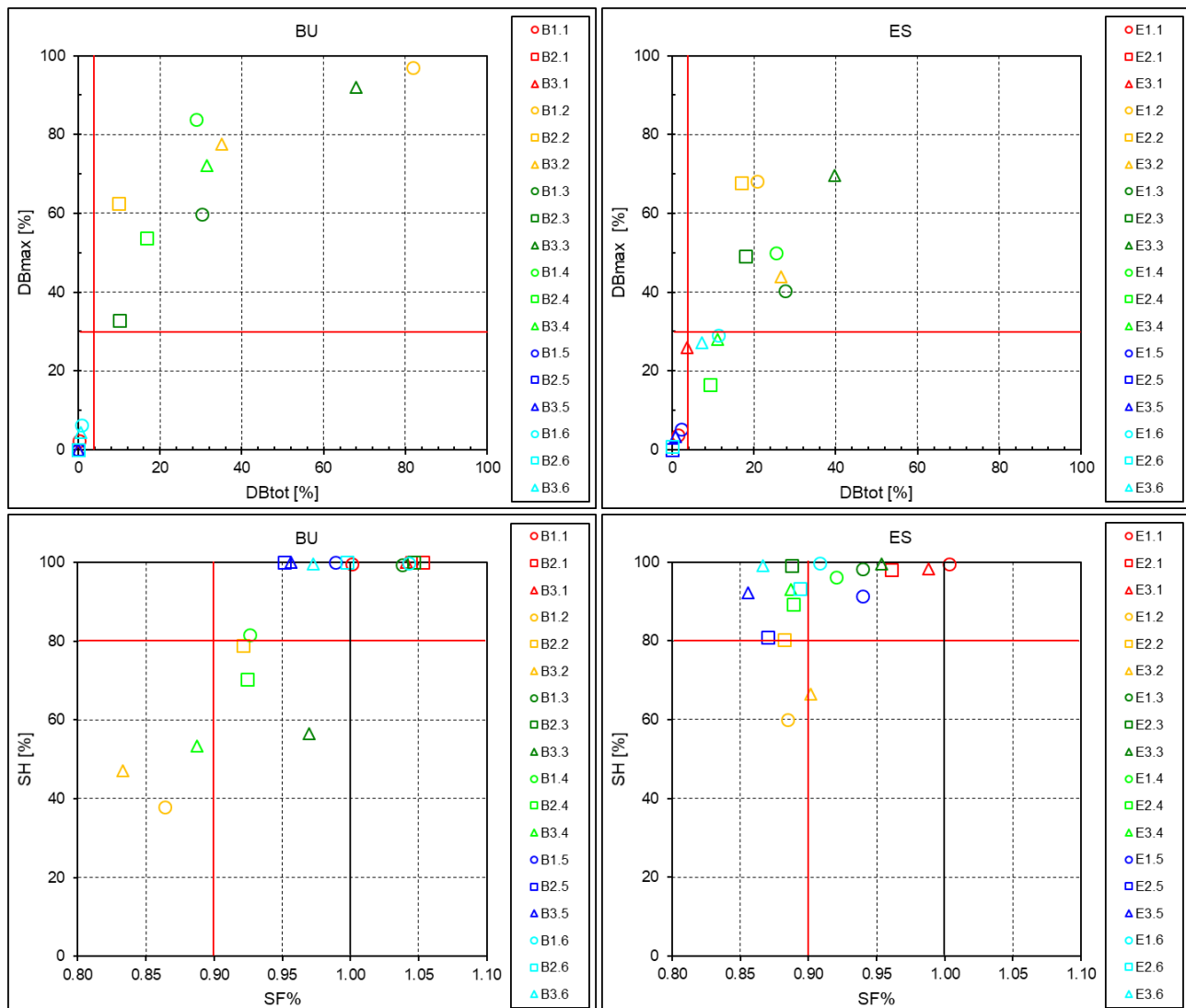
Serie / Holzart	Anzahl Proben	Delaminierung					Blockscherung				
		erfüllt		nicht erfüllt			erfüllt		nicht erfüllt		
				Einzelkriterien					Einzelkriterien		
				nur $D_{tot} \leq 4\%$	nur $D_{max} \leq 30\%$	beide			nur $f_{v,F} \geq 0.9 f_{v,H}$	nur $HB \geq 80\%$	beide
S2/BU	18	9	9	0	0	9	12	6	0	3	3
S3/ES	18	7	11	4	0	7	8	10	8	1	1

Tabelle 13: Überprüfung der Anforderungen bei den einzelnen Proben der Versuchsreihen S2 und S3. Die Erfüllung resp. Nicht-Erfüllung der Anforderungen ist grün oder rot markiert.

