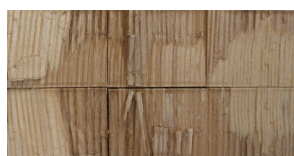
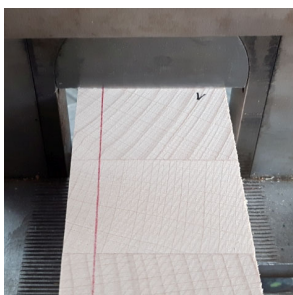
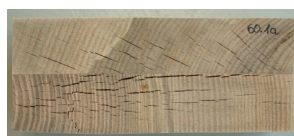
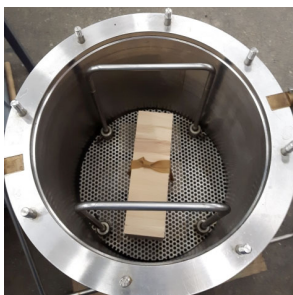
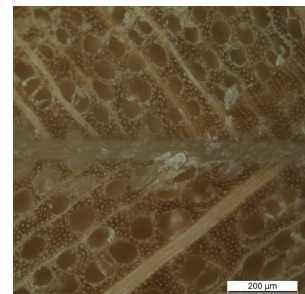
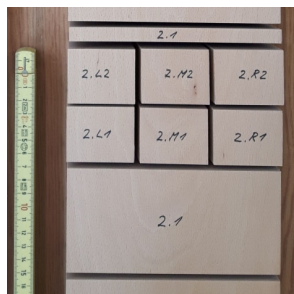
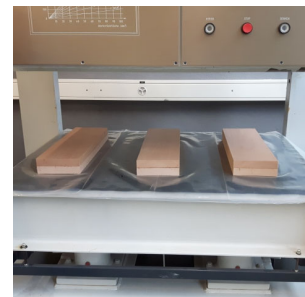
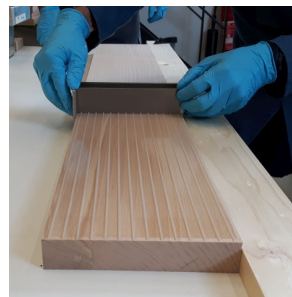


WHFF-Projekt Nr. 2019.02

Robustheit von Laubholz-Verklebungen

(RobKleb)

Wissenschaftlicher Schlussbericht



Martin Arnold, Walter Risi

Danksagung

Die engagierte Mitarbeit folgender Personen wird herzlich verdankt:

- Daniel Heer: Bereitstellung Lamellen, Mithilfe Verklebung, Zuschnitt Prüfkörper
- Anja Huch: Messung Klebfugendicke

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 Projektgrundlagen	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	8
1.3.1 Ziele	8
1.3.2 Forschungsfragen	8
1.3.3 Bedeutung des Projektes für Forschung und Praxis	8
1.3.4 Thematische Eingliederung in die Schwerpunkte des WHFF	8
1.3.5 Projektorganisation	8
1.3.6 Arbeitsprogramm	9
1.3.7 Zeitplan	10
2 Robustheit im Kontext der Holzverklebung	12
2.1 Definition	12
2.2 Robustheitsfaktoren und Qualitätsmerkmale	13
2.3 Beurteilung und Quantifizierung der Robustheit	13
3 Material und Methoden	17
3.1 Pilotversuche	17
3.1.1 Versuchsserien	17
3.1.2 Probenmaterial / Verklebung	19
3.1.3 Methoden	22
3.1.3.1 Klebfugendicke	22
3.1.3.2 Delaminierung	23
3.1.3.3 Blockscherprüfung	23
3.1.4 Datenauswertung	24
3.2 Ergänzende Literaturdaten	25
4 Ergebnisse	26
4.1 Pilotversuche	26
4.2 Beispiele aus Literaturdaten	31
4.2.1 L1 (Arnold et al. 2019)	31
4.2.2 L2 (Frühwald et al. 2003)	34
4.2.3 L3 (Schmidt et al. 2010)	35
4.2.4 L4 (Ammann et al. 2016)	37
4.2.5 L5 (Luedtke et al. 2015)	39
4.2.6 L6 (Jiang et al. 2014)	41
5 Schlussfolgerungen	44
5.1 Beantwortung der Forschungsfragen	44
5.2 Zielerreichung	45
5.3 Umsetzung	46
5.4 Offene Fragen / Weiterer Forschungsbedarf	46

Literatur	48
Normen	48
Abkürzungen.....	49
Anhang	50
Anhang 1: Pilotversuche - Übersicht Versuchsvarianten.....	51
Anhang 2: Pilotversuche - Datentabellen.....	52
Anhang 3: Gesamtüberblick verfügbare Daten / Robustheits-Beispiele	55

Zusammenfassung

Das Projekt untersucht den Einbezug von Kriterien der **Robustheit** zur Qualitätsbeurteilung bei der Holzverklebung, als Alternative zu einer engen Steuerung des Verklebungsprozesses respektive zur Einschränkung der Nutzungsbedingungen von verklebten Produkten. Robustheit wird im Kontext der Holzverklebung spezifisch definiert und mit einem neuartigen Untersuchungskonzept demonstriert, indem die Grenzen der Verklebungsqualität durch gezielte Abweichungen von den Verarbeitungsrichtlinien ausgelotet werden. In der Umsetzung eröffnet dieses Vorgehen neue Ansätze für Optimierungen der Laubholz-Verklebung.

Projektziele

Das Projekt verfolgte folgende Ziele:

- Definition von Robustheit im Kontext der Holzverklebung
- Erarbeitung eines Konzeptes zur Quantifizierung der Robustheit bezüglich:
 - Verklebungsprozess: Änderung der Verklebungsqualität bei einer gezielten Verletzung der Verarbeitungsrichtlinien der Klebstoffhersteller (Technische Merkblätter)
 - Langzeitverhalten: Sensitivität bezüglich Last- und Klimaschwankungen, manifestiert in Kriechverformungen oder als Delaminierung von Klebfugen
- Identifizierung und Quantifizierung von relevanten Einflussfaktoren
- Demonstration des Konzeptes bezüglich Verklebungsqualität anhand von Pilotuntersuchungen (ausgewählte Fallbeispiele mit Flächenverklebung)
- Initiierung von nachfolgenden Industrieprojekten

Vorgehensweise

Ausgangspunkt für die Projektarbeiten ist eine spezifische Definition von Robustheit im Kontext der Holzverklebung, verbunden mit der Entwicklung eines entsprechenden Auswertungskonzeptes. Eine umfassende Quantifizierung der Robustheit des Verklebungsprozesses und des Langzeitverhaltens erfordert allerdings sehr umfangreiche Versuchsdaten, welche weit über den Rahmen des vorliegenden Projektes hinausgehen. Daher zielte das Projekt darauf ab, anhand von ausgewählten Pilotversuchen ein mögliches Untersuchungskonzept vorzuschlagen und zu testen. Dieses Konzept wurde ergänzend auch auf bereits publizierte Ergebnisse aus anderen Forschungsprojekten angewendet. Der Fokus lag dabei auf Beispielen für den Verklebungsprozess. Fragestellungen bezüglich Langzeitverhalten könnten mit analogen Ansätzen untersucht werden.

Ergebnisse

Die wichtigsten Schlussfolgerungen sind:

- Der Einbezug von 'Robustheit' als Qualitätskriterium bei der Entwicklung und Auswahl von Klebstoffen könnte zu einem verbesserten Verständnis der Laubholzverklebung und einer zuverlässigen, konstanten Verklebungsqualität beitragen. Dieser Ansatz wird vorgeschlagen als Ergänzung respektive Alternative zu einer engen Steuerung des Verklebungsprozesses. Damit könnte der Rahmen für die Herstellungs- und Nutzungsbedingungen von verklebten Produkten gezielter formuliert und neue Ansätze für Optimierungen der Laubholz-Verklebung entwickelt werden.
- Robustheit ist dabei nicht gleichzusetzen mit höchster Performance, sondern mit stabiler Verklebungsqualität als Folge einer möglichst geringen Sensitivität der Klebstoffe und der verklebten Produkte gegenüber abweichenden oder wechselnden Produktions- und Nutzungsbedingungen. Das Ziel ist eine verbesserte und Produkte-spezifische Beschreibung der Klebstoffe und der verklebten Produkte, mit einer Unterscheidung in kritische und eher tolerante Verklebungsparameter. Dazu gehört im Hinblick auf zukünftig sich ändernde Holzsortimente insbesondere auch die Eignung für verschiedene (Laub-)Holzarten.

- Effekte von Einflussfaktoren sind immer abhängig von den spezifischen Materialkombinationen und daher sollten Generalisierungen nur mit Vorsicht vorgenommen werden.
- Um Unterschiede bei den vorgeschlagenen Robustheits-Kenngrössen richtig zu interpretieren, sollten die untersuchten Effekte immer anhand der absoluten Messdaten eingeordnet werden. Dadurch kann verhindert werden, dass absolut gesehen geringe Effekte, welche aber Robustheits-Unterschiede zeigen, überbewertet werden.
- Die untenstehende Tabelle zeigt das entwickelte Deklarationsraster zur Beurteilung und Quantifizierung der Robustheit von Laubholz-Verklebungen. Dieses Raster kann als Basis dienen für eine umfassende Beurteilung von Klebstoffen respektive verklebten Holzprodukten entsprechend ihrer Robustheit bezüglich verschiedener Einflussgrössen.

Bereich	Robustheits-Ziel	Komponenten	(mögliche) Einflussgrössen	Robustheits-Bewertung
Verklebungsprozess (Herstellung)	konstante Verklebungsqualität resp. Minimierung von Fehlverklebungen	Fügeteile	- Holzart - Holzqualität, Dichte - Lamellendicke - Jahrring-Stellung - Holzfeuchte - Holzoberfläche (Struktur, Qualität, Alter)	verbale Beschreibung oder Klassierungs-Schema (Bewertungen gemäss Kap. 2.3 sowie Beispielen in Kap. 4)
		Klebstoff	- Klebstofftyp/-produkte - Klebstoffeigenschaften (z.B. Viskosität) - Adhäsionsvermögen - Feuchte-/Temperatur-Verhalten	
		Verklebungsprozess	- Auftragsmenge - Pressdruck - Temperatur - Timing (offene/geschlossene Zeit, Presszeit)	
		Verbindungstyp	- Flächenverklebung / Keilzinkung - Ausbildung Klebfuge (Klebfugendicke, Formschluss)	
Langzeitverhalten (Nutzungsphase)	Unempfindlichkeit gegenüber Nutzungseinflüssen	Klebfugenintegrität	- Verklebungsparameter - Lasteinwirkungen - Klimabeanspruchung (Nutzungsklasse) - Alterung	
		Kriechen	- Verklebungsparameter - Lasteinwirkungen - Temperatur-/Feuchteeinfluss (saisonale Effekte)	

1 Projektgrundlagen

1.1 Hintergrund

Die Verklebung ist eine Schlüsseltechnologie im modernen Holzbau. Für eine erfolgreiche praktische Nutzung ist aber nicht nur die (mechanische) Leistungsfähigkeit der Klebverbindungen ausschlaggebend, sondern ebenso deren Zuverlässigkeit, Dauerhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit. Insbesondere bei der Verklebung von Laubholz fehlen jedoch bisher umfassende Untersuchungen und Langzeiterfahrungen bezüglich Zuverlässigkeit und Dauerhaftigkeit. Der damit verbundene Begriff der **Robustheit** ist eine wichtige Planungs- und Entscheidungsgrundlage im Ingenieur-Holzbau [SIA 260, Sørensen 2010], welcher mit diesem Projekt auch in der Holzverklebung eingeführt werden soll.

Unter Robustheit versteht man im Allgemeinen die relative Unempfindlichkeit von Materialien oder Systemen gegenüber wechselnden Produktions- und Nutzungsbedingungen. Robustheit hat in verschiedenen Fachbereichen jedoch meist eine spezifische Bedeutung. Im Kontext der Holzverklebung wurde der Begriff bisher kaum verwendet. Robustheits-Konzepte scheinen hier besonders gut anwendbar in den Bereichen **Verklebungsqualität** und **Langzeitverhalten**. Bezüglich Verklebungsqualität kann damit die Unempfindlichkeit des Verklebungsprozesses gegenüber Abweichungen von Standardbedingungen beschrieben werden, mit dem Ziel, Fehlverklebungen zu minimieren. Beim Langzeitverhalten steht die Sensitivität bezüglich Last- und Klimaschwankungen im Vordergrund, welche sich als Kriechverformung oder als Delaminierung von Klebfugen zeigt.

Der Einbezug der Robustheit als Qualitätskriterium bei der Entwicklung und Auswahl von Klebstoffen als Alternative zu einer engen Steuerung des Verklebungsprozesses respektive zur Einschränkung der Nutzungsbedingungen von verklebten Produkten bietet neue Ansätze für Optimierungen der Laubholz-Verklebung. Die Idee basiert auf Erkenntnissen aus dem kürzlich abgeschlossenen WHFF-Projekt 2017.18 'Qualitätskontrolle der Flächenverklebung bei Brettschichtholz aus Laubholz' [Arnold 2019]. Zum einen traten dort bei einzelnen Klebstoffen auch bei kontrollierten Labor-Verklebungen unerklärliche, lokale Fehlverklebungen auf, und zum anderen ergaben sich Hinweise auf eine stark unterschiedliche Empfindlichkeit der Klebstoffe gegenüber Abweichungen von den Verarbeitungsrichtlinien der Klebstoffhersteller (siehe Kapitel 1.2.2).

Diese Beobachtungen führten zum Ansatzpunkt des vorgeschlagenen Projektes: Anstelle einer möglichst engen Definition des Verklebungsprozesses werden die Grenzen der Verklebungsqualität durch eine weite Variation der Verklebungsparameter (d.h. Abweichung von den Verarbeitungsrichtlinien der Klebstoffhersteller) bis hin zu provozierten Fehlverklebungen ausgelotet. Damit sollen die Robustheit des Verklebungsprozesses quantifiziert und die möglichen Ursachen von Fehlverklebungen bei einzelnen Klebstoffen besser untersucht und verstanden werden. Es wird angenommen, dass bei verschiedenen Klebstoffen jeweils ganz unterschiedliche, spezifische Parameter ausschlaggebend sind. Die Robustheit bezüglich Langzeitverhalten kann mit analogen Ansätzen untersucht werden. Entsprechende Versuche sollen konzeptionell vorbereitet und in nachfolgenden Projekten durchgeführt werden.

1.2 Aktueller Wissensstand

1.2.1 Nationaler und internationaler Stand des Wissens

Dem Projektteam ist keine frühere Verwendung des vorgeschlagenen Robustheits-Konzeptes in der Holzverklebung bekannt. Inwieweit Klebstoffhersteller im Rahmen ihrer Parameterstudien zur Definition ihrer Verarbeitungsrichtlinien ähnliche Robustheits-Ansätze verfolgen, ist ebenfalls nicht bekannt. Die Ergebnisse solcher Untersuchungen werden als proprietäres Wissen in der Regel nicht veröffentlicht. Selbst im allgemeinen Themengebiet von Adhäsion und Verklebung taucht der Begriff Robustheit nur selten auf [Yao 2007, Spangenberg 2018, da Silva 2018].

1.2.2 Forschungsarbeiten und Wissen an der Empa

Die Verklebung ist einer der Forschungsschwerpunkte der neu gebildeten gemeinsamen Arbeitsgruppe WoodTec an der Empa, in der Abteilung Cellulose & Wood Materials und der Professur Wood Materials Science (D-BAUG) an der ETH Zürich unter der Leitung von Prof. Ingo Burgert. Das Ziel der Forschungsaktivitäten ist die Entwicklung von fortgeschrittenen Konzepten in der Holzverklebung für innovative und zuverlässige Holzbaustoffe (engineered wood products). Ein wichtiger Baustein dazu sind Untersuchungen zur Verklebungsqualität.

Kürzlich wurde durch diese Arbeitsgruppe das WHFF-Projekt 2017.18 'Qualitätskontrolle der Flächenverklebung bei Brettschichtholz aus Laubholz' bearbeitet [Arnold 2019]. Das Ziel dieses Projektes lag nicht wie im vorliegenden Fall in der Optimierung der Verklebung, sondern bei der Erarbeitung der bisher fehlenden Grundlagen zur Qualitätskontrolle der Flächenverklebung von Brettschichtholz aus Laubholz (z.B. für die werkseigene Produktionskontrolle bei regulierten Bauprodukten).

Hinsichtlich der Verklebungsqualität ergaben sich aus diesem Projekt jedoch zwei wichtige Erkenntnisse, welche im Zusammenhang mit der Robustheit von Bedeutung sind:

- 1) Eine angepasste Verklebungstechnik vorausgesetzt, sind gute Verklebungen auch bei Laubholz möglich. Im Vergleich zu den Erfahrungen mit Nadelholz sind jedoch häufiger lokale, extreme Fehlverklebungen zu beobachten (Bild 1). Deren Ursachen sind oft unklar und schwer nachvollziehbar.
- 2) Klebstoffe sind gegenüber einer Abweichung von den Anwendungsvorgaben der Hersteller sehr unterschiedlich empfindlich. Während bei gewissen Klebstoffen schon kleine Abweichungen zu Fehlverklebungen führen, scheinen andere Klebstoffe diesbezüglich relativ unempfindlich zu sein (Bilder 2-3).

Bild 1. Lokal extreme Delaminierungen in Brettschichtholz aus Buche (Verklebung PUR): Betroffen sind 2 von 7 Klebstoffugen.

Delaminierung (EN 14080, Verfahren B) total=16.7% / max=53.8%

Vorderseite (a)

Rückseite (b)



Bild 2. Einfluss von Verklebungsparametern auf die Verklebungsqualität bei Buche (Verklebung PUR): Fehlverklebung bei hoher Auftragsmenge (Probe G), Verbesserung bei vorgängiger Befeuchtung der Holzoberfläche (Probe O) [Holzfeuchte 8-10%].

Legende: IB B = intakte Klebfugenlänge [%] nach Delaminierung (EN 14080 Verfahren B), HB50=Holzbruchanteil [%] bei Blockscherprüfung mit Probenhöhe 50mm, SF50= Blockscherfestigkeit [N/mm²] bei Probenhöhe 50mm.