Serie Holzart	Parameter	Kriterium	Variante / Prüfkörper																	
			x.1			x.2			x.3			x.4			x.5			x.6		
			1.x	2.x	3.x	1.x	2.x	3.x	1.x	2.x	3.x	1.x	2.x	3.x	1.x	2.x	3.x	1.x	2.x	3.x
S2 BU	Delaminierung B	$D_{tot} \leq 4\%$	0.3	0.0	0.0	81.8	9.9	35.0	30.2	10.1	68.0	28.9	16.7	31.5	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.6
		$D_{max} \leq 30\%$	2.2	0.0	0.0	96.9	62.5	77.5	59.7	32.8	91.9	83.8	53.8	72.2	0.0	0.0	0.0	6.3	0.0	4.4
	Blockscherung (50mm)	$f_{v,F} \geq 0.9 f_{v,H}$	1.00	1.05	1.04	0.86	0.92	0.83	1.04	1.05	0.97	0.93	0.92	0.89	0.99	0.95	0.96	1.04	1.00	0.97
		$HB \geq 80\%$	99.5	100.0	100.0	37.9	78.8	47.1	99.3	100.0	56.4	81.7	70.2	53.3	100.0	100.0	100.0	99.8	100.0	99.5
S3 ES	Delaminierung B	$D_{tot} \leq 4\%$	1.4	0.0	3.7	20.8	17.0	26.7	27.7	17.9	39.7	25.4	9.2	11.1	2.2	0.0	0.9	11.3	0.1	7.2
		$D_{max} \leq 30\%$	3.8	0.0	25.9	68.1	67.8	43.8	40.3	49.1	69.7	50.0	16.6	28.1	5.3	0.0	3.4	29.1	0.9	27.2
	Blockscherung (50mm)	$f_{v,F} \geq 0.9 f_{v,H}$	1.00	0.96	0.99	0.88	0.88	0.90	0.94	0.89	0.95	0.92	0.89	0.89	0.94	0.87	0.86	0.91	0.89	0.87
		$HB \geq 80\%$	99.5	98.1	98.3	60.0	80.2	66.4	98.3	99.0	99.5	96.2	89.3	93.1	91.4	81.0	92.1	99.8	93.3	99.0

Anforderung erfüllt Anforderung nicht erfüllt

Bild 31. Graphische Überprüfung der Anforderungen bei den Proben der Versuchsreihen S2 und S3 anhand der rot eingezeichneten Grenzwerte: Delaminierung (oben) und Blockscherprüfung (unten) bei Buche (links) und Esche (rechts)



4 Schlussfolgerungen

Die Projektergebnisse erlauben die folgenden generellen Schlussfolgerungen:

- Grundsätzlich sind die bei Brettschichtholz aus Nadelholz für die Qualitätskontrolle angewendeten Prüfverfahren (Delaminierungs- und Scherprüfung) auch für Brettschichtholz aus Laubholz geeignet. Vereinzelt sind aber Anpassungen der Prüfparameter an die spezifischen Eigenschaften des Laubholzes notwendig.
- Mit einer geeigneten Verklebungstechnik sind auch bei Laubholz einwandfreie Verklebungen möglich. Die Verklebungsqualität ist aber abhängig vom Klebstoff und den Verklebungsparametern.
- Im Gegensatz zum Nadelholz treten beim Laubholz vermehrt lokale, fatale Fehlverklebungen einzelner Fugen auf. Mit einer Qualitätsprüfung können solche Fehlverklebungen meist rechtzeitig erkannt werden. Deren Ursache bleibt aber oft unklar.
- Die Qualitätsprüfung der Flächenverklebung kann bei Buche und Esche grundsätzlich mit den gleichen Methoden und Anforderungen erfolgen. Gewisse Holzarten-spezifische Unterschiede sind jedoch vorhanden und zu beachten.

4.1 Zielerreichung

Die Hauptziele des Projektes wurden folgendermassen erfüllt:

Ziel 1. Erarbeitung von Grundlagen zur Qualitätskontrolle von BSH aus Laubholz

- Analyse der bestehenden Vorgaben zur Qualitätskontrolle von Flächenverklebungen bei BSH (→ Kapitel 1.2 und 2.1).
- Erfassung der Verklebungsqualität der Flächenverklebung bei Proben aus insgesamt 65 BSH-Querschnitten mit 570 Klebstofffugen aus Laborverklebungen und aus industrieller Produktion (→ Kapitel 2).
- Quantifizierung des aktuellen 'Standes der Technik' bezüglich der Verklebungsqualität bei verschiedenen Holzarten-Klebstoff-Kombinationen (→ Kapitel 3.1).

Ziel 2. Überprüfung der Eignung der (bisher nur für Nadelholz) verwendeten Prüfmethode sowie Definition der Leistungsanforderungen

- Identifizierung von Einflussfaktoren auf die Prüfungsergebnisse (→ Kapitel 3.2).
- Analyse und Vorschlag zur Korrektur des Volumeneinflusses bei der Blockscherprüfung von Buchen- und Eschenproben (→ Kapitel 3.2.8).
- Vorschlag eines Konzeptes zur Festlegung und Überprüfung von Qualitätsanforderungen (→ Kapitel 3.3).

Ziel 3. Bereitstellung von Input für eine zukünftige europäische Produktnorm für BSH aus Laubholz (EN 14080-2).