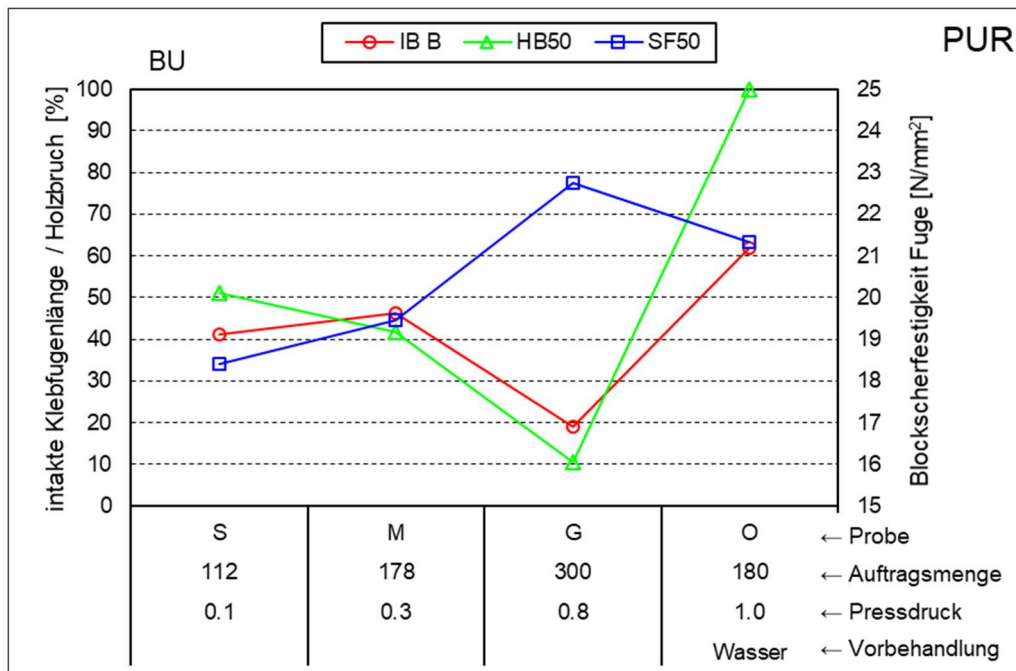
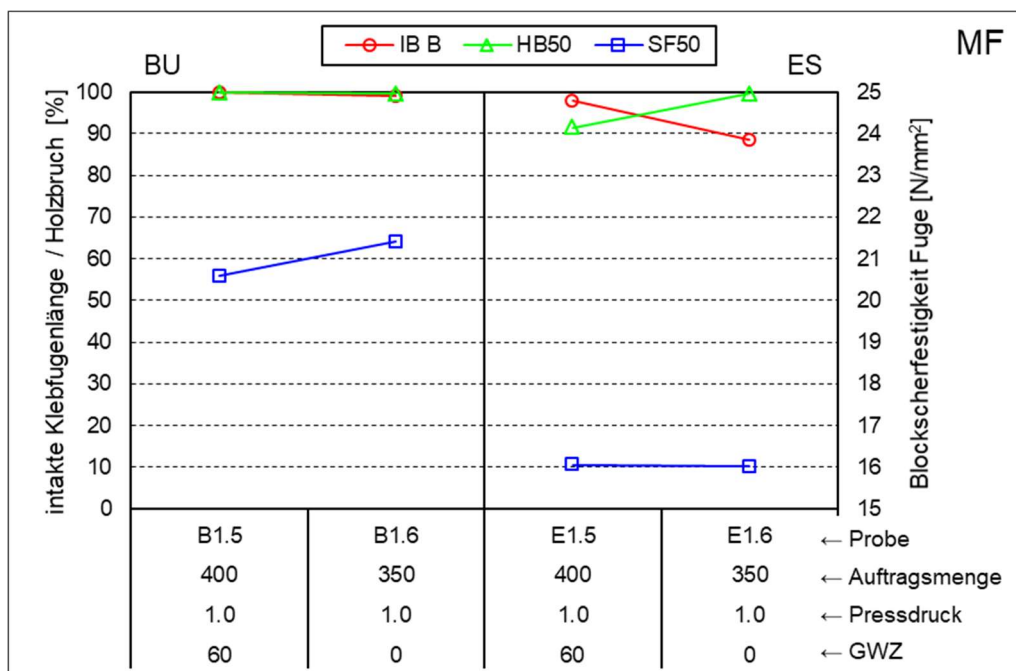


Bild 3. Einfluss von Verklebungsparametern auf die Verklebungsqualität bei Buche und Esche (Verklebung MF): Geringer Effekt trotz Variation Auftragsmenge und GWZ.

Legende: IB B = intakte Klebfugenlänge [%] nach Delaminierung (EN 14080 Verfahren B), HB50=Holzbruchanteil [%] bei Blockscherprüfung mit Probenhöhe 50mm, SF50= Blockscherfestigkeit [N/mm²] bei Probenhöhe 50mm, GWZ=geschlossene Wartezeit [Min].



1.3 Projektplan

1.3.1 Ziele

Das Projekt verfolgte folgende Ziele:

- Definition von Robustheit im Kontext der Holzverklebung
- Erarbeitung eines Konzeptes zur Quantifizierung der Robustheit bezüglich:
 - Verklebungsprozess: Änderung der Verklebungsqualität bei einer gezielten Verletzung der Verarbeitungsrichtlinien der Klebstoffhersteller (Technische Merkblätter)
 - Langzeitverhalten: Sensitivität bezüglich Last- und Klimaschwankungen, manifestiert in Kriechverformungen oder als Delaminierung von Klebfugen
- Identifizierung und Quantifizierung von relevanten Einflussfaktoren
- Demonstration des Konzeptes bezüglich Verklebungsqualität anhand von Pilotuntersuchungen (ausgewählte Fallbeispiele mit Flächenverklebung)
- Initiierung von nachfolgenden Industrieprojekten

1.3.2 Forschungsfragen

Dem Forschungsplan liegen folgende Forschungsfragen zugrunde:

- Wie kann die Robustheit einer Holzverklebung definiert und quantifiziert werden?
 - Welche Unterschiede bezüglich Verklebungsqualität und Langzeitverhalten müssen in einem Robustheitskonzept berücksichtigt werden?
 - Welche Prüfmethoden und Messgrößen sind zur Quantifizierung geeignet?
- Sind Klebstoffe bezüglich Robustheit unterschiedlich?
 - Welches sind entscheidende Einflussgrößen?
 - Sind die Einflussgrößen spezifisch für Klebstofftypen oder einzelne Produkte?
 - Können Klebstoffe gleichzeitig robust sein bezüglich Verklebungsqualität und Langzeitverhalten?
- Wie kann ein Robustheitskonzept bei der Entwicklung und Auswahl von Klebstoffen für die Laubholz-Verklebung angewendet werden?

1.3.3 Bedeutung des Projektes für Forschung und Praxis

Leistungsfähige, zuverlässige, dauerhafte und wirtschaftliche Klebverbindungen sind eine Voraussetzung für eine vermehrte Verwendung von Laubholz in der Holzindustrie. Die Anwendung von Robustheits-Konzepten bei der Entwicklung und Auswahl von Klebstoffen bietet neue Ansätze für Optimierungen der Laubholz-Verklebung.

1.3.4 Thematische Eingliederung in die Schwerpunkte des WHFF

Das vorgeschlagene Projekt befasst sich mit der Optimierung der Verklebung von Laubholz und bezieht sich somit insbesondere auf die WHFF-Schwerpunkte 2 'Optimierung von Prozessen und Produktionsmethoden in der Wald- und Holzwirtschaft' sowie 4 'Innovation bei der Entwicklung neuer Verwendungsmöglichkeiten'.

1.3.5 Projektorganisation

Beim vorgeschlagenen Projekt wurde bewusst auf den Einbezug von Industriepartnern verzichtet, da der Fokus auf der Erarbeitung eines neuartigen Untersuchungskonzeptes und dessen Demonstration anhand von ersten Fallbeispielen liegt. Dies ermöglicht auch eine unabhängige Auswahl von (Industrie-üblichen) Klebstoffen, sowie deren anonymisierte Verwendung. Basierend auf den Ergebnissen des Projektes sollen dann nachfolgend als Umsetzungsaktivität Folgeprojekte zusammen mit Industriepartnern initiiert werden (siehe Kapitel 5.3 / 5.4).

Das Projekt wurde durch die Arbeitsgruppe WoodTec an der Abteilung 'Cellulose & Wood Materials' an der Empa in Dübendorf bearbeitet. Das ausführende Projektteam ist in Tabelle 1 dokumentiert. Die Versuche wurden in den Prüflabors der Empa durchgeführt.

Tabelle 1: Projektteam

Arbeitsgruppe	Personen	Aufgaben / Know-how
WoodTec	Martin Arnold	Projektleitung, Datenauswertung, Berichterstattung
	Walter Risi, Daniel Heer	Probenvorbereitung, Versuchsdurchführung
Cellulose Biohybrids	Anja Huch	Mikroskopie, Messung Klebfugendicke

1.3.6 Arbeitsprogramm

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

Tabelle 2. Projektarbeiten

Arbeitspaket	Inhalt	Methoden / Ergebnisse
1 Grundlagen	Review Robustheitskonzepte	verschiedene Fachgebiete
	frühere Parameterstudien Verklebung	Literaturstudie, proprietäres Industrie-Knowhow
2 Konzept Robustheit	Definition Robustheit im Kontext der Holzverklebung	Betrachtungsebenen: - Verklebungsprozess - Langzeitverhalten
	Quantifizierung Robustheit	Beurteilungskriterien / Messgrößen
	Einflussfaktoren auf Robustheit	möglicher Variationsbereich von Einflussfaktoren / Parametern
3 Pilotversuche Robustheit Verklebungs- prozess	Versuchsplanung	Festlegung Versuchsvarianten (Holzarten, Klebstoffe, Verklebungsparameter), Zeitplan
	Bereitstellung Probenmaterial	Laubholz-Lamellen, Klebstoffe, Probenzuschnitt
	Labor-Verklebungen (Flächenverklebung)	verschiedene Holzarten-Klebstoff-Kombinationen; Variation Jahrring-Stellung und Formschlüssigkeit, geschlossene Wartezeit und Pressdruck
	Quantifizierung Verklebungs- qualität und Robustheit	Einbezug/Vergleich: - Klebfugendicke - Delaminierung (EN 302-2, EN 14080) - Zugscherprüfung (EN 302-1), - Blockscherprüfung (EN 14080)
4 Umsetzung	Erfassung konkreter Forschungs- bedarf Klebstoff- / Holzindustrie	Vorstellung / Diskussion Robustheits-Konzept bei Industriepartnern
		Entwicklung spezifischer Untersuchungskonzepte bezüglich Robustheit
		Definition konkrete Projekte, auch bezgl. Langzeitverhalten / Einsatz in verschiedenen Nutzungsklassen
5 Projektleitung	Berichterstattung	Zwischen- und Schlussbericht
	Administration	administrative Projektabwicklung

Ergänzende Erläuterungen zu den Arbeitspaketen:

AP1 Grundlagen

- Neben dem Bauingenieurwesen werden Robustheitskonzepte z.B. auch im Automobilbau und bei Elektronikbauteilen angewendet. Als Grundlage für das eigene Konzept werden verschiedene Ansätze analysiert und verglichen.
- Von der Methodik ähnlich angelegt sind vermutlich Parameterstudien zur Definition der Verarbeitungsrichtlinien von Klebstoffen. Solche Untersuchungen erfolgen jedoch meist durch die Klebstoffhersteller und deren proprietären Ergebnisse werden in der Regel nicht veröffentlicht. Durch eine Literatursuche sollen publizierte Ergebnisse aus Forschungsprojekten zusammengetragen werden.

AP2 Konzept Robustheit

- Basierend auf dem Vergleich verschiedener Robustheitskonzepte in anderen Branchen (AP1) wird 'Robustheit' im Kontext der Holzverklebung spezifisch definiert, d.h. sowohl bezüglich Verklebungsqualität als auch bezüglich Langzeitverhalten.
- Zur Quantifizierung der Robustheit sind relevante Beurteilungskriterien respektive Messgrößen notwendig.
- Zusammenstellung von möglichen Einflussfaktoren auf die Robustheit sowie deren (sinnvoller) Variationsbereich.

AP3 Pilotversuche Verklebungsprozess

- Die Pilotversuche bezüglich der Robustheit des Verklebungsprozesses (Flächenverklebung) werden basierend auf den Ergebnissen der AP 1 und 2 geplant. Mögliche Versuchsparameter sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Ausgewählte Kombinationen davon werden als Versuchsvarianten definiert.
- Die benötigten Prüfkörper werden gemäss den einschlägigen Normen im Labor verklebt. Für die Versuche werden einfache Prüfkörper aus 2 verklebten Lamellen verwendet.
- Die Quantifizierung der Verklebungsqualität respektive der Robustheit erfolgt primär anhand von Delaminierungs- und Scherversuchen (Tabelle 3 rechte Spalte).

Tabelle 3. Versuchsparameter Pilotversuche

Verklebungsprozess			Verklebungsqualität
Fügeteile	Klebstoffe	Verklebungsparameter	Qualitätsmerkmal
<ul style="list-style-type: none"> • Holzart • Jahrringstellung • Holzfeuchte 	<ul style="list-style-type: none"> • Klebstofftyp • Hersteller/Produkte 	<ul style="list-style-type: none"> • Pressdruck • geschlossene Wartezeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Klebfugendicke • Delaminierung (EN 302-2, EN 14080) • Blockscherfestigkeit (EN 14080) inkl. Holzbruchanteil

1.3.7 Zeitplan

Das Projektgesuch wurde am 21. März 2019 eingereicht und am 11. Juli 2019 genehmigt. Der Projektstart erfolgte zum frühest möglichen Zeitpunkt per 1. August 2019. Durch die Auflage, das Projekt spätestens per 31. Dezember 2020 abzuschliessen, ergab sich eine gegenüber dem Antrag verkürzte Projektlaufzeit von 17 Monaten.

Der angepasste Zeitplan ist in Bild 4 dargestellt. Die Projektarbeiten erfolgten plangemäss. Im November 2019 wurde ein Zwischenbericht eingereicht.

Bild 4. Zeitplan

Arbeitspaket		2019					2020												2021		
		8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	Grundlagen	fortlaufend																			
2	Konzept Robustheit	fortlaufend																			
3	Pilotversuche																				
	Versuchsplanung			S1				S2					S3								
	Bereitstellung Probenmaterial				S1				S2					S3							
	Laborverklebungen					S1				S2					S3						
	Verklebungsqualität/Robustheit						Serie 1				Serie 2					Serie 3					
4	Umsetzung																				
5	Datenauswertung								S1				S2					S1-3			
	Zwischenbericht																				
	Schlussbericht																				

(S1-S3 = Versuchs-Serie 1-3)

2 Robustheit im Kontext der Holzverklebung

In diesem Kapitel wird Robustheit spezifisch für die Anwendung in der Holzverklebung definiert und ein entsprechendes Auswertungskonzept vorgestellt. Die Ergebnisse der Pilotversuche sowie Beispiele aus Literaturdaten werden später in Kap. 4 gemäss diesem Konzept dargestellt und ausgewertet.

2.1 Definition

In Ergänzung zur allgemeinen Einführung des Robustheits-Begriffes in Kapitel 1.1 sind in Tabelle 4 stellvertretend für die vielen unterschiedlichen Bedeutungen von 'Robustheit' in verschiedenen Fachbereichen drei Beispiele von spezifischen Begriffsdefinitionen aufgeführt, welche sinngemäss auch auf die Holzverklebung angewendet werden können.

Tabelle 4. Beispiele von Begriffsdefinitionen der Robustheit

<u>SIA 260:2013 Grundlagen der Projektierung von Tragwerken:</u>	
Robustheit <i>robustesse</i> <i>robustezza</i> <i>robustness</i>	Fähigkeit eines Tragwerks und seiner Bauteile, Schädigungen oder ein Versagen auf Ausmasse zu begrenzen, die in einem vertretbaren Verhältnis zur Ursache stehen.
<u>Kamiske (Ed.) 2015, Handbuch QM-Methoden, Hanser, S. 230:</u>	
Ein Produkt ist robust, wenn die gewünschte Funktionalität und Performance des Produkts unabhängig von der Variation der Rohmaterialien, der Streuung des Herstellungsprozesses und den unterschiedlichen Betriebsbedingungen des Produkts ist.	
<u>ZVEI 2015, Handbook for Robustness Validation, S. 12:</u>	
Robustness is the capability of functioning correctly or not failing under varying application and production conditions.	

Während im Baubereich Robustheit oft im engeren Zusammenhang mit aussergewöhnlichen Einwirkungen auf die strukturelle Stabilität von Bauwerken und Tragwerken angewendet wird, sind die zweite und dritte Definition breiter gefasst und passen sehr gut auch auf die Qualität und Zuverlässigkeit von verklebten Holzbauteilen. Im industriellen Bereich liegt der Fokus oft auf robusten (Herstellungs-) **Prozessen** [Stricker 2014, ZVEI 2015], schlussendlich ist das Ziel aber in der Regel eine gleichbleibende **Produktequalität**.

Tabelle 5. Definition von Robustheit im Bereich der Holzverklebung

Bereich	Definition	Robustheits-Ziel	Komponenten
Holzverklebung allgemein	Sensitivität der Klebstoffe resp. der Verklebungsqualität bezüglich wechselnden Produktions- und Nutzungsbedingungen	zuverlässige und sichere verklebte Holzprodukte	
Verklebungsprozess (Herstellung)	Sensitivität des Verklebungsprozesses bezüglich Abweichungen von Standardbedingungen (Herstellervorgaben)	konstante Verklebungsqualität resp. Minimierung von Fehlverklebungen	Fügeteile Klebstoff Verklebungsprozess Verbindungstyp
Langzeitverhalten (Nutzungsphase)	Sensitivität bezüglich Nutzungseinflüssen	Unempfindlichkeit gegenüber Last- und Klimaschwankungen, Alterung	Klebfugenintegrität (Festigkeitsänderung, Delaminierung) Kriechen

Basierend auf dem Vergleich verschiedener Robustheitskonzepte in verschiedenen Fachbereichen werden für den Bereich der Holzverklebung die in Tabelle 5 zusammengestellten Definitionen vorgeschlagen. Wie bereits

einleitend in Kapitel 1.1 erwähnt, sind neben einer allgemeinen Definition auch spezifischere Betrachtungen für die Bereiche Verklebungsprozess und Langzeitverhalten angezeigt.

2.2 Robustheitsfaktoren und Qualitätsmerkmale

Die Quantifizierung der Robustheit basiert auf der Erfassung der Wirkung von ausgewählten Einflussfaktoren auf ein einzelnes oder mehrere Qualitätsmerkmale. Dazu werden relevante und quantifizierbare/messbare Einflussfaktoren und Qualitätsmerkmale benötigt. Für den Bereich Verklebungsprozess ist in Tabelle 6 eine (unvollständige) Auswahl von wichtigen Parametern zusammengestellt.

Als Robustheitsfaktoren kommen grundsätzlich alle möglichen Einflussfaktoren im Verklebungsprozess in Frage. Als Qualitätsmerkmale werden sinnvollerweise etablierte Kenngrößen aus Prüfnormen verwendet, da dafür auch die notwendigen Messmethoden definiert sind. Fallweise können aber natürlich auch andere anwendungsspezifische Qualitätsmerkmale definiert werden.

Tabelle 6. Mögliche Robustheitsfaktoren und Qualitätsmerkmale im Bereich Verklebungsprozess

Einflussfaktoren Verklebungsprozess (Robustheitsfaktoren)			Verklebungsqualität
Fügeteile	Klebstoffe	Verklebungsparameter	Qualitätsmerkmale
<ul style="list-style-type: none"> • Holzart • Holzfeuchte • Lamellen: <ul style="list-style-type: none"> - Dicke - Anzahl - Jahrringstellung • Oberfläche: <ul style="list-style-type: none"> - Bearbeitungsart - Alterung • Verbindungstyp <ul style="list-style-type: none"> - Fläche/Keilzinkung - Formschluss 	<ul style="list-style-type: none"> • Klebstofftyp • Klebstoffeigenschaften (z.B. Viskosität) • Hersteller/Produkte • Haftvermittler 	<ul style="list-style-type: none"> • Pressdruck • Timing (z.B. offene/geschlossene Wartezeit) • Auftrag <ul style="list-style-type: none"> - Klebstoffmenge - einseitig/beidseitig - 2K: getrennt/gemischt 	<ul style="list-style-type: none"> • Klebfugendicke ev. Eindringung Klebstoff in Holzoberfläche • Delaminierung (EN 302-2, EN 14080) • Blockscherfestigkeit (EN 14080) inkl. Holzbruchanteil • Zugscherfestigkeit (EN 302-1) inkl. Holzbruchanteil

2.3 Beurteilung und Quantifizierung der Robustheit

Idealerweise liesse sich Robustheit anhand einer spezifischen Kennzahl quantifizieren. In den verschiedenen Fachgebieten findet sich denn auch eine grosse Zahl an Robustheits-Kennzahlen [Göhler 2016, McPhail 2018]. Diese Kennzahlen sind jedoch oft sehr anwendungsspezifisch, nur beschränkt übertragbar und schwierig interpretierbar. Gemeinsam ist vielen Kennzahlen, dass sie auf einer Quantifizierung der Streuung von Qualitätsmerkmalen basieren.

Daher wird im vorliegenden Projekt für die Holzverklebung ein einfaches, praxisnahes Konzept entwickelt, welches auf der Annahme beruht, dass die Variation eines ausgewählten Einflussfaktors eine Variation bei der Verklebungsqualität (eines oder mehrere Qualitätsmerkmale) hervorruft. Ein Vergleich des Ausmasses der Variation der Qualitätsmerkmale kann dann zur Quantifizierung der Stärke dieses Einflussfaktors respektive als Mass der Robustheit gegenüber diesem Faktor (Sensitivität) verwendet werden.

Als Messgrößen für die Variation kommen die Streuungskennzahlen Standardabweichung und Variationskoeffizient in Frage. Die Standard-Abweichung übernimmt die Masseinheit des Qualitätsmerkmals und ist daher gut interpretierbar. Ein direkter Vergleich zwischen Qualitätsmerkmalen mit unterschiedlichen Masseinheiten ist aber nicht möglich. Der Variationskoeffizient ermöglicht hingegen den Vergleich zwischen Qualitätsmerkmalen mit unterschiedlichen Masseinheiten. Durch den Bezug zum Mittelwert ist der Variationskoeffizient allerdings bei stark unterschiedlichen Mittelwerts-Niveaus mit Vorsicht zu verwenden.

Klar zu bezeichnen ist bei der Verwendung und Interpretation der Streuungskennzahlen jeweils die Betrachtungsebene gemäss Tabelle 7. Alle Betrachtungsebenen können für jeweils unterschiedliche Aspekte von Robustheitsbetrachtungen dienen.

Tabelle 7: Betrachtungsebenen der Streuung von Qualitätsmerkmalen bei verklebten Holzbauteilen

Betrachtungsebene		Versuchsparameter	Anwendungsbeispiel / Vergleich
1	innerhalb einer Probe (gleiche Verklebung)	konstant	Variabilität zwischen Fugen eines BSH-Abschnittes
2	zwischen Wiederholungsproben (gleiche Verklebungsvariante)	konstant	Variabilität zwischen mehreren gleich produzierten BSH-Trägern (Qualitäts-Konstanz)
3	zwischen Mittelwerten mehrerer Serien von Wiederholungsproben (verschiedene Verklebungsvarianten)	mehrere Parameterstufen	Quantifizierung durchschnittliche Wirkung von Parameterstufen zur Bewertung von Art und Stärke des Parametereinflusses

Ein Konzept zur Beurteilung und Quantifizierung der Robustheit ist in Tabelle 8 skizziert:

- (1) Ausgangspunkt ist eine (grafische) Analyse des grundsätzlichen Zusammenhangs zwischen Robustheitsfaktor(en) - Qualitätsmerkmal(en).
- (2) Vor allem bei kardinalskalierten Robustheitsfaktoren, kann die Tendenz des Zusammenhangs qualitativ resp. halb-quantitativ kategorisiert werden.
- (3) Die Beschreibung des Zusammenhangs wird ergänzt durch den Vergleich der Streuungen der Qualitätsmerkmale zwischen mehreren Stufen der Robustheitsfaktoren.
- (4) In einzelnen Fällen kann schliesslich die Ableitung von spezifischen Robustheits-Kennzahlen erfolgen, welche zur Einordnung der Robustheit über verschiedene gleichartige Problemstellungen dienen können.

Tabelle 8: Konzept Quantifizierung Robustheit

Prinzip		Beurteilung / Quantifizierung	Bemerkungen
1	Einfluss Robustheitsfaktor(en) auf Qualitätsmerkmal(e)	grafisch / qualitativ	mindestens 3 Stufen eines Robustheitsfaktors
2	Zusammenhangs-Tendenz Robustheitsfaktor(en) - Qualitätsmerkmal(e)	grafisch / halb-quantitativ	Kategorisierung von Richtung und Stärke des Zusammenhangs
3	Vergleich Streuung Qualitätsmerkmal(e)	grafisch / quantitativ	über mehrere Stufen der Robustheitsfaktoren
4	Robustheits-Kennzahl (robustness metrics)	numerisch / quantitativ	z.B. Verhältnis Streuung Qualitätsmerkmal/Robustheitsfaktor

Dieses Konzept wird in Bild 5 anhand eines fiktiven Beispiels erläutert.

(0) Das fiktive Beispiel beruht auf einem Robustheitsfaktor X mit 3 Stufen (10, 20, 30) und dessen Einfluss auf das Qualitätsmerkmal Z für die 3 Versuchsvarianten Y1, Y2 und Y3. Für den Robustheitsfaktor sowie das Qualitätsmerkmal in den 3 Versuchsvarianten wird der Mittelwert (MW), die Standardabweichung (Std) und der Variationskoeffizient (CoV) berechnet. Als Robustheits-Kennzahl wird das Verhältnis zwischen den Variationskoeffizienten des Qualitätsmerkmals und des Robustheitsfaktors verwendet.

(1) Die grafische Analyse des Zusammenhangs zwischen dem Robustheitsfaktor X und dem Qualitätsmerkmal Z zeigt für die Versuchsvariante Y1 einen eindeutigen linearen, positiven Zusammenhang, für die

Versuchsvariante Y2 keinen klaren Zusammenhang und für die Versuchsvariante Y3 einen schwachen, negativen Zusammenhang.

(2) Die Tendenz des Zusammenhangs wird durch Pfeilsymbole sowohl bezüglich Richtung (positiv, negativ) als auch bezüglich Stärke (schwach, klar) klassiert. In dieser Zusammenstellung können gleichzeitig mehrere Qualitätsmerkmale Z_i verglichen werden.

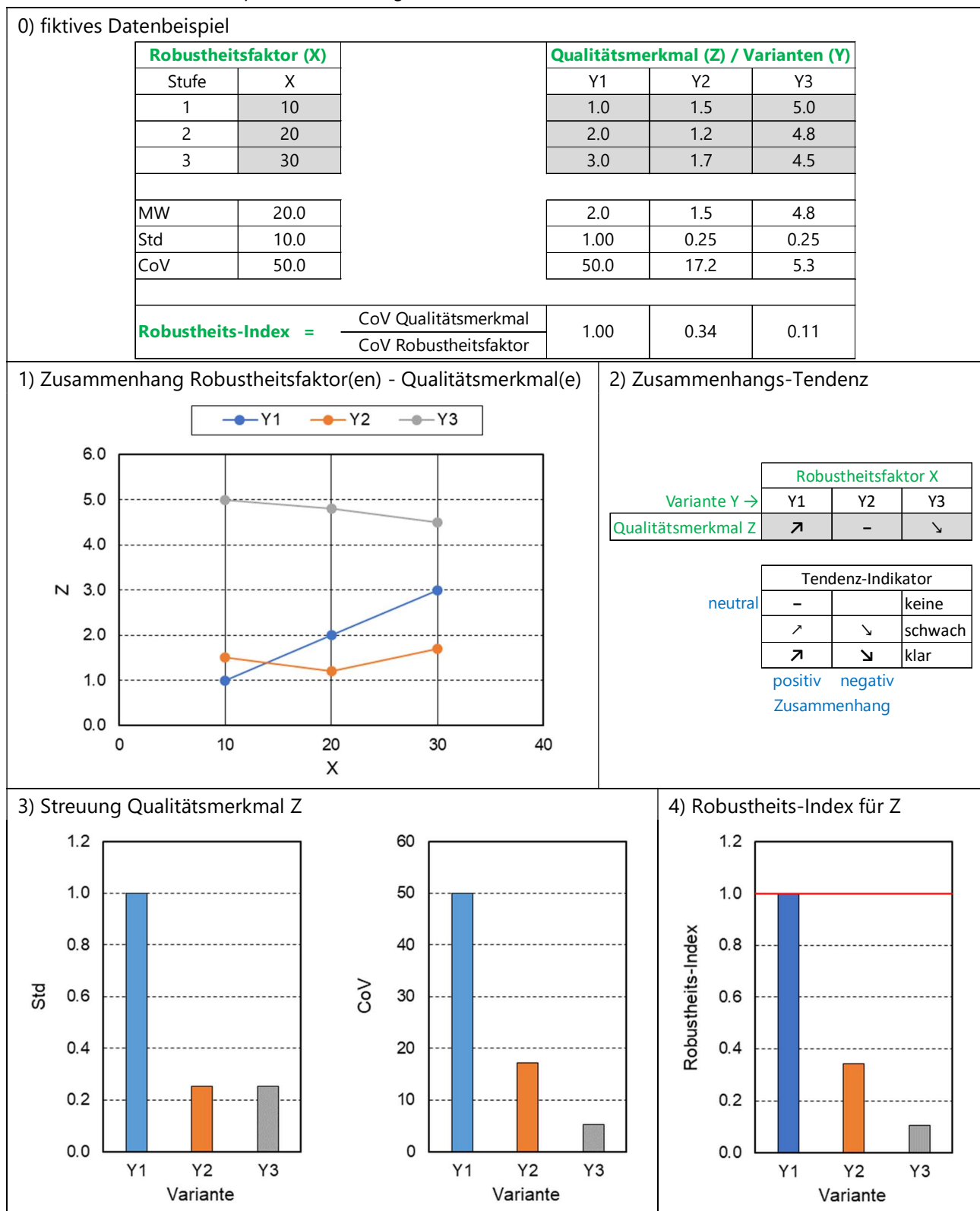
(3) Der Vergleich der Streuungen des Qualitätsmerkmals Z_1 zwischen den 3 Stufen des Robustheitsfaktors für die 3 Versuchsvarianten zeigt für Y1 eine deutlich grössere Streuung als für Y2 und Y3.

(4) Das Verhältnis der berechneten Robustheits-Indexe entspricht im Beispiel aufgrund des Bezuges zum gleichen Variationskoeffizient des Robustheitsfaktors dem entsprechenden CoV-Verhältnis.

Interpretationshilfe/Kommentare:

- Zur Erfassung einer Zusammenhangs-Tendenz sollten bei einem kardinalskalierten Robustheitsfaktor mindestens 3 Stufen einbezogen werden. Die mittlere Stufe entspricht dabei idealerweise der Standardvorgabe des Klebstoffherstellers, während die höchste und die tiefste Stufe bis an die Grenzen des möglichen Einsatzbereiches definiert werden können.
- Der Robustheitsfaktor muss aber nicht zwingend kardinalskaliert sein, sondern kann auch aus nominalen Varianten-Kategorien bestehen (z.B. Klebstofftypen, Holzarten u.s.w.). Da in einem solchen Fall für den Robustheitsfaktor kein numerischer Streuungskennwert verfügbar ist, ist allerdings keine Berechnung eines Robustheits-Indexes möglich.
- Die 'positiv/negativ'-Klassierung der Zusammenhangs-Tendenz ist im Sinne der Richtung des statistischen Zusammenhangs zwischen Robustheitsfaktor und Qualitätsmerkmal zu verstehen und nicht in qualitativem Sinn. Die entsprechende Interpretation hängt von der Definition und der Masseinheit des jeweiligen Qualitätsmerkmals ab.
- Der Verwendung der Standardabweichung macht vor allem Sinn bei Vergleichen innerhalb desselben Qualitätsmerkmals. Der Variationskoeffizient kommt grundsätzlich beim Vergleich von verschiedenen Qualitätsmerkmalen zum Zuge. Bei grösseren numerischen Unterschieden im Mittelwertsniveau ist allerdings eine vorsichtige Interpretation notwendig (siehe Beispiel in Bild 5 mit gleicher Standardabweichung für die Varianten Y2 und Y3, jedoch unterschiedlichen Variationskoeffizienten infolge des Unterschiedes im Mittelwertsniveau).
- Eine kleine Streuung des Qualitätsmerkmals trotz substantieller Änderungen im Robustheitsfaktor deutet auf ein stabiles, diesbezüglich wenig sensitives Qualitätsmerkmal hin. Umgekehrt bedeutet eine grosse Streuung, dass das Qualitätsmerkmal sensitiv ist auf Änderungen im Robustheitsfaktor.
- Eine grosse Streuung des Qualitätsmerkmals deutet nicht zwingend auf einen klaren (linearen) Zusammenhang zwischen Einflussfaktor und Qualitätsmerkmal hin. Werteschwankungen auf den verschiedenen Stufen des Robustheitsfaktors können auch 'ungeordnet' auftreten und sind dann schwierig interpretierbar. In einem solchen Fall kann lediglich auf eine generelle Sensitivität des Qualitätsmerkmals gegenüber dem Robustheitsfaktor geschlossen werden. Eine Optimierung des Qualitätsmerkmals wird dabei schwierig.
- Eine fehlende Sensitivität des Qualitätsmerkmals gegenüber einem Robustheitsfaktor bedeutet nicht automatisch ein gutes Qualitätsniveau, da Robustheit auch auf einem tiefen Qualitätsniveau gegeben sein kann.
- Der berechnete Robustheits-Index quantifiziert die relative Streuung des Qualitätsmerkmals in Bezug zur Streuung des Robustheitsfaktors. Dabei bedeutet ein Robustheitsindex <1 , dass die Streuung eines Qualitätsmerkmals relativ gesehen geringer ist als die Streuung zwischen den Stufen des Robustheitsfaktors. Umgekehrt deutet ein Robustheits-Index >1 auf eine überproportionale Streuung des Qualitätsmerkmals hin. Die Grössenordnung des auf Variationskoeffizienten basierenden Robustheitsfaktors hängt dabei natürlich von der Skalierung und dem Mittelwertsniveau der beteiligten Parameter ab, was bei der Interpretation berücksichtigt werden muss und allenfalls Vergleiche bei sehr unterschiedlichen Messgrössen erschweren kann.

Bild 5. Illustration Konzept Quantifizierung Robustheit



3 Material und Methoden

Eine umfassende Quantifizierung der Robustheit des Verklebungsprozesses und des Langzeitverhaltens erfordert sehr umfangreiche Versuchsdaten, welche den Rahmen des vorliegenden Projektes bei Weitem sprengen. Vielmehr zielt das Projekt darauf ab, anhand von ausgewählten Pilotversuchen ein mögliches Untersuchungskonzept zu entwickeln und zu testen. Dieses Konzept wird ergänzend auch auf bereits publizierte Ergebnisse aus anderen Forschungsprojekten angewendet. Der Fokus liegt dabei auf Beispielen für den Verklebungsprozess. Fragestellungen bezüglich Langzeitverhalten können mit analogen Ansätzen untersucht werden.

3.1 Pilotversuche

Für die Pilotversuche im AP3 wurde ein spezifisches Untersuchungskonzept entwickelt, welches die parallele Messung von ausgewählten Qualitätsmerkmalen an maximal vergleichbaren Proben ermöglicht, welche unter definierten Bedingungen verklebt wurden. Damit können Qualitätsmerkmale und deren Einflussfaktoren bis auf das Niveau der Einzelfuge detailliert untersucht werden.

Das Untersuchungskonzept basiert auf der Verklebung von Lamellenpaaren¹⁾ zu Probenrohlingen, aus denen nachfolgend 'gepaarte' Prüfkörper für die verschiedenen Qualitätsmerkmale geschnitten wurden (siehe 3.1.2). Der Einfluss der Holzeigenschaften auf die Qualitätsmerkmale wurde dahingehend kontrolliert (minimiert), dass die Robustheitsparameter auf Probenmaterial aus axialen Folgeabschnitten der Lamellen angewendet wurden.

¹⁾ Ein vorgängig durchgeführter Vergleich der Delaminierung bei Prüfkörpern aus einem Brettschichtholzabschnitt und aus Lamellenpaaren hat gezeigt, dass mit dieser weniger aufwendigen Probenherstellung vergleichbare Ergebnisse erzielt werden.

3.1.1 Versuchsserien

Die Pilotversuche wurden aufgeteilt in 3 Versuchsserien (Tabelle 9). Die angewendeten Versuchsparameter basieren auf den in Kapitel 2 identifizierten Robustheitsfaktoren und Qualitätsmerkmalen. Um nicht-interpretierbare Wechselwirkungen zu vermeiden, wurde pro Versuchsserie nur 1 Robustheitsfaktor variiert und alle anderen Versuchsparameter konstant gehalten.

Aufgrund ihrer besonderen Bedeutung wurden der **Pressdruck**, die **Holzfeuchte** und die **geschlossene Wartezeit** als primäre Robustheitsfaktoren für die 3 Versuchsserien festgelegt. Die Festlegung der weiteren Versuchsparameter wie Holzart, Jahrringstellung der Lamellen sowie die Auswahl der Klebstoffe erfolgte je nach deren Verfügbarkeit und unter Berücksichtigung der resultierenden Versuchskombinationen individuell für die 3 Versuchsserien. Ausser den variierenden Robustheitsfaktoren wurden alle anderen Versuchsparameter innerhalb der Versuchsserien konstant gehalten.

Bemerkungen zu einzelnen Versuchsparametern (Tabelle 9):

- **Holzart:** Aufgrund der Auflage in der Bewilligungsverfügung wurde gegenüber dem Projektantrag als zusätzliche Holzart auch Eiche einbezogen.
- **Jahrringstellung:** Die Rohlamellen wurden entsprechend der vorherrschenden Jahrringstellung als Tangential, Halbrikt oder Rift klassiert und entsprechend für den gezielten Aufbau der Lamellenpaare eingesetzt (siehe 3.1.2).
- **Formschlüssigkeit:** In Versuchsserie S1 wurde als 'Störfaktor' für den Pressdruck die Formschlüssigkeit der Fügeile (Lamellen) als zusätzlicher, 2-stufiger Robustheitsfaktor eingebunden. Die als 'plan' bezeichnete Formschlüssigkeit basiert auf sorgfältig plan gehobelten Lamellen, während 'verformte' Lamellen ohne Abrichten auf Dicke gehobelt wurden und entsprechend Verformungen und Hobelschläge aufwiesen.
- **Holzconditionierung:** Die Rohlamellen wurden vor dem Hobeln in Klimakammern mit den relativen Luftfeuchtigkeiten RH 35%, 65% und 85% (20°C) klimatisiert. Dies ergab entsprechende Holzfeuchten von rund 8%, 12% und 16%.