- Datenbeispiele von parallelen Delaminierungs- und Blockscherprüfungen für die in der Schweiz wichtigen Laubholzarten Buche und Esche (→ Kapitel 3).
- Detaillierte Liste mit Empfehlungen zu berücksichtigenden Punkten bei der Normierung, mit Fokus auf die werkseigene Produktionskontrolle (→ Kapitel 4.3).
- Auflistung von offenen Fragen und zusätzlichem Forschungsbedarf (→ Kapitel 4.4).

4.2 Beantwortung der Forschungsfragen

- Sind die bei BSH aus Nadelholz für die Qualitätskontrolle angewendeten Prüfverfahren (Delaminierungs- und Scherprüfung) grundsätzlich auch für BSH aus Laubholz geeignet?
 - Ja. Beide Prüfverfahren liefern auch bei Laubholz (Buche, Esche) spezifische Informationen über die Qualität von Flächenverklebungen. Zu berücksichtigen sind aber die in Tabelle 12 zusammengestellten Unterschiede der zwei Prüfverfahren.
- Sind Holzarten-spezifische Prüfparameter und Leistungsanforderungen notwendig?
 - Ja. Beim Delaminierungsverfahren ist das unterschiedliche Feuchteverhalten der einzelnen Holzarten zu berücksichtigen (Trocknungszeiten). Bei der Blockscherprüfung ist zu beachten, dass die absoluten Scherfestigkeiten bei Laubholz generell höher sind als bei Nadelholz. Als Folge der höheren Bruchlasten und der damit verbundenen teilweisen Überschreitung der Längsdruckfestigkeit des Holzes wird eine generelle Reduktion der Scherhöhe von 50 mm auf 40 mm empfohlen..
- Delaminierung:
 - Sollte bei der Wahl des Delaminierungsverfahrens die vorgesehene Nutzungsklasse berücksichtigt werden?
 - Nein. Die bisher verwendeten Delaminierungsverfahren bilden ein 'worst case'-Szenario ab und verfügen daher über eine Sicherheitsmarge. Für der Nutzungsklasse angepasste Verfahren fehlen zur Zeit die experimentellen Daten zum Zusammenhang zwischen den Belastungen bei der Delaminierungsprüfung und der Klimabeanspruchung in den verschiedenen Nutzungsklassen.
 - Muss die erhöhte Wasseraufnahme und (verzögerte) Trocknung von Laubholz berücksichtigt werden?
 - Ja. Bei der Definition der Delaminierungszyklen können keine fixen Trocknungszeiten vorgeschrieben werden. Holzarten-spezifische Unterschiede sollen durch ein Trocknungsziel im Bereich von 100-110% der Ausgangsmasse einbezogen werden.
- Scherprüfung:
 - Können (wie bei Nadelholz) die Anforderungen bezüglich Scherfestigkeit und Faserbruchanteil miteinander verknüpft werden?
 - Ja. Es besteht allerdings kein grundsätzlicher Zusammenhang zwischen diesen beiden Qualitätsparametern. Eine Verknüpfung der Anforderungen ist aber sinnvoll, um Proben mit sowohl tiefer Scherfestigkeit als auch tiefem Holzbruchanteil zu erfassen.
 - Sollen (wie bei Nadelholz) Anforderungen sowohl für Einzelfugen als auch Querschnitts-Mittelwerte festgelegt werden?
 - Ja. Dies wird als notwendig erachtet, um sowohl Querschnitte mit einer generell geringen als auch einzelne Klebfugen mit einer ungenügenden Verklebungsqualität auszuschliessen.
 - Ist die in der SN EN 14080 angegebene Korrektur bei einer Abweichung der Höhe (Dicke) der Scherfläche auch für Laubholz gültig?
 - Nein. Die Korrektur ist auch abhängig von der Höhe der Scherfestigkeit und muss daher bei Laubholz angepasst werden.

4.3 Empfehlungen / Input Normierung bezüglich WPK

Basierend auf den Ergebnissen des vorliegenden Projektes wird empfohlen, folgende Punkte bei der Normierung der werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) zu berücksichtigen:

- Als Ziele der WPK sollten explizit definiert werden:
 - Sicherstellung/Überwachung einer gleichbleibenden Verklebungsqualität
 - Erkennung von Fehlverklebungen
- Anmerkung: Wenn auch Ähnlichkeiten zwischen den Prüfverfahren der WPK und den Klebstoffprüfungen bestehen, ist es wichtig, die unterschiedlichen Ziele festzuhalten (Kontrolle der Produktequalität versus Eignungsprüfung für Klebstoffe).
- Grundsätze/Rahmenbedingungen:
 - Aus Konsistenzgründen sollten die Prüfverfahren für Nadelholz und Laubholz möglichst ähnlich sein. Eine Anlehnung an die SN EN 14080 erscheint daher sinnvoll.
 - Die WPK benötigt industrie-taugliche Methoden (Probenherstellung, Prüfverfahren).
 - Die Ergebnisse der WPK sollten innert 24 bis max. 48h vorliegen.
 - Die Probenahme erfolgt aus BSH-Endabschnitten von industriell produzierten BSH-Trägern.
 - Die Qualitätsprüfungen sollten alle Klebfugen eines ganzer BSH-Querschnittes erfassen.
 - Es wird vorausgesetzt, dass die grundsätzliche Eignung der verwendeten Klebstoffe bereits durch Klebstoffprüfungen nachgewiesen ist.
- Testmethoden:
 - Delaminierung und Blockscherprüfung liefern unterschiedliche, sich ergänzende Informationen über die Qualität von Flächenverklebungen. Die Anwendung der zwei Prüfmethoden sollte klarer als in der SN EN 14080 (siehe Tabelle 3) und unter Berücksichtigung der in Tabelle 14 zusammengefassten spezifischen Eigenschaften der zwei Verfahren geregelt werden.
 - Es ist ein Grundsatzentscheid erforderlich, ob NK-abhängige Prüfverfahren und/oder Anforderungen definiert werden sollen.
 - Anpassungen Delaminierung:
 - Es sollte ein Standard-Verfahren festgelegt werden (z.B. Verfahren B aus SN EN 14080) und klar definiert sein, wann davon abgewichen werden soll/kann.
 - Als Trocknungsziel ist immer der Bereich von 100-110% der Ausgangsmasse zu definieren (keine fixen Trocknungszeiten).
 - Anpassungen Blockscherprüfung:
 - Wegen der hohen axialen Druckbelastung wird eine Reduktion der Standard-Scherhöhe von 50 mm auf 40 mm empfohlen.
 - Eine Hilfestellung zur möglichst objektiven Beurteilung des Holzbruch-/Klebstoffbruch-Anteils ist zu entwickeln.
- Anforderungen:
 - Definition von Anforderungswerten für Querschnitts-Mittelwerte und Einzelfugen, um auch einzelne Klebfugen mit einer ungenügenden Verklebungsqualität auszuschliessen
 - Delaminierung:
 - Übernahme der für Verfahren B in EN SN 14080 definierten Anforderungen ($D_{\text{tot}} \leq 4\%$, $D_{\text{max}} \leq 30\%$).
 - Die Definition einer maximalen Fugendelaminierung ($\leq 30\%$) ist zwingend.
 - Auf zusätzliche Prüfzyklen bei Nicht-Erfüllung nach dem ersten Zyklus soll verzichtet werden.
 - Blockscherprüfung:
 - Definition und Verwendung einer 'relativen' Fugenfestigkeit (Scherfestigkeit der Klebfugen in Prozent der Scherfestigkeit des Holzes).
 - Allenfalls Einführung eines zusätzlichen Ausschlusskriteriums für Proben mit sowohl tiefer Scherfestigkeit als auch tiefem Holzbruchanteil (wie bei bestehenden Anforderungen in SN EN 14080).

Tabelle 14: Gegenüberstellung der Eigenschaften von Delaminierung und Block-Scherprüfung

	Delaminierung	Block-Scherprüfung
Belastung	<ul style="list-style-type: none"> Beanspruchung durch Klimabelastung → Fugenbeständigkeit Querbeanspruchung der Klebfugen durch Schwinden/Quellen 	<ul style="list-style-type: none"> ähnlich mechanischer Belastungssituation als Bauteil (Schub) → Fugenfestigkeit Scherbelastung längs der Klebfugen
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> Einbezug ganzer BSH-Querschnitt (Trocknungs- spannungen abhängig vom effektiven Trägeraufbau) Einbezug Klimabelastung einfache Probenherstellung 	<ul style="list-style-type: none"> Prüfergebnisse innert Stunden (schneller als mit Delaminierung) auch für Zustandserfassung geeignet (z.B. Bohrkerne) ergibt Information über mechanische Festigkeit der Klebfuge (bei breiten Querschnitten unterteilt in Teilsegmente) Erfassung von 2 Messgrössen/Aspekten (Festigkeit, Adhäsion Klebstoff)
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> Prüfergebnisse erst nach ≥ 1 Arbeitstag Erkennbarkeit offene Klebfugen hängt von Trocknungszustand (Feuchtegradient) ab unrealistisch grosser Klimastress (worst-case, unklarer Bezug zu Nutzungsklassen) Kriterien zur Auswahl von 1 der 3 Verfahren (A, B, C) sind unklar Risse im Holz können Ergebnis beeinflussen (Entlastung der Klebfugen) Energieverbrauch 	<ul style="list-style-type: none"> Ergebnisse abhängig von Prüfeinrichtung Grenzwerte Festigkeit abhängig von Holzfestigkeit (muss daher bekannt sein) Aufteilung BSH-Querschnitt notwendig Prüfung standardmässig ohne Klimastress schwierige Quantifizierung Holzfaserbelag (abhängig von Klebstoff)

4.4 Offene Fragen / Weiterer Forschungsbedarf

Basierend auf den Erkenntnissen aus dem vorliegenden Projekt ergeben sich im Zusammenhang mit der Qualitätskontrolle der Flächenverklebung von BSH aus Laubholz folgende offenen Fragen:

- Die Datengrundlage zur Festlegung von Anforderungswerten für Einzelfugen bei der Blockscherprüfung ist noch ungenügend (siehe Kapitel 3.3). Dazu sollten noch weitere Erfahrungen gesammelt werden. Hilfreich wäre es, die Herleitung der in der SN EN 14080 festgelegten relativ komplexen Regeln für die Anforderungswerte bei Nadelholz zu kennen.
- Gegenüber Nadelholz scheinen bei Laubholz häufiger lokale, extreme Fehlverklebungen aufzutreten. Deren Ursachen sind oft unklar und schwer nachvollziehbar. Dafür sollten ein standardisiertes Vorgehen und verbesserte Methoden zur Untersuchung der Ursachen von Fehlverklebungen entwickelt werden.
- Die aktuelle Regelung der Zuweisung von Prüfmethoden in Abhängigkeit von der Nutzungsklasse ist nicht eindeutig (siehe Kapitel 2.1). Für BSH aus Laubholz sollte diesbezüglich eine klare Regelung definiert werden. Zu überlegen wäre, ob allenfalls auch NK-abhängige Anforderungen sinnvoll/möglich wären. Hierzu fehlen aber gegenwärtig noch die Grundlagen und Erfahrungen.
- Die Qualitätsprüfungen im Rahmen der WPK ergeben primär einen Hinweis auf die Verklebungsqualität unmittelbar nach der Produktion. Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der WPK und der Dauerhaftigkeit resp. dem Langzeitverhalten der Verklebung fehlen bis anhin.

Literatur

(sortiert nach Erstautor und Jahr)

- Abplanalp B. 2017. Laubhölzer im modernen Ingenieur-Holzbau. Referat Statusseminar S-WIN 'Neue Anwendungen für Holz', Dübendorf, 10. April 2017.
- Aicher S., Ohnesorge D. 2011. Shear strength of glued laminated timber made from European beech timber. Eur. J. Wood Prod. 69:143–154.
- Aicher S. 2014. Laubholzprodukte und -anwendungen im Bauwesen - Aktueller Stand in Europa. 20. Internationales Holzbau-Forum IHF.
- Aicher S., Ahmad Z., Hirsch M. 2018. Bondline shear strength and wood failure of European and tropical hardwood glulams. Eur. J. Wood Prod. 76:1205–1222.
- Blumer H. 2010. Möglichkeiten und Grenzen von Laubholz als Baumaterial. Referat Infoveranstaltung Laubholz, Olten, 29. September 2010.
- Dietsch P., Tannert T. 2015. Assessing the integrity of glued-laminated timber elements. Construction and Building Materials 101:1259–1270.
- Ehrhart T., Steiger R., Lehmann M., Frangi A. 2019. European beech (*Fagus sylvatica* L.) glued laminated timber: lamination strength grading, production and mechanical properties. In: J. W. van de Kuilen & W. Gard (Eds.), 7th International scientific conference on hardwood processing (ISCHP 2019), proceedings pp. 252–267, TU Delft.
- Empa, BFH-AHB, Bafu 2013. Zustandserfassung und Verstärkung von Brettschichtholz. Workshop-Dokumentation Aktionsplan Holz.
- Franke B., Scharmacher F., Müller A. 2014. Assessment of the glue-line quality in glued laminated timber structures. In: S. Aicher et al. (eds.), Materials and Joints in Timber Structures, RILEM Bookseries 9, Springer.
- Gaspar F., Cruz H., Gomes A. 2018. Evaluation of glue line shear strength of laminated timber structures using block and core type specimens. Eur. J. Wood Prod. 76:413–425.
- Lehmann M., Clerc G., Lehringer C., Strahm T., Volkmer T. 2018. Investigation of the bond quality and the finger joint strength of Beech glulam. In: World Conference on Timber Engineering, Aug. 20–23, Seoul.
- Knorz M. et al. 2014. Structural bonding of ash (*Fraxinus excelsior* L.): resistance to delamination and performance in shearing tests. Eur. J. Wood Prod. 72:297–309.
- Konnerth J. et al. 2016. Survey of selected adhesive bonding properties of nine European softwood and hardwood species. Eur. J. Wood Prod. 74:809–819.
- Künniger T. 2007. Automatische Bestimmung des prozentualen Faserbruchanteils bei der industriellen Klebfestigkeitsprüfung. Schlussbericht WHFF-Projekt Nr. 2006.05.
- Rubick A., Linsenmann P. 2017. EU-Hardwoods: European Hardwoods for the Building Sector. WoodWisdom-Net Seminar, Edinburgh, 4–5 April 2017.
- Steiger R., Risi W. 2009. Qualitätssicherung von Brettschichtholz: Optimierte Prüfmethode zur Kontrolle der Scherfestigkeit von Klebfugen. Schlussbericht WHFF-Projekt Nr. 2007.04.
- Steiger R., Gehri E., Richter K. 2010. Quality control of glulam: Shear testing of bondlines. Eur. J. Wood Prod. 68(3):243–256.
- Steiger R., Risi W. 2011. Qualitätskontrolle von Brettschichtholz: Vergleich der Prüfverfahren „Blockschertest“ und „Delaminierungstest“. Schlussbericht WHFF-Projekt Nr. 2009.16.
- Steiger R., Frangi A., Kobel P. 2013. Brettschichtholz aus Laubholz: Marktimplementierung als Bauprodukt. Schlussbericht WHFF-Projekt Nr. 2011.17.