- **Klebstoffe:** Ausgewählt wurden 2 handelsübliche Klebstoffe (anonymisiert bezeichnet als PUR und MUF), welche gemäss Klebstoffliste der MPA Universität Stuttgart für Allgemeine Zwecke für Nadelholz zur Verwendung für Brettschichtholz gemäss SN EN 14080 zugelassen sind und vom Klebstoffhersteller auch zur Verklebung von Laubholz empfohlen wurden.
- **Verklebungsparameter:** Die Verklebungen erfolgten grundsätzlich gemäss Vorgaben in den technischen Merkblättern der Klebstoffhersteller. Die ausgewählten Robustheitsfaktoren wurden in 3 Stufen variiert, wobei die mittlere Stufe der Standardvorgabe des Klebstoffherstellers entspricht, während die höchste und die tiefste Stufe an die Grenzen des üblichen Einsatzbereiches verschoben wurden.
- **Qualitätsparameter:** In allen 3 Versuchsserien wurden für eine durchgehende Vergleichbarkeit die gleichen Qualitätsmerkmale erfasst. Die Klebfugendicke wird dabei nur als sekundäres Qualitätsmerkmal betrachtet.

Tabelle 9: Versuchssparameter in den 3 Versuchsserien (verwendete Robustheitsfaktoren und deren Faktorstufen in *rot*)

Verklebungsprozess			Verklebungsqualität
Fügeteile	Klebstoffe	Verklebungsparameter	Beurteilungsgrössen
Versuchssserie S1			S1-S3 <ul style="list-style-type: none">• Klebfugendicke• Delaminierung (EN 14080 B)• Blockscherfestigkeit (EN 14080, 40mm) inkl. Holzbruchanteil
<ul style="list-style-type: none">• Holzart:<ul style="list-style-type: none">- Buche• Jahrringstellung:<ul style="list-style-type: none">- Tangential• Formschlüssigkeit:<ul style="list-style-type: none">- plan / verformt	<ul style="list-style-type: none">• Klebstofftyp:<ul style="list-style-type: none">- 1K PUR• Primer:<ul style="list-style-type: none">- mit/ohne	<ul style="list-style-type: none">• Pressdruck:<ul style="list-style-type: none">- 0.2/1.2/1.8 N/mm²	
Kombinationen: 1 HA x 2 Formschluss x 2 Klebstoffe x (3 Pressdruck) x 3 Repl = 24 Lamellen / 36 Teile			
Versuchssserie S2			
<ul style="list-style-type: none">• Holzart:<ul style="list-style-type: none">- Buche- Esche- Eiche• Jahrringstellung:<ul style="list-style-type: none">- Tangential- Halbrift- Rift• Holzfeuchte:<ul style="list-style-type: none">- RH 35 / 65 / 85	<ul style="list-style-type: none">• Klebstofftyp:<ul style="list-style-type: none">- 1K PUR (mit Primer)- MUF	(gemäss Hersteller-Vorgaben)	
Kombinationen: 3 HA x (3 HF) x 2 Klebstoffe x 3 Repl = 36 Lamellen / 54 Teile			
Versuchssserie S3			
<ul style="list-style-type: none">• Holzart:<ul style="list-style-type: none">- Buche- Esche- Eiche• Jahrringstellung:<ul style="list-style-type: none">- Tangential- Halbrift- Rift	<ul style="list-style-type: none">• Klebstofftyp:<ul style="list-style-type: none">- MUF	<ul style="list-style-type: none">• geschlossene Wartezeit:<ul style="list-style-type: none">- 10 / 35 / 60 Min	
Kombinationen: 3 HA x 1 Klebstoff x (3 GWZ) x 3 Repl = 18 Lamellen / 27 Teile			

Eine zusammenfassende Übersicht über die Pilotversuche geben Tabelle 10 und Anhang 1. Für jede Versuchskombination wurden jeweils 3 Wiederholungen bereitgestellt, welche sich nur im Jahrringaufbau der Lamellen unterscheiden. Total wurde 117 Lamellenpaare verklebt.

Tabelle 10: Überblick über die Versuchsparameter in den 3 Versuchsserien

Serie	Robustheits-Parameter	Versuchsvarianten								Anzahl verklebte Teile (Lamellen- Paare)
		Fügeteile					Klebstoffe			
		Holz- art	JR-Stellung Lamellen u/o				Typ			
T/T	H/H		H/R	R/R	PUR	PURp	MUF			
S1	Pressdruck (0.2/1.2/1.8 N/mm ²) x Formschluss (plan/verformt)	BU	1-3				X	X		36
S2	Holzkonditionierung (35/65/85 % RH)	BU	1-3					X	X	54
		ES	1	2		3				
		EI	1	2		3				
S3	geschlossene Wartezeit (10/35/60 Min)	BU	1	2		3			X	27
		ES	1	2		3				
		EI		2	1	3				
			# Wiederholungsprobe							117

3.1.2 Probenmaterial / Verklebung

Als Rohmaterial für die verklebten Lamellenpaare dienten 1.6 m lange, parallel besäumte BSH-Lamellen mit einem Querschnitt von 170 x 36/40 mm² (Bild 6 links). Für die Buchen-Lamellen konnte Restmaterial aus dem Lagerbestand der Empa verwendet, Esche und Eiche mussten extern beschafft werden.

Jeweils 2 Lamellen wurden einem Lamellenpaar mit der gewünschten Jahrringstellung zugeordnet und danach in 3 gleich lange Teile aufgeteilt (ca. 530 mm). Dies ermöglichte die Herstellung von jeweils 3 axial gepaarten und somit 'identisch' aufgebauten Probenrohlingen, welche jeweils den 3 Stufen eines Robustheitsfaktors zugeteilt wurden.

Die Rohlamellen respektive die Lamellenabschnitte wurden danach vor dem Hobeln entsprechend der gewünschten Holzfeuchte vorklimatisiert (Bild 6 rechts).

Bild 6: Rohlamellen in 3-fach Länge (links) und Lamellenabschnitte in der Konditionierung (rechts)



Die definierten Varianten des Querschnittaufbaus der verklebten Lamellenpaare sind in Bild 7 schematisch dargestellt. In der Regel wurden nur gleiche Jahrringstellungen gepaart. Die Buchen-Lamellen in Versuchsserie S1 wiesen alle eine tangentiale Jahrringstellung auf, während bei Eiche in Versuchsserie S3 infolge fehlender Verfügbarkeit von Lamellen mit tangentialer Jahrringstellung auch Probenrohlinge mit einer Halbrift-/Rift-Paarung hergestellt wurden (Tabelle 10).

Bild 7: Varianten des Querschnittaufbaus der verklebten Lamellenpaare

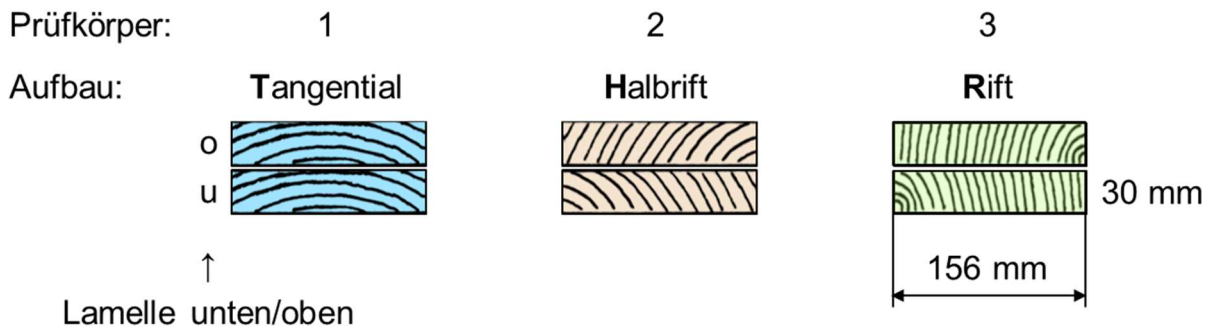


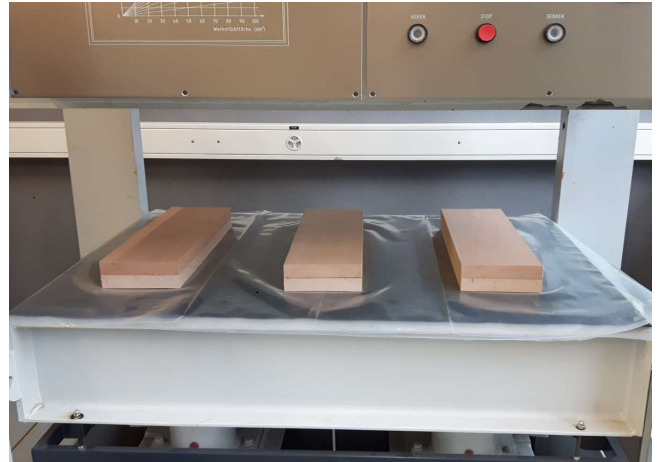
Tabelle 11: Verklebungsvarianten in den Pilotversuchen, mit Vorgaben der Klebstoffhersteller (grün) und effektiv angewendeten Werten (schwarz)

Verklebungs-Variante	1	2	3
Bezeichnung	PUR	PURp	MUF
Klebstoff	PUR		MUF
Vorbehandlung	Wasser	mit Primer	keine
Konditionierung			
Lagerung Lamellen vor Verklebung	im Klima 20 °C / 35, 65 , 85 % RH		
Lagerung verklebte Teile	im Klima 20 °C / 65 % RH		
Lagerung Proben vor der Prüfung	im Klima 20 °C / 65 % RH		
Vorbehandlung Klebflächen			
Typ	Wasser	Primer	(keine)
Primerauftrag [g/m²]	20-25		
Einwirkzeit min.-max. / effektiv [Min]	10-600 / 30-40		
Verklebung			
Anzahl Komponenten	1		2
Mischverhältnis Harz : Härter	-		100:30
Klebstoffauftrag [g/m²]	180		280-450 / 350
	einseitig mit Rakel		einseitig mit Spachtel
offene Zeit max. / effektiv [Min]	70 / (minimal)		100 / (minimal)
geschlossene Zeit Vorgabe min.-max. [Min]	0-70	10-70	(keine Angaben)
geschlossene Zeit Varianten [Min]	10, 35, 60		10, 35 , 60
Pressdruck Vorgabe / Varianten [N/mm²]	1.2 / 0.8, 1.2 , 1.8		1.2 / 0.8, 1.2 , 1.8
Presszeit min. [Min]	350-400	175-200	155 (> bei HF>12%)
Aushärtezeit [h]	Nachlagerzeit 10		auf Anfrage
	Vorgaben Klebstoffhersteller / Anwendung		

Unmittelbar vor dem Verkleben wurden die Lamellen auf eine einheitliche Dicke von 30 mm gehobelt. Für die Verklebung wurden 3 Varianten gemäss Tabelle 11 festgelegt. Der Klebstoffauftrag erfolgte mit Spachtel oder Rakel (Tabelle 11, Bild 8 links). Jeweils 3 Wiederholungsproben (Lamellenpaare) mit unterschiedlicher Jahrringstellung wurden zusammen in der gleichen Charge (=gleiche Verklebungsparameter) verklebt (Bild 8 rechts).

Die verklebten Probenrohlinge wurden danach für die Aushärtung wieder bei 20°C / 65% RH gelagert.

Bild 8: Klebstoffauftrag mit einem Rakel (links) und drei Probenteile (Lamellenpaare) in der Presse (rechts)

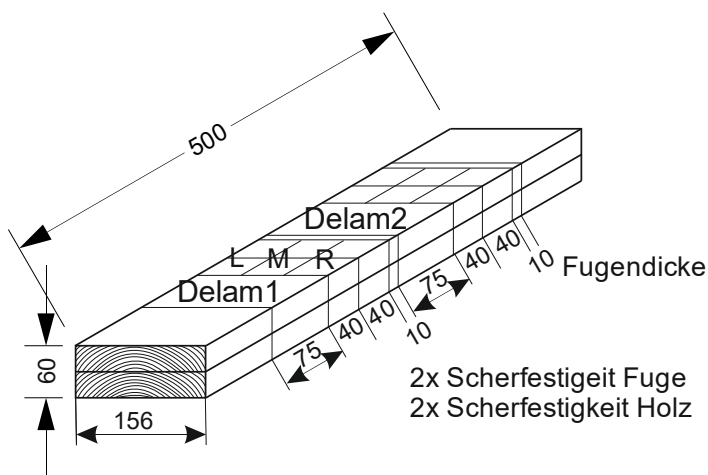


Die Prüfkörper für die einzelnen Qualitätsmerkmale wurden nach einem festgelegten Schema aus den verklebten Probenrohlungen geschnitten (Bild 9):

- 2 Querschnitte (75 mm) für die Delaminierungsprüfung
- 4 Querschnitte (40 mm) für die Scherprüfungen (jeweils 2 für Fugen- und Holzfestigkeit), welche weiter aufgeteilt wurden in 50 mm breite Streifen (**L**inks, **M**itte, **R**echts) entsprechend ihrer Position im Probenrohring
- 2 Querschnitte (10 mm) zur Messung der Klebfugendicke

Bis zur Durchführung der Qualitätsprüfungen wurden die zugeschnittenen Prüfkörper abschliessend wieder bei 20°C / 65% RH klimatisiert.

Bild 9: Entnahmeschema für die Prüfkörper aus den verklebten Lamellenpaaren



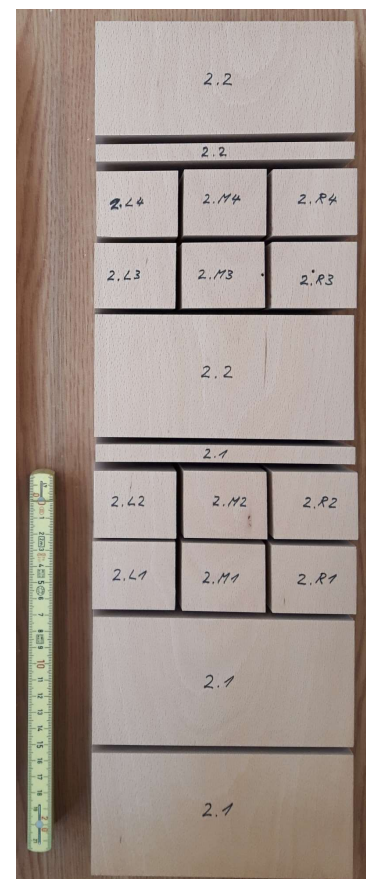
Masse in mm

zugeschnittene Prüfkörper:

Fugendicke: Querschnittsproben zur Messung der Klebfugendicke

Delam: Querschnittsproben für die Delaminierungsprüfung

L, M, R: Scherproben-Streifen Links, Mitte, Rechts (Breite 50 mm)



3.1.3 Methoden

Da der Fokus der Pilotversuche auf der Robustheit des Verklebungsprozesses lag, wurden entsprechend der bei der Herstellung von Brettschichtholz vorgeschriebenen Qualitätsprüfungen die Delaminierungs- und Blockscher-Eigenschaften (Bild 10) als primär zu erfassende, gut etablierte Qualitätsmerkmale festgelegt (Tabelle 9, rechte Spalte). Eine detaillierte Beurteilung der Verwendung dieser Qualitätsmerkmale bei der Verklebung von Laubholz erfolgte im vorangegangenen WHFF-Projekt 2017.18 'Qualitätskontrolle der Flächenverklebung bei Brettschichtholz aus Laubholz' [Arnold 2019].

Bild 10: Prinzip der Delaminierungs- (links) und der Blockscher-Prüfung (rechts)



3.1.3.1 Klebfugendicke

Die Messung der Klebfugendicke erfolgte mit einem Lichtmikroskop im Auflichtmodus unter 20facher Vergrößerung via integriertem Massstab im Okular (Auflösung: 5 µm). Dazu wurden jeweils 2 Querschnittsproben pro verklebtem Probenrohling mit einer Länge (in Faserrichtung) von 10 mm verwendet (siehe Bild 9). Erfasst wurden jeweils 10 Stellen verteilt über die gesamte Klebfugenbreite. Zur besseren Erkennbarkeit wurde der Bereich der Klebfuge mit einer Rasierklinge lokal überschritten (Bild 11).

Bild 11: Querschnittsprobe mit angeschnittenen Bereichen zur Messung der Klebfugendicke



3.1.3.2 Delaminierung

Basierend auf den Erkenntnissen aus dem vorangegangenen WHFF-Projekt 2017.18 'Qualitätskontrolle der Flächenverklebung bei Brettschichtholz aus Laubholz' [Arnold 2019] wurde für die Delaminierungsprüfung (Bild 10 links) der im Anhang C der SN EN 14080 definierte Prüfzyklus B angewendet. Die Prüfung erfolgte an jeweils 2 Querschnittsproben pro verklebtem Probenrohling mit einer Länge (in Faserrichtung) von 75 mm (siehe Bild 9). Die Trocknungszeiten bei Buche lagen innerhalb des in der SN EN 14080 festgelegten Bereiches für Nadelholz (14 h), während sie bei Esche und Eiche deutlich verlängert werden mussten (22-24h), um das Trocknungsziel von 100-110% der Ausgangsmasse einzuhalten.

Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden in diesem Projekt keine Wiederholungszyklen durchgeführt (in Abweichung von SN EN 14080).

Die Ergebnisse des Delaminierungstests werden mit folgendem Kennwert ausgedrückt:

$$1) \text{ Gesamtprozentsatz der Delaminierung eines Prüfkörpers} \quad D_{\text{tot}} = 100 \frac{l_{\text{tot, delam}}}{l_{\text{tot, glue line}}}$$

mit (alle Masse in mm):

$l_{\text{tot, delam}}$ Gesamtlänge der Delaminierung

$l_{\text{tot, glue line}}$ Gesamtlänge aller Klebfugen an beiden Hirnholzflächen jedes Prüfkörpers

Da pro Prüfkörper nur eine Klebfuge vorhanden ist, entspricht der Gesamtprozentsatz der Delaminierung gleichzeitig auch dem Höchstprozentsatz der Delaminierung eines Prüfkörpers.