- Steiger R., Franke S., Frangi A. 2014a. Brettschichtholz aus Buche und Verbindungen in Buchen-Brettschichtholz. Workshops zur Erhebung des aktuellen Wissensstandes in Deutschland, Österreich und der Schweiz. Projektbericht Bafu/Aktionsplan Holz.
- Steiger R., Arnold M., Risi W. 2014b. Integrity check of structural softwood glue lines: correspondence between delamination and block shear tests. Eur. J. Wood Prod. 72:735–748.
- Steiger R. 2019. Forschungsprojekt BSH aus Buchenholz: Motivation zum Projekt, Projektziele, Projektpartner. 51. Fortbildungskurs S-WIN, Hochleistungswerkstoffe im Holzbau, 22./23. Oktober 2019, Weinfelden.

Normen

- ANSI A190.1:2017. Standard for Wood Products - Structural Glued Laminated Timber. APA - The Engineered Wood Association, Tacoma.
- EN 14080-2 (Normierungsvorhaben). Holzbauwerke — Brettschichtholz aus Laubholz — Anforderungen (CEN/TC 124, NA 005-04-01-04 AK N 580: 2018-11-30)
- SIA 269/5:2011. Erhaltung von Tragwerken - Holzbau
- SN EN 14080:2013. Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen
- SN EN 1995-1-1:2004. Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau

Abkürzungen

AP	Arbeitspaket
BSH	Brettschichtholz
BU	Buche
CE	Conformité Européenne
CEN	Europäisches Komitee für Normung
EI	Eiche
EN	Europäische Norm
ES	Esche
ETA	European Technical Assessment
FI	Fichte
FPC	Factory Production Control (=WPK)
ITT	Initial Type Testing (=Erstprüfung)
LH	Laubholz
MF	Melamin-Formaldehyd Klebstoff
MUF	Melamin-Harnstoff-Formaldehyd Klebstoff
MW	(arithmetischer) Mittelwert
NH	Nadelholz
NK	Nutzungsklasse gemäss SN EN 1995-1-1:2004
PUR	Polyurethan Klebstoff
RF	Resorcin-Formaldehyd Klebstoff
RH	relative Luftfeuchte (relative humidity)
SIA	Schweizer Ingenieur- und Architektenverein
TC	Technisches Komitee
TG	Taskgruppe
UF	Harnstoff-Formaldehyd Klebstoff
WG	Arbeitsgruppe
WHFF	Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung
WPK	werkseigene Produktionskontrolle

Anhang

Anhang 1: Übersicht Probenmaterial

Serie	Proben	Holzart	Klebstoff	Lamellen		Anzahl		Delaminierung mit Verfahren			Blockscherprüfung (xx = Probenhöhe [mm])									Fugen- dicke																																																																																																													
				Breite [mm]	Dicke [mm]	Fugen	Streifen	B	C	X	Klebfuge (Fxx)																																																																																																																						
											F50	F45	F40	F35	F26	F25	L50	L45	L40		L26																																																																																																												
S1	55-3	BU	PUR	160	25	15	1-3	X	X			LMR		L-R		L-R		LMR																																																																																																															
	55-6a			X	X					LMR		L-R		L-R		LMR																																																																																																																	
	55-6b			X	X					LMR		L-R		L-R		LMR																																																																																																																	
	55-7			X	X					LMR		L-R		L-R		LMR																																																																																																																	
	55-1a			X				X																																																																																																																									
	55-2a			X				X																																																																																																																									
	55-4			X				X																																																																																																																									
	55-5			X				X	LMR																																																																																																																								
	55-1b			X																																																																																																																													
S2	55-2b							X																																																																																																																									
	B1.1 - B3.6							X		X	LMR		LMR		LMR		LMR		L-R																																																																																																														
	E1.1 - E3.6																																																																																																																																
	11							X		X	LMR																																																																																																																						
	14							X			LMR																																																																																																																						
	15							X		X	LMR																																																																																																																						
	16																																																																																																																																
	17									X				LMR																																																																																																																			
	19								X					LMR																																																																																																																			
S3	20	ES			180	40	8	3	X																																																																																																																								
	23																			L-R																																																																																																													
	21																																			LMR																																																																																													

Hauptvarianten

LMR verfügbare Probestreifen aus BSH-Querschnitt: Links, Mitte, Rechts

Anhang 2: Beispiele Zustand Probenquerschnitte nach Delaminierung

Versuchsreihe S1

Verfahren B

Probe: **55-6b** Holzart: BU Verklebung: PUR



Delam_{tot}: 9.3%, Delam_{max}: 50.0%

Verfahren C

Querschnitt: 160 x 400 mm, Lamellendicke 25 mm



Delam_{tot}: 6.3%, Delam_{max}: 44.4%

Verfahren **B**Probe: **55-5** Holzart: BU Verklebung: PURDelam_{tot}: 5.1%, Delam_{max}: 69.1%Verfahren **X**