3.1.3.3 Blockscherprüfung

Die Blockscherprüfung erfolgte gemäss Anhang D der SN EN 14080. Bei diesem Test wird die Klebfuge zwischen 2 Lamellen unter monotoner Belastung einer Scherbeanspruchung bis zum Bruch ausgesetzt (Bild 10 rechts). Zur Berechnung der relativen Fugenfestigkeit wurde wiederum auch die Scherfestigkeit des Holzes der verklebten Lamellen erfasst, mit der Scherebene parallel zur Klebfuge in Dickenmitte der Lamellen (siehe WHFF-Projekt 2017.18 'Qualitätskontrolle der Flächenverklebung bei Brettschichtholz aus Laubholz' [Arnold 2019]). Die Prüfungen erfolgten an 50 mm breiten Einzelproben aus jeweils 4 Querschnittsproben pro verklebtem Probenrohling nach Klimatisierung im Normalklima 20°C / 65% RH. Wie im oben erwähnten Vorgängerprojekt empfohlen wurde, eine Prüfkörper-'Dicke' (Länge in Faserrichtung) von 40 mm verwendet (siehe Bild 9).

Die Blockscherprüfung liefert 2 Kennwerte:

- 1) **Scherfestigkeit**
(Klebfuge + Holz) $f_v = k \frac{F_u}{A}$
mit:
 A Scherfläche (in mm²): $A = b \cdot t$
 k = 1 (Korrekturfaktor für Prüfkörperdicke aus SN EN 14080 nicht verwendet)
 b Prüfkörperbreite (in mm)
 t Prüfkörperdicke in Faserrichtung (in mm)
 F_u Bruchlast (in N)
- 2) **Faserbruchanteil**
(nur bei Klebfuge) (im Bericht als Holzbruchanteil bezeichnet)
visuelle Schätzung des Holzbruchanteils in der Scherfläche, abgestuft in 5%-Schritten

3.1.4 Datenauswertung

Die Datenauswertung basiert auf den Mittelwerten der Qualitätsmerkmale pro Versuchseinheit (verklebtes Lamellenpaar), welche in den Datentabellen im Anhang 2 für die 3 Versuchsserien zusammengestellt sind.

Die verwendeten Kennwerte der Klebfugenqualität (Qualitätsmerkmale) sind in Tabelle 12 aufgelistet. Für die einfachere Darstellung der Ergebnisse werden fallweise nur die aufgeführten Kurzbezeichnungen verwendet.

Tabelle 12: Qualitätsmerkmale und deren Kurzbezeichnungen

Prüfung	Kürzel	Kennwert	Einheit
Klebfugendicke	KD	Klebfugendicke	µm
Delaminierung	D_{tot} (D _{tot})	Gesamtprozentsatz der Delaminierung der Klebfuge eines Prüfkörpers (Verfahren B, EN 14080, Anhang C)	%
	IB	intakter Klebfugenanteil einer einzelnen Klebfuge nach Delaminierung Verfahren B (IB = 100-D _{tot})	%
Block-Scherprüfung	SF	Scherfestigkeit der Klebfuge (40 mm Probenhöhe)	N/mm ²
	SH	Holzbruchanteil der Klebfuge	%
	SL	Scherfestigkeit des Holzes der Lamellen (40 mm Probenhöhe)	N/mm ²
	SF%	relative Fugenfestigkeit in % der mittleren Holzfestigkeit der beteiligten Lamellen	%

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 (IB) umgerechnet. Dieser Kennwert hat zusätzlich den Vorteil, dass seine Streuung besser 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. Für jede Klebfuge wurde die absolute Fugenfestigkeit auf die durchschnittliche Holzfestigkeit der 2 verklebten Lamellen bezogen (siehe Kap. 3.2.2 im WHFF-Projekt 2017.18 'Qualitätskontrolle der Flächenverklebung bei Brettschichtholz aus Laubholz' [Arnold 2019]).

Die Präsentation und Diskussion der Ergebnisse der Pilotversuche erfolgt in Kapitel 4.1.

3.2 Ergänzende Literaturdaten

Basierend auf einer Literaturrecherche im Bereich der Laubholzverklebung wurden ergänzende Datenbeispiele zusammengetragen. Zur Vergleichbarkeit mit den Pilotversuchen wurde bei der Auswahl der Quellen darauf geachtet, dass ein analoges Konzept von Einflussfaktoren (Robustheitsfaktoren) und Qualitätsmerkmalen verwendet wurde.

Tabelle 13 gibt einen Überblick über die ausgewählten Datenbeispiele mit den verwendeten Versuchsparametern, den ausgewählten Robustheitsfaktoren sowie den verfügbaren Qualitätsmerkmalen.

Die Auswertung und Diskussion der Ergebnisse der ergänzenden Literaturdaten erfolgt in Kapitel 4.2. Zur besseren Nachvollziehbarkeit wurden für die Auswertungen die Bezeichnungen und Reihenfolge der Versuchsvarianten (Holzarten, Klebstoffe) von der Literaturquelle übernommen.

Tabelle 13: Übersicht über die ergänzenden Literaturdaten

Datenquelle ¹⁾		Versuchsparameter	Robustheitsparameter	
			Robustheitsfaktor	Qualitätsmerkmale
L1	WHFF 2017.18 (Arnold et al. 2019)	- Holzarten: BU, ES - Klebstoffe: MF, PUR	6 Verklebungsvarianten	- Klebfugendicke - Delaminierung - Blockscherfestigkeit inkl. Holzbruchanteil
L2	BFH (Frühwald et al. 2003)	- Holzarten: BU - Klebstoffe: MUF, PRF, PUR	Lamellendicke	- Delaminierung
L3	TUM1 (Schmidt et al. 2010)	- Holzarten: BU - Klebstoffe: MUF	geschlossene Wartezeit	- Delaminierung - Blockscherfestigkeit inkl. Holzbruchanteil
L4	ETHZ/BFH (Ammann et al. 2016)	- Holzarten: ES - Klebstoffe: MUF (verschiedene Harz-Härter-Verhältnisse)	geschlossene Wartezeit	- Delaminierung - Zugscherfestigkeit A1 + A4
L5	TI/UHH (Luedtke et al. 2015)	- Holzarten: BU, EI, ES, FI - Klebstoffe: PUR (o/m Primer) (- weitere: Oberfläche, Presszeit)	Holzart	- Delaminierung - Blockscherfestigkeit
L6	TUM2 (Jiang et al. 2014)	- Holzarten: BU, ES, FI, LA - Klebstoffe: EPI, MUF, PRF, PUR (- weitere: Oberfläche)	Klebstoff	- Delaminierung - Blockscherfestigkeit inkl. Holzbruchanteil - Zugscherfestigkeit A1 + A4

¹⁾ detaillierte Quellenangaben siehe Literaturverzeichnis

4 Ergebnisse

Um eine klare Trennung zwischen den in diesem Projekt erzeugten Messdaten und den ergänzenden Literaturdaten sicherzustellen, erfolgt die Darstellung der Ergebnisse separat für die Pilotversuche in Kapitel 4.1 und für die ergänzenden Literaturdaten in Kapitel 4.2. Die Schlussfolgerungen werden dann gesamthaft in Kapitel 5 gezogen.

Die Tabelle in Anhang 3 gibt einen Gesamtüberblick über alle Versuchsparameter und Qualitätsmerkmale sowohl für die Pilotversuche als auch für die ergänzenden Literaturdaten.

4.1 Pilotversuche

Mit den im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Pilotversuchen wurde der Einfluss der 3 Verklebungsparameter Pressdruck (verknüpft mit Formschluss), Holzkonditionierung und geschlossene Wartezeit auf die 4 Qualitätsmerkmale Klebfugendicke, Delaminierung, Holzbruchanteil und relative Fugenfestigkeit untersucht (siehe Kapitel 3.1).

Bild 12 gibt einen kompakten Überblick über die Ergebnisse dieser Pilotversuche. Tabelle 14 zeigt die Zusammenhangs-Tendenzen zwischen den verschiedenen Robustheitsfaktoren und Qualitätsmerkmalen. Anhand Bild 13 können die Streuungen der Qualitätsmerkmale zwischen den Stufen der Robustheitsfaktoren in den verschiedenen Versuchsserien verglichen werden. Schliesslich ist in Bild 14 der berechnete Robustheitsindex (siehe Kapitel 2.3) für alle Versuchsvarianten zusammengestellt.

Feststellungen / Bewertung:

- Augenfällig ist der meist deutliche Einfluss der **Robustheitsfaktoren** auf die Klebfugendicke (Bild 12 oberste Diagramm-Reihe), während der Einfluss auf die Delaminierung, den Holzbruchanteil oder die relative Fugenfestigkeit insgesamt eher gering und nur punktuell vorhanden zu sein scheint (Bild 12 untere Diagramm-Reihen):
 - Ein höherer **Pressdruck** in Versuchsserie S1 führte tendenziell zu einer leicht besseren Verklebungsqualität (Bild 12 linke Diagramm-Spalte). Der empfohlene Pressdruck von 1.2 N/mm² scheint dabei recht optimal zu sein, eine weitere Erhöhung des Pressdruckes brachte keine weitere Qualitätsverbesserung. Die beste Verklebungsqualität wurde in dieser Versuchsreihe erwartungsgemäss mit der geprierten PUR-Variante erzielt, während der Verzicht auf den Primer oder ein schlechterer Formschluss die Verklebungsqualität negativ beeinflussten.
 - Eine hohe **Holzfeuchte** der Fügeiteile (Lamellen) hatte in Versuchsserie S2 tendenziell einen negativen Effekt auf die Verklebungsqualität (Bild 12 mittlere Diagramm-Spalte). Besonders auffällig ist dies bei der PURp-Verklebung von Esche, wo sowohl Delaminierung, Holzbruchanteil und relative Fugenfestigkeit reduzierte Werte aufweisen. Bezüglich Delaminierung scheint bei Esche auch die MUF-Verklebung bei hoher Holzfeuchte heikel zu sein.
 - Die **geschlossene Wartezeit** bei der MUF-Verklebung in Versuchsserie S3 zeigte zwar einen deutlichen Einfluss auf die Klebfugendicke, hatte jedoch keinen relevanten Effekt auf eines der 3 hauptsächlichen Qualitätsmerkmale (Bild 12 rechte Diagramm-Spalte). Die MUF-Verklebung in dieser Versuchsreihe führte generell bei allen 3 Holzarten zu einer hervorragenden Verklebungsqualität.
- Die **Kategorisierung der Zusammenhangs-Tendenzen** in Tabelle 14 bestätigt die anhand der Verlaufsgrafiken bereits beschriebenen Effekte. Für die primären Qualitätsmerkmale Delaminierung, Holzbruchanteil und relative Fugenfestigkeit ist für die meisten Fälle kein Zusammenhang zwischen Robustheitsfaktor und Qualitätsmerkmal zu erkennen (grüne Schattierung). Mehrere negative Effekte (blaue Schattierung) sind beim Robustheitsfaktor Holzfeuchte vorhanden, während sich die positiven Effekte (gelbe Schattierung) beim Robustheitsfaktor Pressdruck (insbesondere bei schlechtem Formschluss) konzentrieren

- Der **Vergleich der Streuungen** (Standard-Abweichungen) der Qualitätsmerkmale zwischen den Stufen der Robustheitsfaktoren (Bild 13) zeigt für die Klebfugendicke vergleichsweise hohe Werte bei den Proben mit schlechtem Formschluss in Versuchsserie 1 (Pressdruck) sowie bei den MUF-Verklebungen in Versuchsserie 2 (Holzfeuchte) und 3 (geschlossene Wartezeit).

Das Muster der Streuungen über die verschiedenen Versuchsvarianten weist bei den primären Qualitätsmerkmalen Delaminierung, Holzbruchanteil und relative Fugenfestigkeit eine gewisse Ähnlichkeit auf. Dabei sticht wiederum die erhöhte Streuung bei der PURp-Verklebung von Esche in Versuchsserie S2 sowie bei einem schlechten Formschluss in Versuchsserie S1 hervor.

- Der berechnete **Robustheits-Index** (Bild 14) ergibt für die Klebfugendicke eine eher überproportionale Streuung dieses Qualitätsmerkmals gegenüber der Streuung des Robustheitsfaktors (Robustheits-Index > 1), während die primären Qualitätsmerkmale Delaminierung, Holzbruchanteil und relative Fugenfestigkeit über die Stufen der Robustheitsfaktoren eine relativ geringe Reaktion (Robustheitsindex < 1) zeigen. Die Referenz-Streuungen (Variationskoeffizienten) der 3 Robustheitsfaktoren Pressdruck, Holzfeuchte und geschlossene Wartezeit betragen dabei 76%, 41% und 71%.

Die Robustheits-Indexe der primären Qualitätsmerkmale Delaminierung, Holzbruchanteil und relative Fugenfestigkeit (Bild 14 unten) liegen in einer ähnlichen Größenordnung und deuten wiederum auf die bereits identifizierten 'problematischen' Versuchsvarianten hin (PURp-Verklebung von Esche in Versuchsserie S2 sowie schlechter Formschluss in Versuchsserie S1). Als besonders 'robust' gegenüber Änderungen der geschlossenen Wartezeit erscheinen die MUF-Verklebungen in Versuchsserie 3 (Robustheitsindex < 0.1).

Bild 12: Einfluss der Verklebungsparameter auf die verschiedenen Qualitätsmerkmale

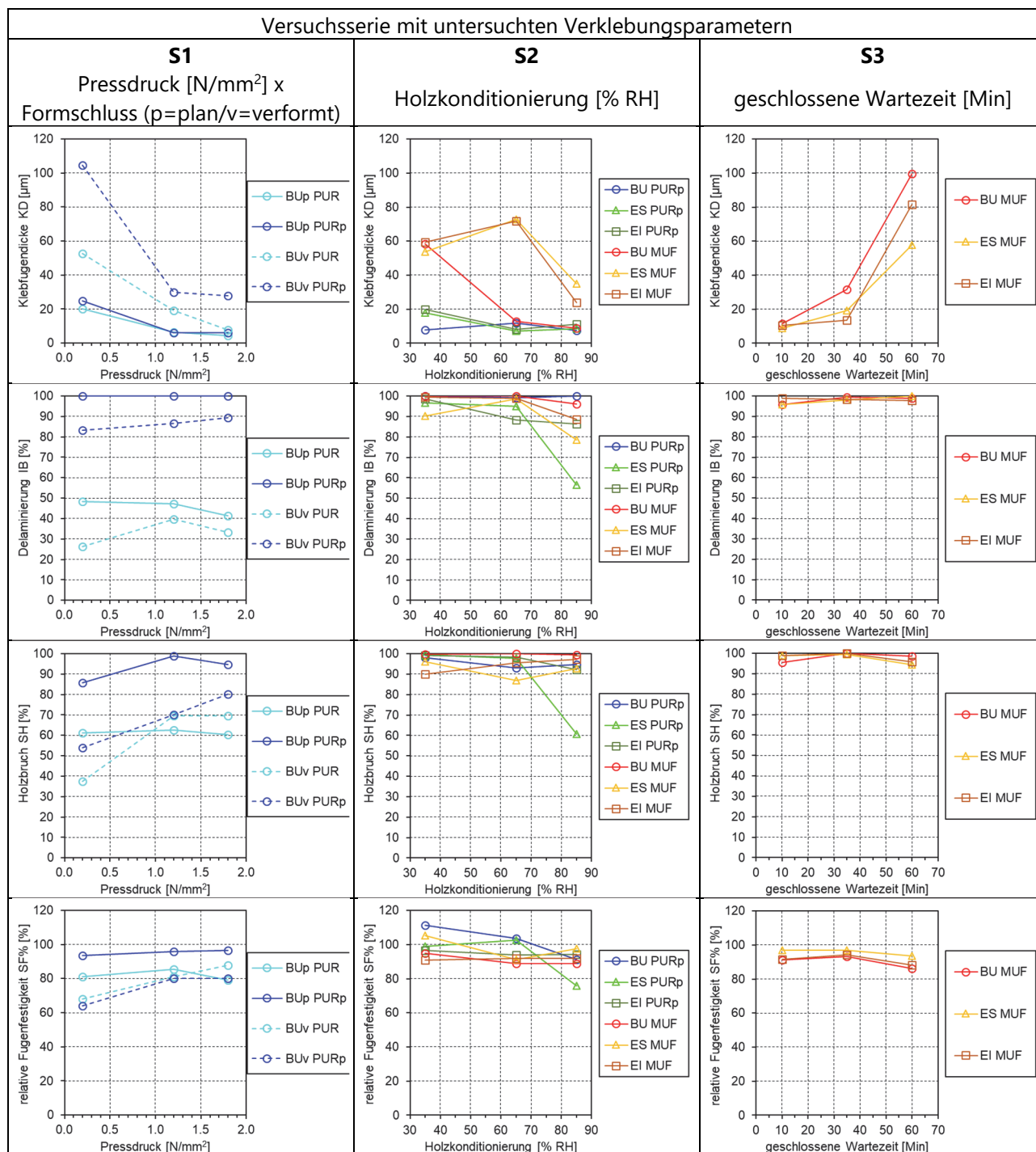


Tabelle 14: Zusammenhangs-Tendenz zwischen Robustheitsfaktoren und Qualitätsmerkmalen

Qualitätsmerkmal	Robustheitsfaktor												
	Pressdruck				Holzfeuchte						geschl. Wartezeit		
	BU p		BU v		BU		ES		EI		BU	ES	EI
Klebfugendicke KD [µm]	↘	↘	↘	↘	—	↘	↘	↘	↘	↘	↗	↗	↗
Delaminierung IB [%]	↘	—	↗	↗	—	↘	↘	↘	↘	↘	—	—	—
Holzbruch SH [%]	—	↗	↗	↗	—	—	↘	—	↘	↗	—	—	—
relative Fugenfestigkeit SF% [%]	—	—	↗	↗	↘	—	↘	—	—	—	—	—	—

Legende

- Klebstoffe:

PUR	PURp	MUF
-----	------	-----

- Tendenz Zusammenhang:

Richtung

neutral	positiv	negativ
---------	---------	---------

Stärke

—	kein
↗ ↘	schwach
↗ ↘	klar

Bild 13: Vergleich der Streuungen der Qualitätsmerkmale (MW über Wiederholungsproben pro Verklebungsvariante) zwischen den Stufen der Robustheitsfaktoren in den verschiedenen Versuchsserien

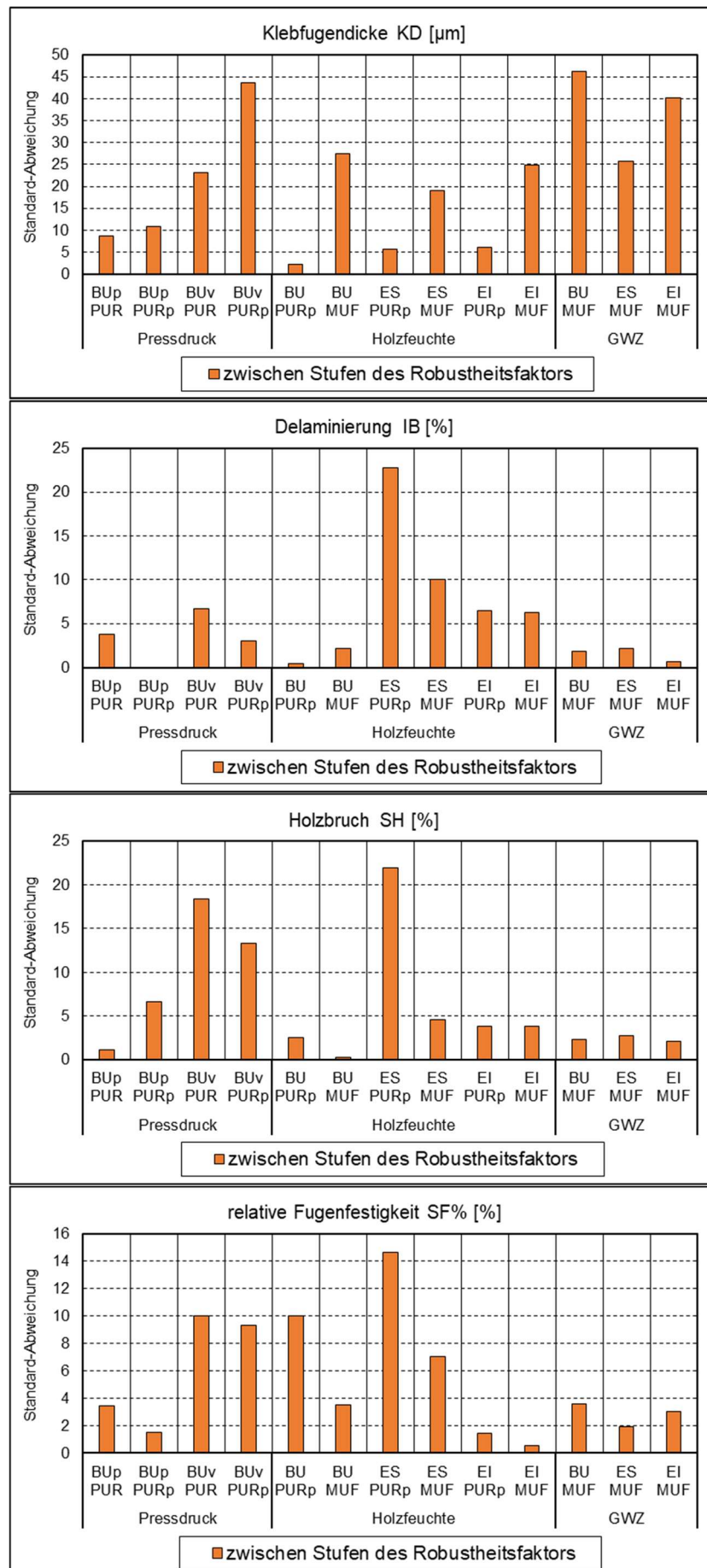
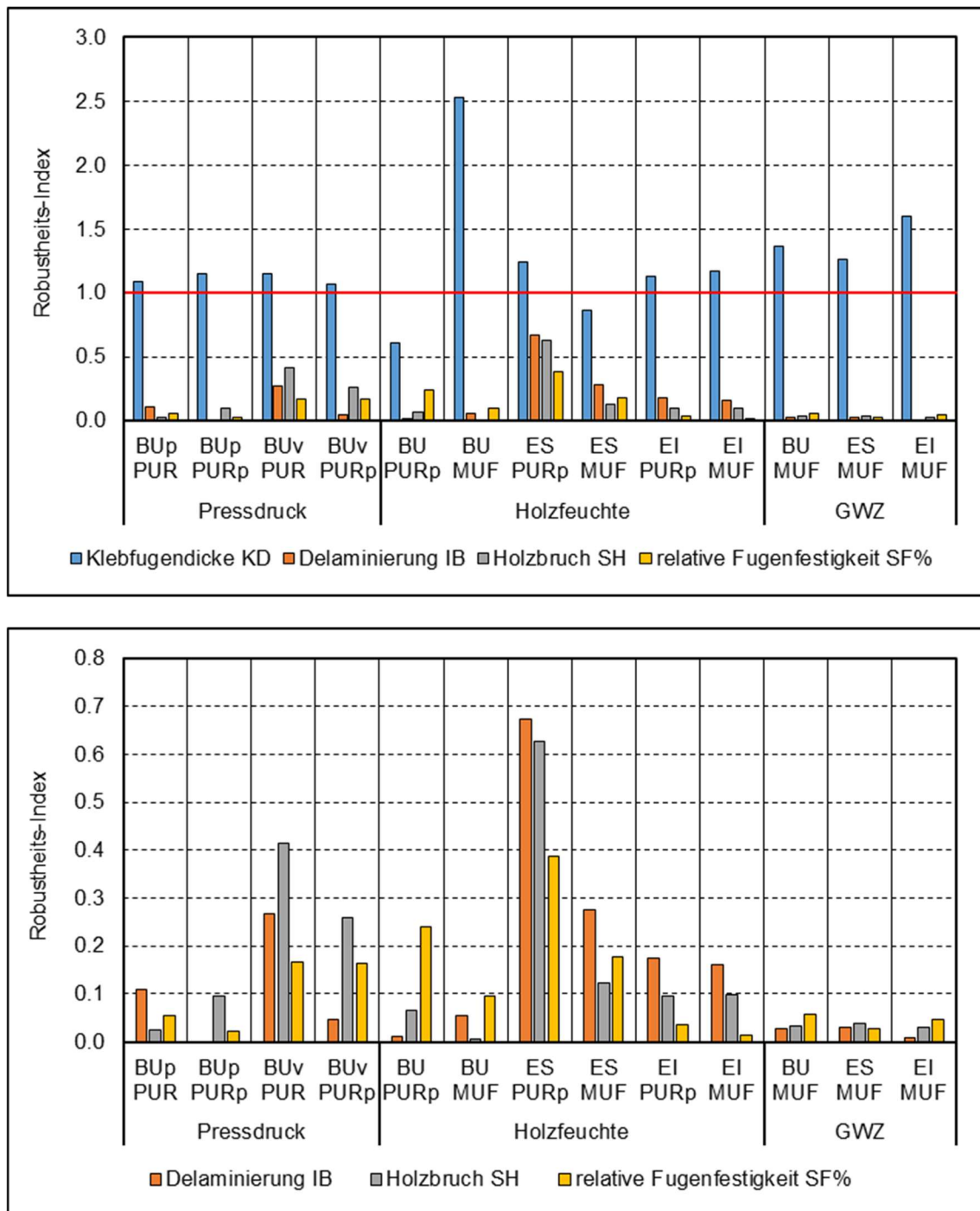


Bild 14: Robustheits-Index aller 4 Qualitätsmerkmale in den Pilotversuchen (oben) und für die 3 Qualitätsmerkmale mit tiefem Robustheits-Index mit angepasster Skalierung der Vertikalachse (unten)



4.2 Beispiele aus Literaturdaten

4.2.1 L1 (Arnold et al. 2019)

Die Versuche in diesem früheren Projekt hatten unter anderem zum Ziel, die Eignung der in der SN EN 14080 für die qualitätsgesicherte Produktion von Brettschichtholz aus Nadelholz verwendeten Prüfmethode für die Anwendung bei verklebtem Laubholz zu untersuchen. Die Untersuchungen erfolgten an laborverklebten BSH-Abschnitten (8 Lamellen, Dicke 30 mm) aus Buche und Esche in 6 Verklebungsvarianten, wobei neben einwandfreien bewusst auch nicht optimale Verklebungen einbezogen wurden, um Fehlverklebungen zu simulieren respektive eine Veränderung der Qualitätsmerkmale zu provozieren (Tabellen 15 und 16).

Bild 15 zeigt den Einfluss der 6 Verklebungsvarianten auf das Mittelwertsniveau der 4 Qualitätsmerkmale (3 Wiederholungsproben). Zur Robustheits-Beurteilung sind in Bild 16 die Streuungen (Standard-Abweichung) der Qualitätsmerkmale Klebfugendicke, Delaminierung, Holzbruchanteil und relative Fugenfestigkeit zwischen 7 Fugen innerhalb der BSH-Querschnitte und zwischen 3 Abschnittsmittelwerten (Wiederholungsproben mit unterschiedlicher Jahrringstellung der Lamellen) für die 6 Verklebungsvarianten dargestellt.

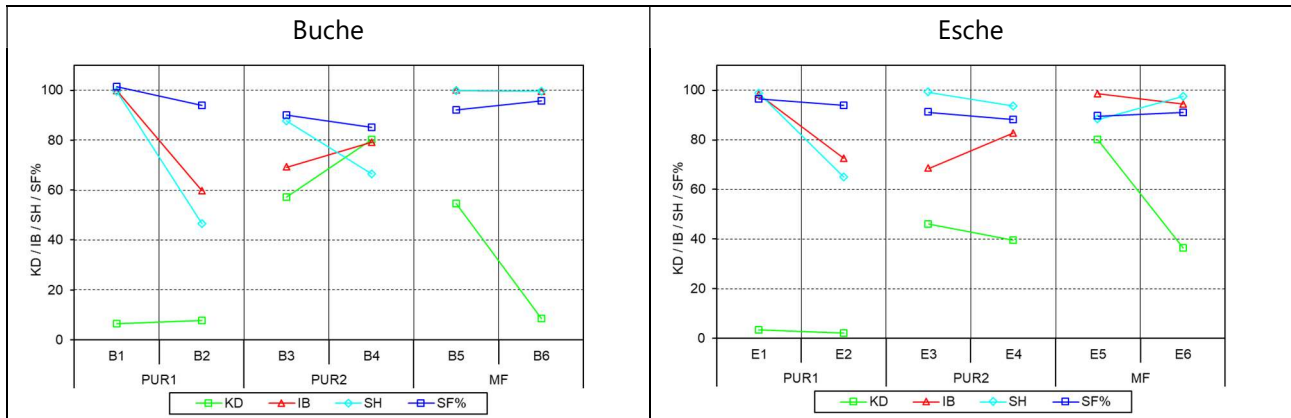
Tabelle 15: Versuchs- und Robustheitsparameter

Datenquelle		Versuchsparemeter	Robustheitsparameter	
			Robustheitsfaktor	Qualitätsmerkmale
L1	WHFF 2017.18 (Arnold et al. 2019)	- Holzarten: BU, ES - Klebstoffe: MF, PUR	6 Verklebungsvarianten	- Klebfugendicke - Delaminierung - Blockscherfestigkeit inkl. Holzbruchanteil

Tabelle 16: 6 Verklebungsvarianten mit 3 Klebstoffen, teilweise mit Abweichungen von den Vorgaben der Klebstoffhersteller

Variante	1	2	3	4	5	6
Klebstoff	PUR1		PUR2		MF	
Verarbeitung	nach Vorgabe	mit Abweichung	nach Vorgabe	mit Abweichung	nach Vorgabe	mit Abweichung
Abweichungen gegenüber Vorgaben Klebstoffhersteller		kein Primer		geringere Klebstoffmenge		geringere Klebstoffmenge
				geringerer Pressdruck		keine geschl. Zeit

Bild 15: Einfluss von 6 Verklebungsvarianten auf verschiedene Qualitätsmerkmale bei Buche und Esche

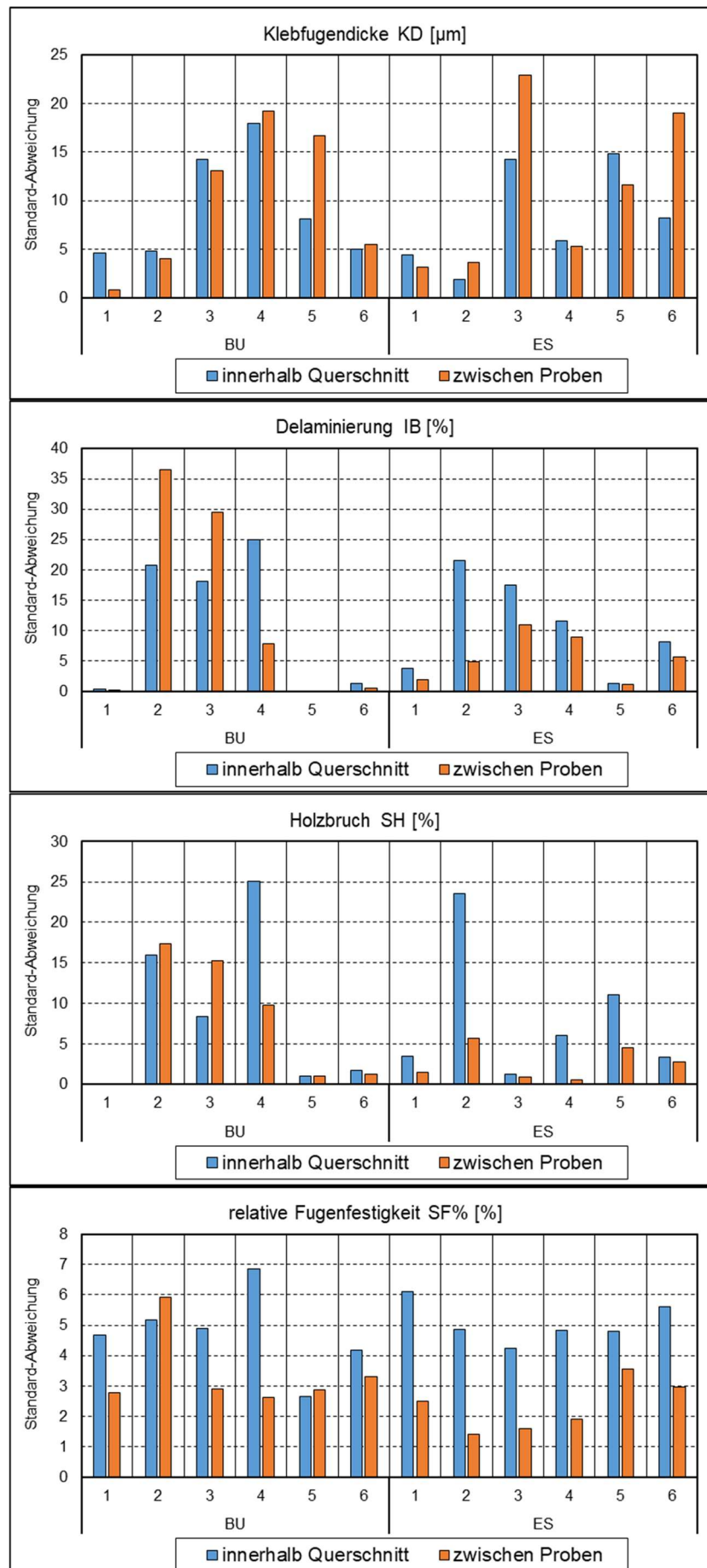


Qualitätsmerkmale: **KD**: Klebfugendicke [μm], **IB**: intakter Klebfugenanteil nach Delaminierung [%], **SH**: Holzbruchanteil [%], **SF%**: relative Fugenfestigkeit [%]

Feststellungen / Bewertung:

- Die **Klebfugendicke** schwankte naturgemäss beträchtlich zwischen den verschiedenen Klebstoffsystemen (Bild 15). Aufgrund der grundsätzlich Klebstoff-spezifisch unterschiedlichen Klebfugendicke ist diese generell nur beschränkt als vergleichendes Qualitätsmerkmal geeignet. Insbesondere bei der **Delaminierung** und beim **Holzbruchanteil** sind bei einzelnen PUR-Verklebungsvarianten (2, 3 und 4) Anzeichen für eine reduzierte Verklebungsqualität zu erkennen. Bei der **relativen Fugenfestigkeit** waren eher geringe Unterschiede zwischen den Verklebungsvarianten vorhanden. Mit den MF-Verklebungen wurde eine gute Verklebungsqualität erreicht. Buche und Esche reagierten insgesamt ähnlich.
- Eine vergleichsweise grosse Streuung in Bild 16 deutet bei einzelnen Verklebungsvarianten auf eine heterogene Verklebungsqualität hin, während umgekehrt eine kleine Streuung ein Hinweis auf eine robuste, gleichmässige Verklebungsqualität ist.
- Die Streuungen der Qualitätsmerkmale zwischen den 7 Fugen innerhalb der BSH-Querschnitte und zwischen den 3 Wiederholungsproben liegen generell in einer ähnlichen Grössenordnung. Dies kann dahingehend gedeutet werden, dass die Streuungen in diesem Beispiel nicht Proben-individuell sind, sondern charakteristisch für die einzelnen Verklebungsvarianten und damit geeignet für eine Robustheits-Beurteilung.
- Die Streuung der **Klebfugendicke** ist bei den Verklebungsvarianten 1 und 2 aufgrund der sehr geringen Klebfugendicke ($<10 \mu\text{m}$) sehr klein. Bei den übrigen Verklebungsvarianten erscheint sie unspezifisch.
- Bei der **Delaminierung** und dem **Holzbruchanteil** zeigen sich zwischen den verschiedenen Verklebungsvarianten recht grosse Unterschiede. Bei den schon aufgrund der reduzierten Verklebungsqualität auffälligen PUR-Verklebungsvarianten 2, 3 und 4 sind die Streuungen deutlich erhöht und deuten auf eine (unerwünschte) Heterogenität der Verklebungsqualität hin. Bei Buche scheinen die Effekte etwas ausgeprägter zu sein als bei Esche.
- Die Streuung der **relativen Fugenfestigkeit** ist für alle Verklebungsvarianten ähnlich und eher unspezifisch. Lediglich bei Esche sind die Streuungen zwischen den Wiederholungsproben etwas geringer als innerhalb der BSH-Querschnitte.

Bild 16: Vergleich der Streuungen der Qualitätsmerkmale zwischen den 7 Fugen innerhalb der BSH-Querschnitte und zwischen den 3 Wiederholungsproben



4.2.2 L2 (Frühwald et al. 2003)

Das Hauptziel dieses Projektes war die Erarbeitung einer Entwicklungsstrategie für hochwertige BSH-Produkte aus Buchenholz. Im Rahmen der Untersuchungen wurde auch die Bedeutung der Lamellendicke auf die Verklebungsqualität erkannt und untersucht.

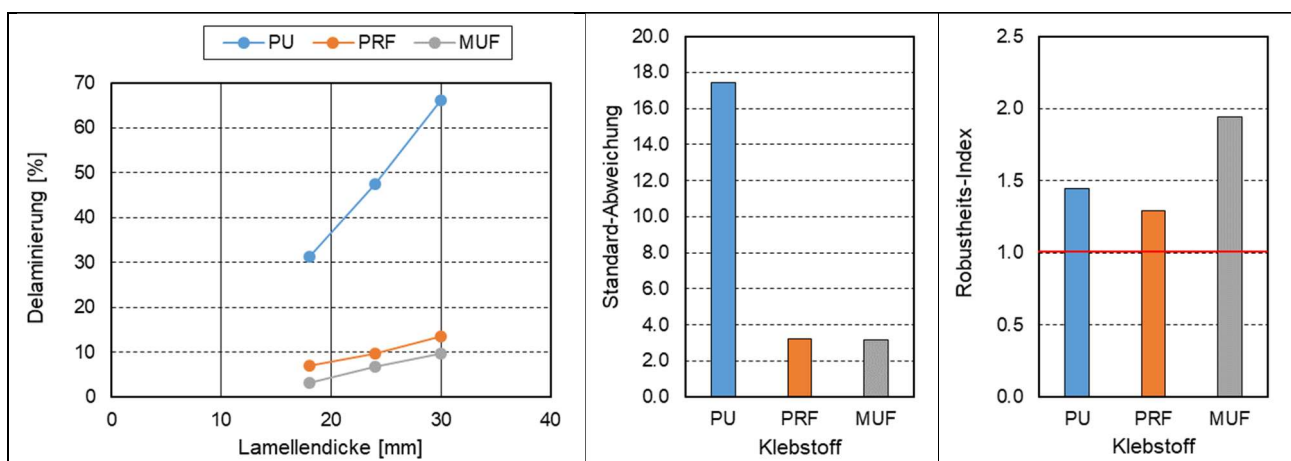
Die Untersuchungen (Tabelle 17) erfolgten an Proben aus BSH-Abschnitten aus Buche (Lamellendicken 18, 24, 30 mm) und 3 verschiedenen Klebstoffvarianten (PU, PRF, MUF).