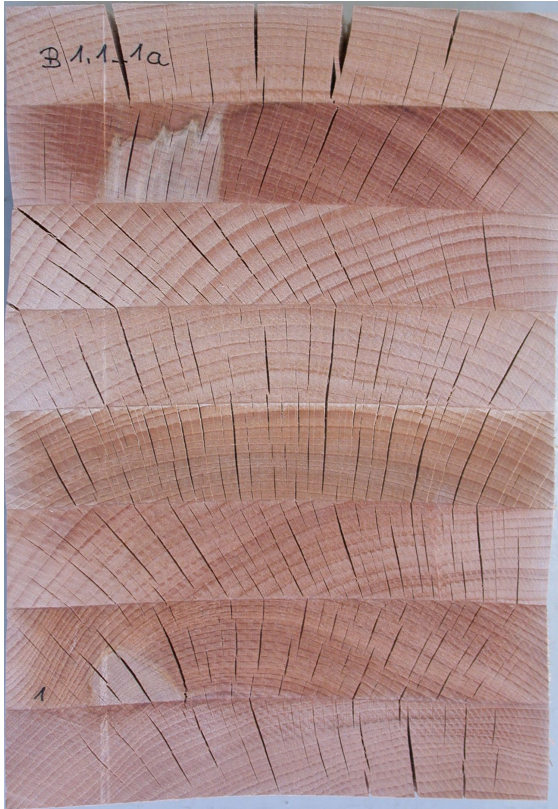
Querschnitt: 160 x 400 mm, Lamellendicke 25 mm

Delam_{tot}: 6.2%, Delam_{max}: 87.5%

Versuchsreihe S2

Verfahren B

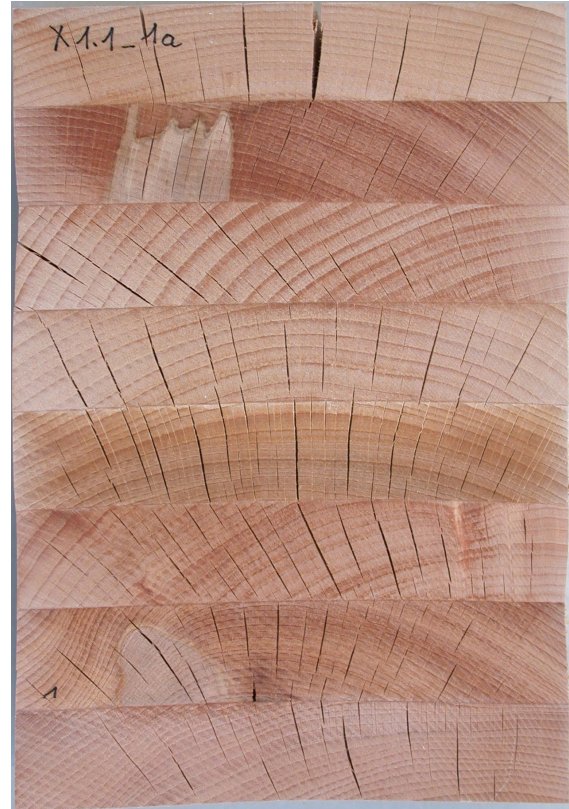
Probe: **B1.1** Holzart: BU Verklebung: PUR



Delam_{tot}: 0.3%, Delam_{max}: 2.2%

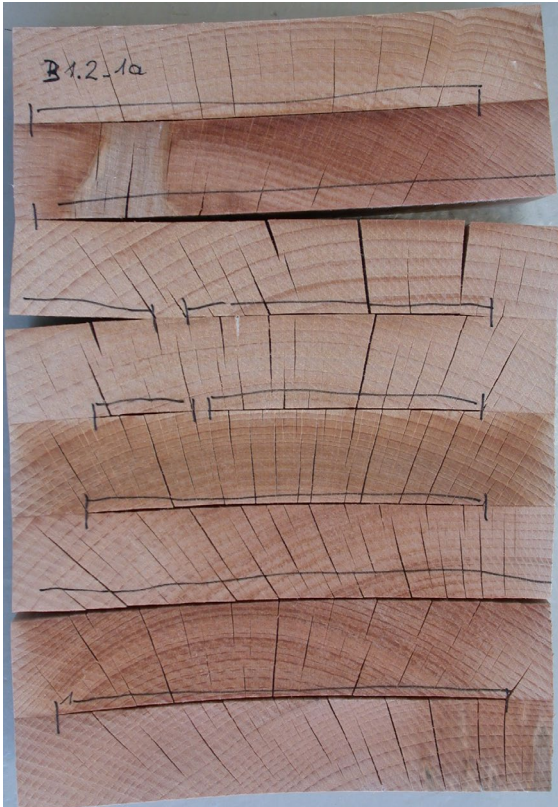
Verfahren X

Querschnitt: 160 x 240 mm, Lamellendicke 30 mm



Delam_{tot}: 1.1%, Delam_{max}: 7.8%

Probe: **B1.2** Holzart: BU Verklebung: PUR-



Delam_{tot}: 81.8%, Delam_{max}: 96.9%

Querschnitt: 160 x 240 mm, Lamellendicke 30 mm



Delam_{tot}: 71.5%, Delam_{max}: 95.0%

Versuchsreihe S3

Verfahren B

Probe: **E1.1** Holzart: ES Verklebung: PUR



Delam_{tot}: 1.4%, Delam_{max}: 3.8%

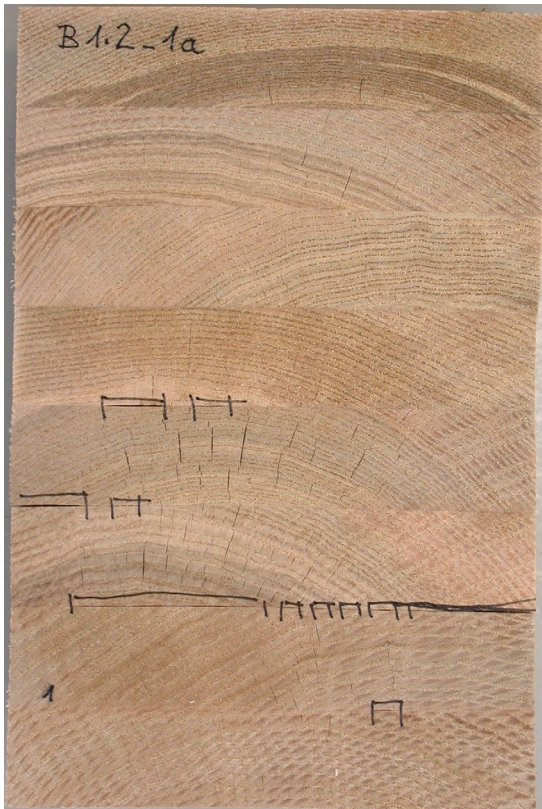
Verfahren X

Querschnitt: 160 x 240 mm, Lamellendicke 30 mm



Delam_{tot}: 4.5%, Delam_{max}: 14.7%

Probe: **E1.2** Holzart: ES Verklebung: PUR-



Delam_{tot}: 20.8%, Delam_{max}: 68.1%

Querschnitt: 160 x 240 mm, Lamellendicke 30 mm



Delam_{tot}: 53.8%, Delam_{max}: 81.3%

Versuchsreihe S4Verfahren **B**Probe: **15**

Holzart: BU

Verklebung: PRF

Delam_{tot}: 0.4%, Delam_{max}: 1.2%Verfahren **X**

Querschnitt: 160 x 205 mm, Lamellendicke 30 mm

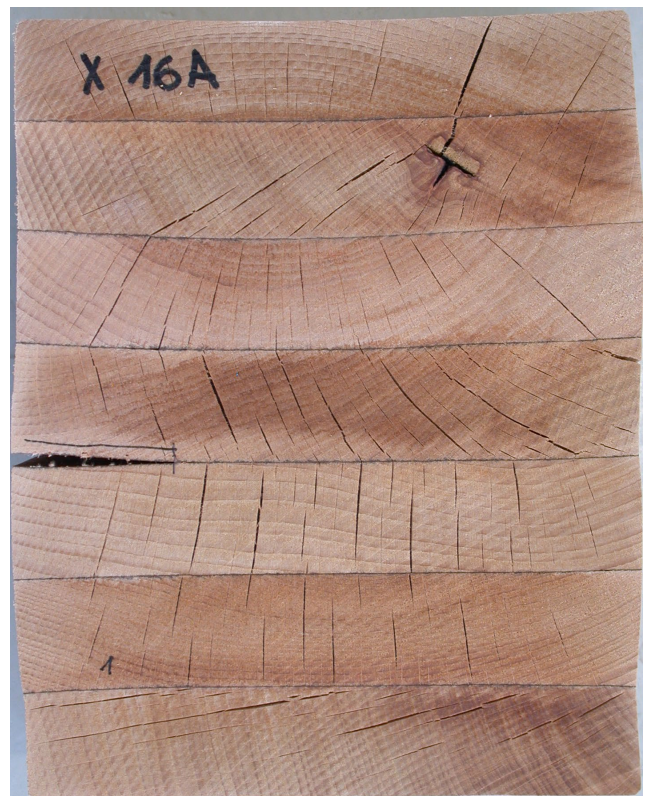
Delam_{tot}: 1.6%, Delam_{max}: 7.8%Probe: **16**

Holzart: BU

Verklebung: PRF

Delam_{tot}: 0%, Delam_{max}: 0%

Querschnitt: 160 x 205 mm, Lamellendicke 30 m

Delam_{tot}: 3.5%, Delam_{max}: 21.1%

Versuchsreihe S5Verfahren **B**Probe: **4**

Holzart: ES

Verklebung: MUF

Delam_{tot}: 85.2%, Delam_{max}: 100%Verfahren **C**

Querschnitt: 140 x 360 mm, Lamellendicke 41 mm

Delam_{tot}: 40.1%, Delam_{max}: 71.8%