Für die Robustheits-Betrachtung wurden die Ergebnisse der Delaminierungsbeständigkeit in Abhängigkeit der Lamellendicke ausgewählt. Bild 17 zeigt den Einfluss der Lamellendicke auf die Delaminierung bei den 3 Klebstoffen und die entsprechenden Streuungen zwischen den 3 Lamellendicken sowie den berechneten Robustheits-Index.

Tabelle 17: Versuchs- und Robustheitsparameter

Datenquelle		Versuchsparameter	Robustheitsparameter	
			Robustheitsfaktor	Qualitätsmerkmale
L2	BFH (Frühwald et al. 2003)	- Holzarten: BU - Klebstoffe: MUF, PRF, PUR	Lamellendicke	- Delaminierung

Bild 17: Vergleich der Delaminierung in Abhängigkeit von Lamellendicke und Klebstofftyp (links), sowie entsprechende Streuung (Mitte) und berechneter Robustheits-Index (rechts) bezüglich des Robustheitsfaktors Lamellendicke



Feststellungen / Bewertung:

- Die Delaminierungen lagen bei der PU-Verklebung deutlich höher (>30%) als bei der Verklebung mit PRF oder MUF (bis 15%) und die Lamellendicke hatte bei der PU-Verklebung einen erheblich grösseren Einfluss. Der Zusammenhang zwischen Lamellendicke und Delaminierung verlief bei allen Varianten unabhängig vom Delaminierungsausmass nahezu linear.
- Die absolute Streuung (Standard-Abweichung) der Delaminierung zwischen den Proben mit verschiedenen Lamellendicken ist bei Verklebung mit PU dem höheren Niveau entsprechend höher als bei den anderen Klebstoffen. Dies ist ein Indikator für einen grossen Einfluss des Robustheitsfaktors Lamellendicke bezüglich Delaminierungsbeständigkeit bei der PU-Verklebung.
- Im Gegensatz zur Standard-Abweichung liegt der berechnete Robustheits-Index für alle 3 Klebstoffe in einer ähnlichen Grössenordnung und weist auf eine eher überproportionale Streuung dieses Qualitätsmerkmals gegenüber der Streuung des Robustheitsfaktors Lamellendicke hin (Robustheits-Index > 1). Aufgrund der grossen Unterschiede im Mittelwertsniveau der Delaminierung ist der Robustheits-Index in diesem Beispiel aber mit Vorsicht zu interpretieren.

4.2.3 L3 (Schmidt et al. 2010)

Der Hintergrund dieser Untersuchungen war die Idee, durch die Verwendung von Lamellen aus Buchenholz die Tragfähigkeit von Brettschichtholz zu verbessern. In der Arbeit wurde überprüft, inwieweit mit handelsüblichen Klebstoffsystemen und angepassten Verklebungsparametern Buchenholz für tragende Zwecke verklebt werden kann.

Die Untersuchungen (Tabelle 18) erfolgten an Proben aus BSH-Abschnitten aus Buche (Lamellendicke 30 mm) und 2 MUF-Klebstoffvarianten. Die Verklebungen erfolgten mit abgestuften Werten für die geschlossene Wartezeit von 30, 60 und 90 Minuten.

Für die Robustheits-Betrachtung wurden die Ergebnisse der Delaminierungsbeständigkeit und der Blockscherfestigkeit in Abhängigkeit von der geschlossenen Wartezeit ausgewählt. Bild 18 zeigt den Einfluss der geschlossenen Wartezeit auf 3 Qualitätsmerkmale bei den 2 MUF Klebstoffen sowie die entsprechenden Streuungen und den berechneten Robustheits-Index bezüglich des Robustheitsfaktors geschlossene Wartezeit.

Tabelle 18: Versuchs- und Robustheitsparameter

Datenquelle		Versuchsparameter	Robustheitsparameter	
			Robustheitsfaktor	Qualitätsmerkmale
L3	TUM1 (Schmidt et al. 2010)	- Holzarten: BU - Klebstoffe: MUF	geschlossene Wartezeit	- Delaminierung - Blockscherfestigkeit inkl. Holzbruchanteil

Feststellungen / Bewertung:

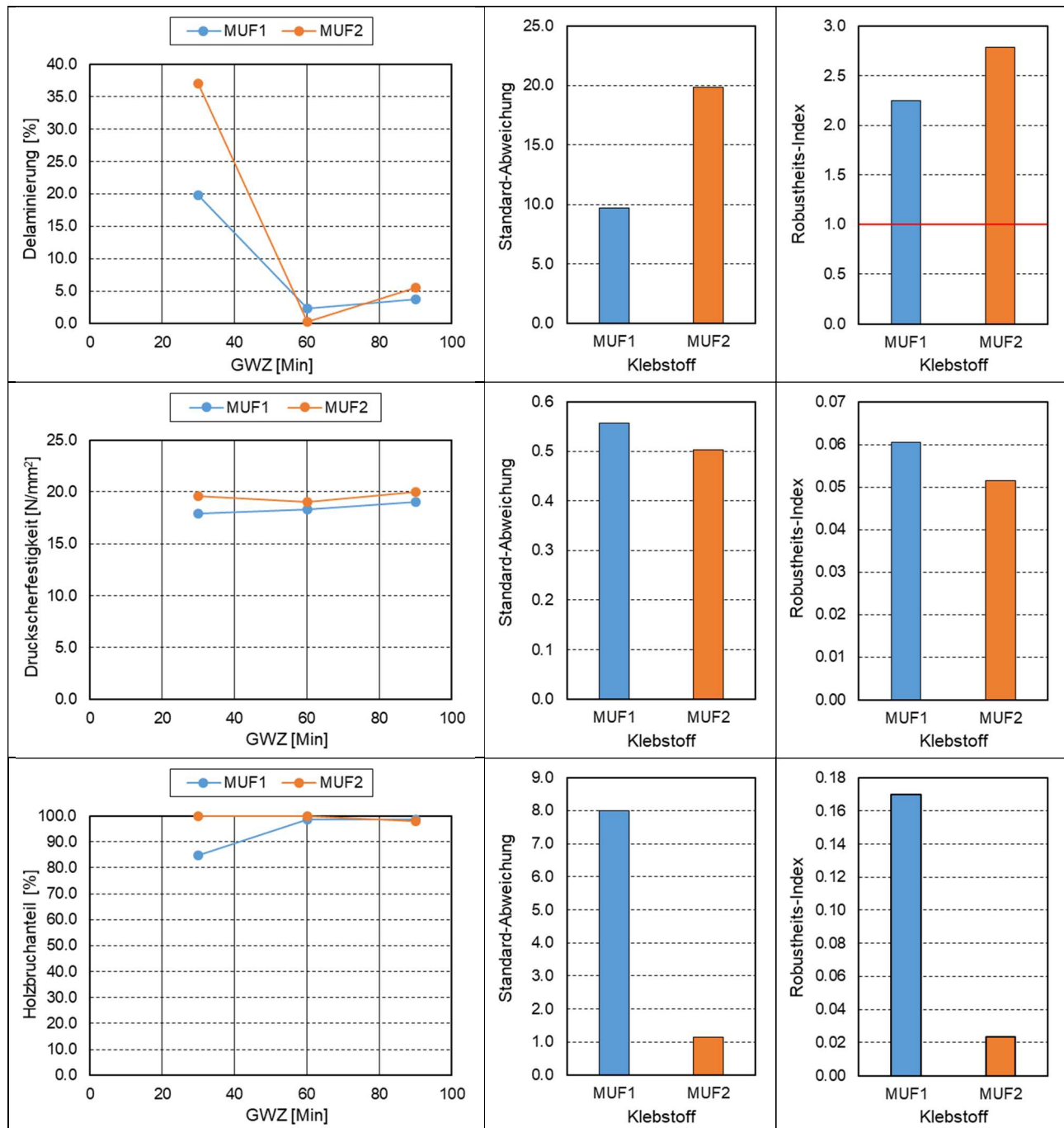
- Die geschlossene Wartezeit hatte einen sehr deutlichen Einfluss auf die **Delaminierungsbeständigkeit**, mit besseren Werten bei einer erhöhten Wartezeit. Ab einer geschlossenen Wartezeit von 60 Min erreichte die Delaminierungsbeständigkeit akzeptable Werte.

Die Unterschiede in den Streuungswerten sind ein Hinweis darauf, dass der Klebstoff MUF1 etwas weniger empfindlich auf Änderungen bei der geschlossenen Wartezeit reagiert als der Klebstoff MUF2. Diese Beobachtung bestätigt auch der berechnete Robustheits-Index, welcher für den MUF1-Klebstoff etwas tiefer liegt als für den MUF2-Klebstoff. Mit einem Wert >2 zeigt dieses Qualitätsmerkmal eine überproportionale Streuung gegenüber der Streuung des Robustheitsfaktors geschlossene Wartezeit.

- Auf die **Druckscherfestigkeit** hatten weder die geschlossene Wartezeit noch der Klebstoff einen relevanten Einfluss. Dies widerspiegelt sich auch in den sehr ähnlichen Streuungen und Robustheits-Index-Werten. Aufgrund der geringen Standard-Abweichung ergibt sich ein tiefer Robustheits-Index (<0.1).
- Beim **Holzbruchanteil** nach der Scherprüfung zeigte der MUF1-Klebstoff bei einer kurzen offenen Wartezeit (30 Min) einen leicht reduzierten Wert. Dies führt zu einem deutlichen Unterschied bei den Streuungs-Werten und dem Robustheits-Index. Angesichts des insgesamt geringen Effektes sollten diese Unterschiede allerdings nicht überbewertet werden (siehe Grafik der Messdaten in Bild 18 (linke Spalte)).
- Insgesamt scheint sich eine Erhöhung der geschlossenen Wartezeit von 30 auf 60 Minuten vorteilhaft auf die Verklebungsqualität auszuwirken. Eine weitere Erhöhung bringt jedoch keine zusätzliche Verbesserung.

Dieses Ergebnis steht etwas im Gegensatz zu den eigenen Pilotversuchen (Kapitel 4.1), wo bei einem anderen MUF-Klebstoff insbesondere bei der Delaminierung kein Effekt der geschlossenen Wartezeit festgestellt wurde. Dies zeigt, dass Effekte immer abhängig von den konkreten Materialkombinationen sind und Generalisierungen daher nur mit Vorsicht vorgenommen werden dürfen.

Bild 18: Vergleich der Qualitätsmerkmale in Abhängigkeit von geschlossener Wartezeit und Klebstoff (links), sowie entsprechende Streuung (Mitte) und berechneter Robustheits-Index (rechts) bezüglich des Robustheitsfaktors geschlossene Wartezeit



4.2.4 L4 (Ammann et al. 2016)

Diese Untersuchungen waren fokussiert auf die Beurteilung der Verklebungsqualität von Eschenholz für tragende Anwendungen und umfassten eine ganze Reihe von möglichen Einflussfaktoren (Oberflächenqualität, Klebstofftyp, geschlossene Wartezeit, Harz-Härter-Mischverhältnisse). Es zeigte sich, dass eine zuverlässige Verklebung von Eschenholz nicht einfach ist.

Die Untersuchungen (Tabelle 19) erfolgten sowohl an Proben aus industriell verklebten BSH-Abschnitten gemäss SN EN 302-2 (Lamellendicke 30 mm) als auch an Labor-verklebten Zugscherproben gemäss SN EN 302-1. Ein Teilversuch basiert auf einem MUF-Klebstoff in 3 verschiedenen Harz-Härter-Mischverhältnissen (100:35, 100:60 100:100) und 3 abgestuften Werten für die geschlossene Wartezeit (10, 20 und 30 Minuten).

Für die Robustheits-Betrachtung wurden die Ergebnisse der Delaminierungsbeständigkeit sowie der Zugscherfestigkeit in Abhängigkeit der geschlossenen Wartezeit und des Harz-Härter-Mischverhältnisses ausgewählt. Bild 19 zeigt den Einfluss der geschlossenen Wartezeit auf 3 Qualitätsmerkmale bei den verschiedenen Harz-Härter-Mischverhältnissen sowie die entsprechenden Streuungen und den berechneten Robustheits-Index bezüglich des Robustheitsfaktors geschlossene Wartezeit.

Tabelle 19: Versuchs- und Robustheitsparameter

Datenquelle		Versuchsparemeter	Robustheitsparameter	
			Robustheitsfaktor	Qualitätsmerkmale
L4	ETHZ/BFH (Ammann et al. 2016)	- Holzarten: ES - Klebstoffe: MUF (verschiedene Harz-Härter-Verhältnisse)	geschlossene Wartezeit	- Delaminierung - Zugscherfestigkeit A1 + A4

Feststellungen / Bewertung:

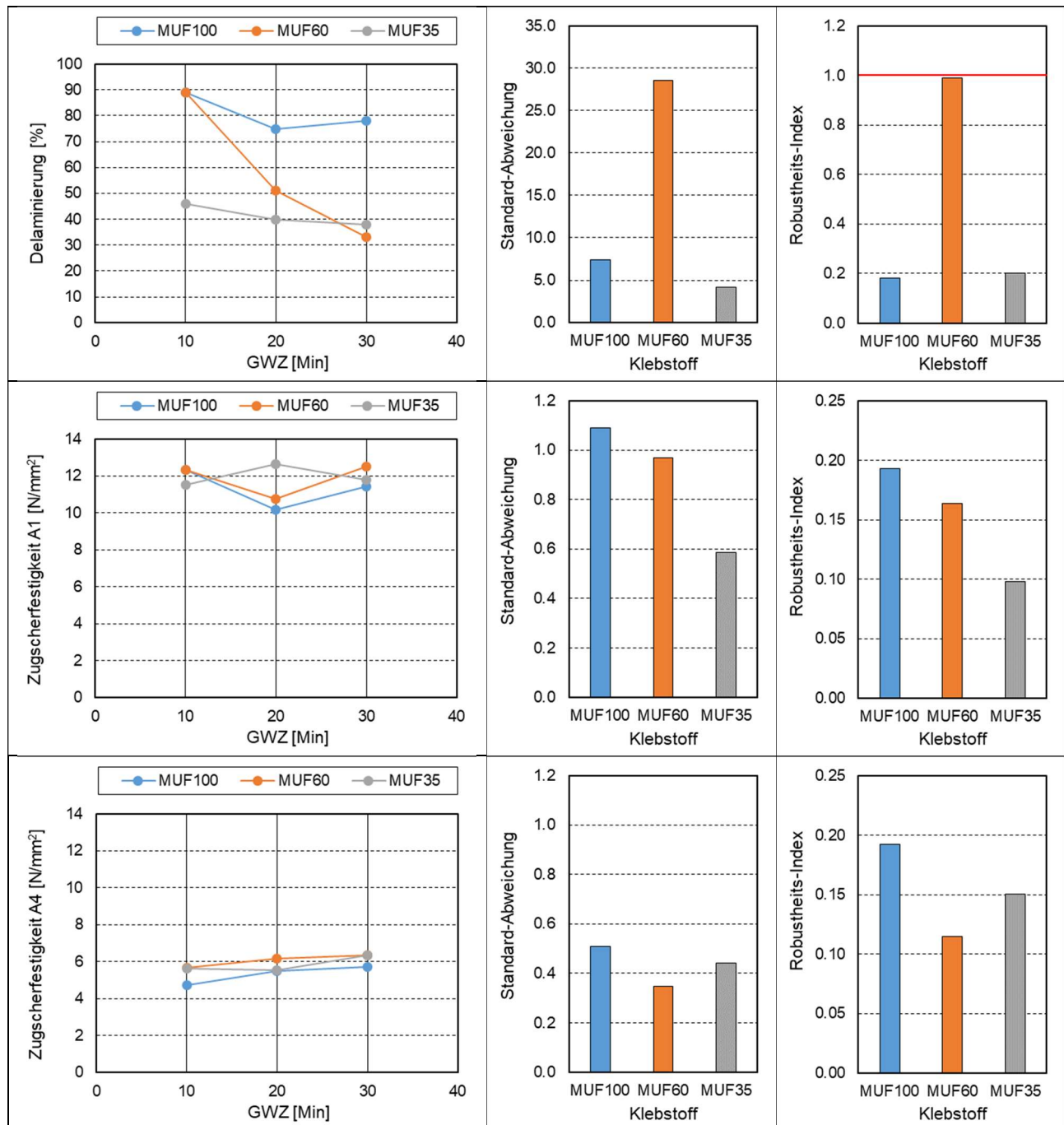
- Wie schon im vorangegangenen Beispiel führte eine Erhöhung der geschlossenen Wartezeit zu einer Verbesserung der **Delaminierungsbeständigkeit**. Das Ausmass der Delaminierung lag mit 30% bis 90% jedoch durchwegs sehr hoch. Der Effekt der geschlossenen Wartezeit war beim Klebstoff mit einem Harz-Härter-Mischverhältnis von 100:60 deutlich ausgeprägter als bei den anderen Harz-Härter-Mischverhältnissen. Unabhängig von der geschlossenen Wartezeit scheint sich ein tieferes Harz-Härter-Mischverhältnis bei diesem Klebstoff positiv auf die Delaminierungsbeständigkeit auszuwirken.

Der vergleichsweise grosse Effekt der geschlossenen Wartezeit bei einem Harz-Härter-Mischverhältnis von 100:60 resultiert in einer gegenüber den anderen Varianten erhöhten Streuung und einem höheren Robustheits-Index.

- Auf die **Zugscherfestigkeit** im trockenen Zustand (Behandlung A1) hatte die geschlossene Wartezeit keinen Einfluss, während im feuchten Zustand (Behandlung A4) ein leicht positiver Effekt bei einer höheren geschlossenen Wartezeit zu erkennen ist. Das Harz-Härter-Mischverhältnis scheint keinen Einfluss auf die Zugscherfestigkeit zu haben.

Die insgesamt geringen Effekte des Robustheitsfaktors geschlossene Wartezeit werden bestätigt durch die ähnlichen Streuungen und den tiefen Robustheits-Index. Zudem zeigen Streuung und Robustheits-Index in diesem Beispiel ein sehr ähnliches Muster.

Bild 19: Vergleich der Qualitätsmerkmale in Abhängigkeit von geschlossener Wartezeit und Harz-Härter-Mischverhältnis bei einem MUF-Klebstoff (links), sowie entsprechende Streuung (Mitte) und berechneter Robustheits-Index (rechts) bezüglich des Robustheitsfaktors geschlossene Wartezeit



4.2.5 L5 (Luedtke et al. 2015)

Dieses Projekt war der Verklebung von Laubholz für Holzbaustoffe mittels eines spezifischen 1K-PUR Klebstoffs mit Primer gewidmet. Untersucht wurde der Einfluss verschiedener Verklebungsparameter (Primereinsatz, Oberflächenbearbeitung, Presszeit) auf die Verklebungsqualität.

Die Untersuchungen (Tabelle 20) erfolgten an axial gepaarten, Labor-verklebten BSH-Abschnitten (Lamellendicke 30 mm) aus Buche, Eiche und Esche. Als Referenzholzart wurde auch Fichte mit einbezogen.

Für die Robustheits-Betrachtung wurden die Ergebnisse der Delaminierungsbeständigkeit und der Blockscherfestigkeit für konventionell gehobelte Oberflächen (peripheral planing) und einfache Presszeit in Abhängigkeit der Holzart und des Primereinsatzes ausgewählt. Aus Bild 20 ist der Einfluss der Holzart auf 2 Qualitätsmerkmale sowie die entsprechenden Streuungen zwischen den 4 Holzarten ersichtlich. Da der verwendete Robustheitsfaktor nominal skaliert ist, entfällt in diesem Beispiel die Berechnung des Robustheits-Indexes.

Tabelle 20: Versuchs- und Robustheitsparameter

Datenquelle		Versuchsparameter	Robustheitsparameter	
			Robustheitsfaktor	Qualitätsmerkmale
L5	TI/UHH (Luedtke et al. 2015)	- Holzarten: BU, EI, ES, FI - Klebstoffe: PUR (o/m Primer) (- weitere: Oberfläche, Presszeit)	Holzart	- Delaminierung - Blockscherfestigkeit

Feststellungen / Bewertung:

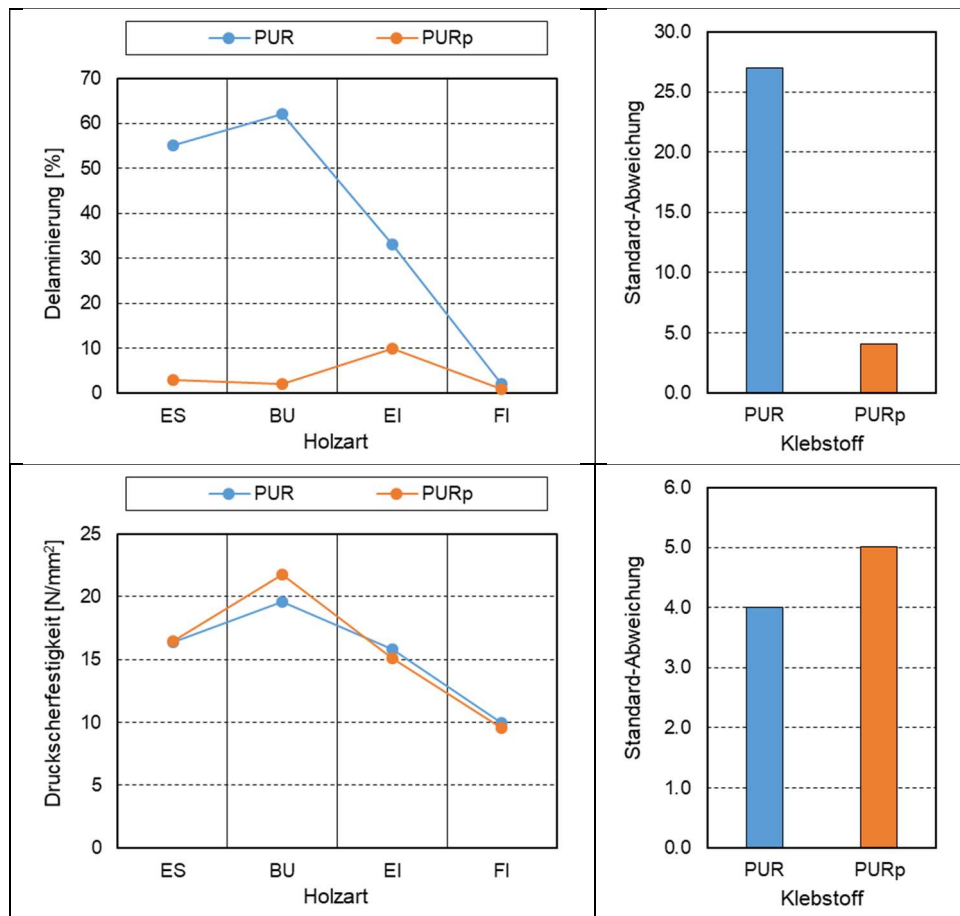
- Durch den Primereinsatz sank die **Delaminierung** bei Buche und Esche von über 55% auf unter 5%. Eiche zeigte zwar ohne Primereinsatz die geringste Delaminierung bei den einbezogenen Laubhölzern (33%), aber mit Primer ergab sich trotzdem keine überzeugende Delaminierungsbeständigkeit (10%). Bei Fichte wurde erwartungsgemäss auch ohne Primer eine hervorragende Delaminierungsbeständigkeit erreicht und der Primereinsatz brachte keine weitere Verbesserung.

Der grosse Effekt eines Primereinsatzes auf die Delaminierungsbeständigkeit zeigt sich auch anhand der Streuung zwischen den untersuchten Holzarten. Ohne Primereinsatz ist die Streuung sehr hoch (Standard-Abweichung von 25%) und sinkt mit Primereinsatz auf einen deutlich tieferen Wert (Standard-Abweichung <5%).

- Auf die **Druckscherfestigkeit** (im trockenen Zustand) hatte der Einsatz des Primers keinen erkennbaren Effekt. Vielmehr zeigten sich die bekannten Holzarten-spezifischen Unterschiede aufgrund der unterschiedlichen Dichten, mit den höchsten Werten bei Buche und den tiefsten bei Fichte. Diese Ergebnisse stehen etwas im Gegensatz zu den Pilotversuchen (Kapitel 4.1) und dem Beispiel L1 (Kapitel 4.2.1), wo sich bezüglich relativer Fugenfestigkeit leicht höhere Werte bei den geprimten Oberflächen ergaben.

Entsprechend des geringen Effektes eines Primereinsatzes zeigen sich auch nur geringe Unterschiede in der Streuung zwischen den untersuchten Holzarten für ungeprimte und geprimte Oberflächen.

Bild 20: Vergleich der Qualitätsmerkmale in Abhängigkeit der Holzart und des Primereinsatzes (links), sowie entsprechende Streuung bezüglich des Robustheitsfaktors Holzart (rechts)



Primereinsatz: PUR: Klebstoffeinsatz ohne Primer, PURp: Klebstoffeinsatz mit Primer

4.2.6 L6 (Jiang et al. 2014)

In diesem sehr umfangreichen Projekt wurden die Möglichkeiten der Verklebung verschiedener Holzarten und deren Verwendbarkeit als Brettschichtholz untersucht. Zusätzlich zu Kurzzeit-Klebstoffprüfungen mittels Zugscher-, Blockscher- und Delaminierungsprüfungen wurden auch Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Kleinträgern durchgeführt.

In den Untersuchungen (Tabelle 21) wurden neben den alternativen Nadelhölzern Lärche und Douglasie auch Buche und Esche als potenzielle Laubholzarten mit einbezogen. Die Verklebungen erfolgten mit einer breiten Auswahl an Klebstoffen (EPI, MUF, PRF, PUR). Weitere Untersuchungsaspekte waren das Alter der Oberfläche und die Methode der Oberflächenherstellung.

Für die Robustheits-Betrachtung wurden die Ergebnisse der Delaminierungs-, Blockscher- und Zugscherprüfungen an Proben mit identischer Holzarten/Klebstoff-Kombination und frisch gehobelten Oberflächen in Abhängigkeit des Klebstoffes ausgewählt. Aus Bild 21 ist der Einfluss des Klebstoffes auf 5 Qualitätsmerkmale sowie die entsprechenden Streuungen zwischen den 4 Klebstoffen ersichtlich. Da der verwendete Robustheitsfaktor nominal skaliert ist, entfällt auch in diesem Beispiel die Berechnung des Robustheits-Indexes.

Tabelle 21: Versuchs- und Robustheitsparameter

Datenquelle		Versuchsparameter	Robustheitsparameter	
			Robustheitsfaktor	Qualitätsmerkmale
L6	TUM2 (Jiang et al. 2014)	- Holzarten: BU, ES, FI, LA - Klebstoffe: EPI, MUF, PRF, PUR (- weitere: Oberfläche)	Klebstoff	- Delaminierung - Blockscherfestigkeit inkl. Holzbruchanteil - Zugscherfestigkeit A1 + A4

Feststellungen / Bewertung:

- Die **Delaminierungsbeständigkeit** war bei einer PRF-Verklebung bei allen Holzarten hervorragend. Delaminierungen <20% wurden auch bei einer MUF-Verklebung erreicht, während bei den EPI- und PUR-Verklebungen deutlich höhere Delaminierungen auftraten. Bei Fichte zeigte sich bei allen Klebstoffen eine sehr gute Delaminierungsbeständigkeit.

Die Unterschiede in der Verklebungsqualität der einzelnen Holzarten bezüglich einer Verklebung mit verschiedenen Klebstoffen zeigt sich aus dem Vergleich der Streuung zwischen den 4 Klebstoffen. Diese ist bei den Laubhölzern Esche und Buche hoch, bei Lärche etwas geringer und bei Fichte aufgrund der hervorragenden Delaminierungsbeständigkeit sehr klein. Dies zeigt die grosse Bedeutung der Wahl eines für die jeweilige Holzart geeigneten Klebstoffes.

- Bei den **Druckscherfestigkeiten** (im trockenen Zustand) zeigten sich die bekannten Holzarten-spezifischen Unterschiede, mit den höchsten Festigkeiten bei Buche und den tiefsten bei Fichte. Der Einfluss der Klebstoffe war gering.

Dies zeigt sich auch anhand der geringen Streuung zwischen den 4 Klebstoffen, welche lediglich bei Esche aufgrund der höheren Festigkeit beim EPI-Klebstoff gegenüber den anderen Holzarten etwas höher liegt.

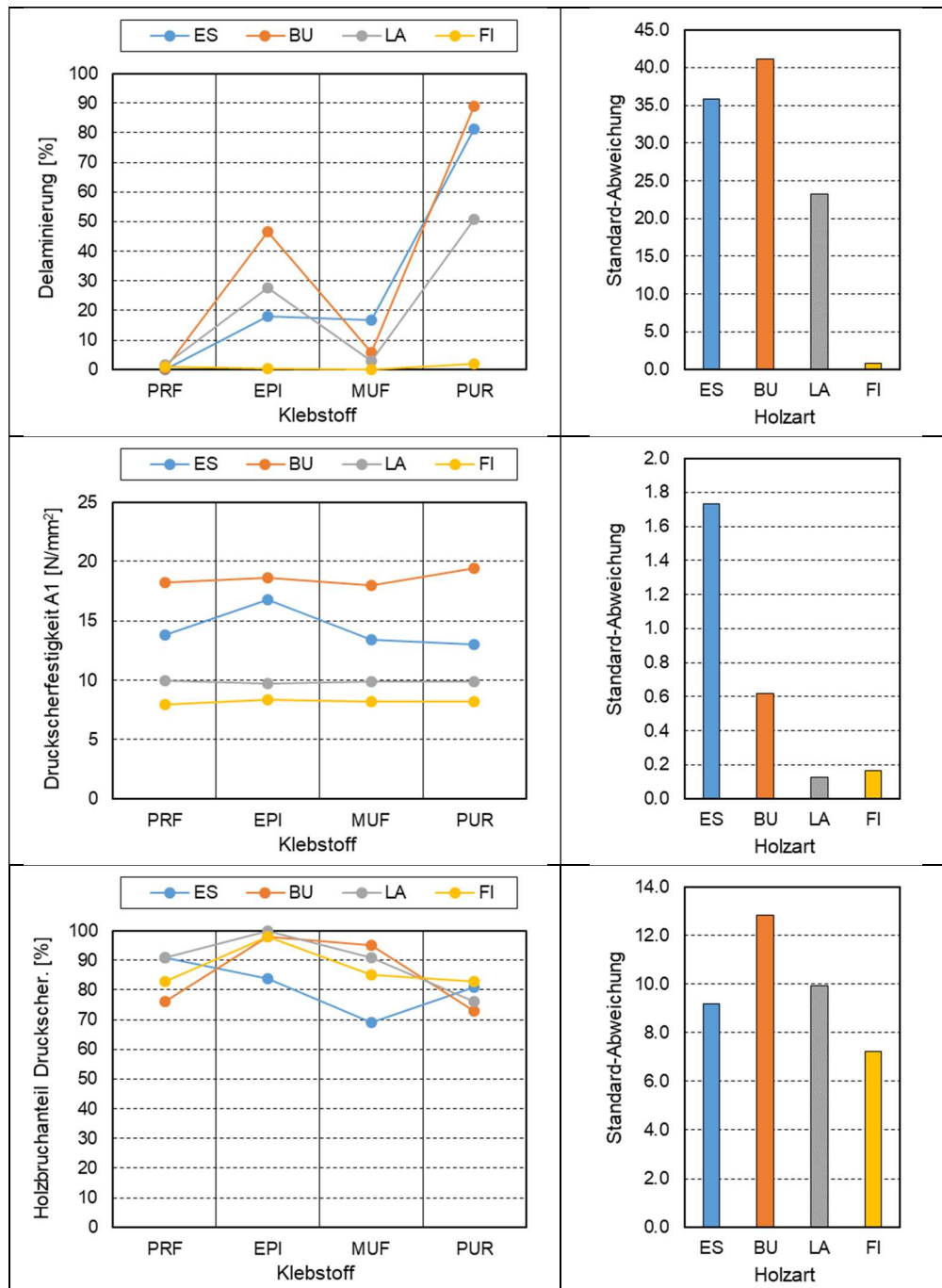
- Der **Holzbruchanteil** zeigte bezüglich Klebstoff-Effekt für Buche, Lärche und Fichte ein ähnliches Muster, welches auf einen leichten, aber systematischen Klebstoff-Effekt hindeutet. Bei den EPI-Verklebungen lag der Holzbruchanteil nahe bei 100%, bei den MUF-Verklebungen etwas tiefer um 90% und bei den PRF-respektive PUR-Verklebungen jeweils leicht über respektive unter 80%. Die Ergebnisse bei Esche wichen beim EPI- und MUF- Klebstoff von diesem Muster ab.

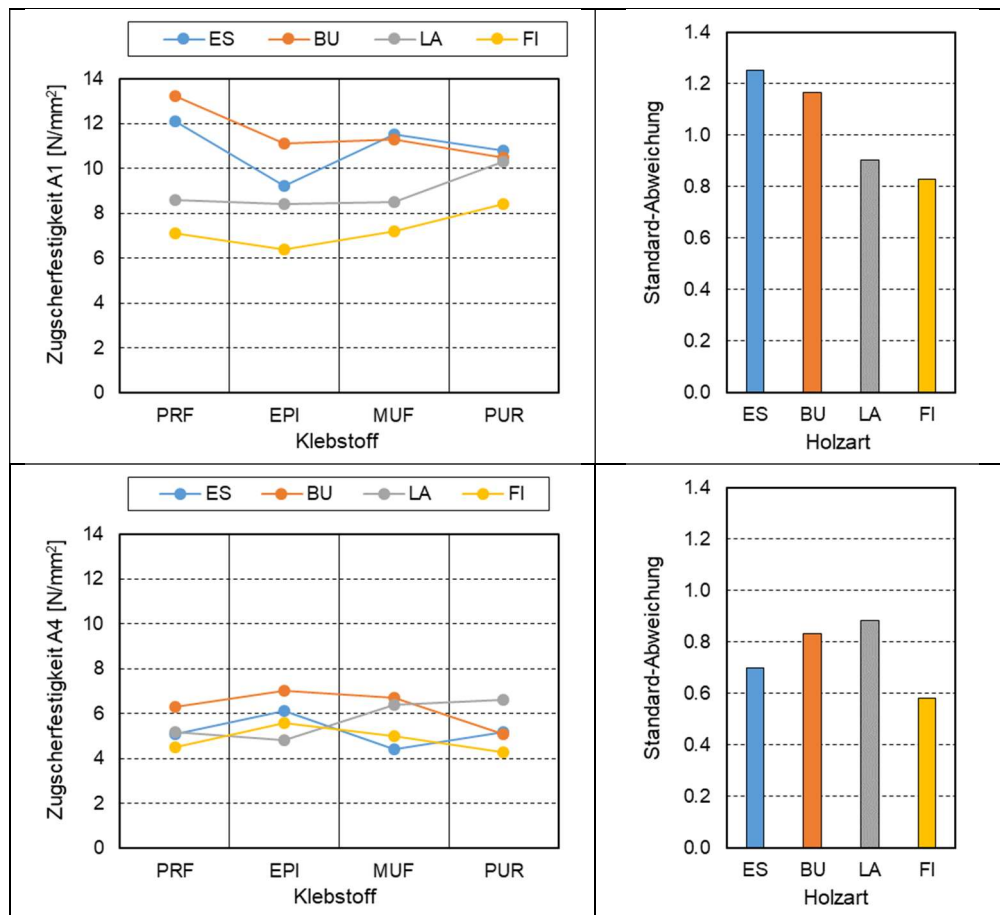
Die Streuung zwischen den 4 Klebstoffen liegt bei allen 4 Holzarten in der gleichen Grössenordnung. An den Streuungen ist das abweichende Verhalten der Esche wegen der in der gleichen Grössenordnung liegenden Abweichungen zu tieferen Werten nicht zu erkennen.

- Bei den **Zugscherfestigkeiten** zeigte sich sowohl im trockenen (Behandlung A1) als auch im feuchten Zustand (Behandlung A4) ein leichter Einfluss der Holzart, welcher aber gegenüber den Druckscherfestigkeiten weniger ausgeprägt war. Eindeutige Unterschiede bezüglich des Klebstoffes sind nicht erkennbar.

Die Einschätzung des geringen Klebstoff-Effektes wird auch durch den Vergleich der Streuungen zwischen den 4 Klebstoffen gestützt, welche bei allen 4 Holzarten in der gleichen Grössenordnung liegen.

Bild 21: Vergleich der Qualitätsmerkmale (links) und deren Streuung (rechts) für die untersuchten Robustheitsfaktoren aus Literaturquelle L6





5 Schlussfolgerungen

Die Projektergebnisse erlauben die folgenden generellen Schlussfolgerungen:

- Der Einbezug von 'Robustheit' als Qualitätskriterium bei der Entwicklung und Auswahl von Klebstoffen könnte zu einem verbesserten Verständnis der Laubholzverklebung und einer zuverlässigen, konstanten Verklebungsqualität beitragen. Dieser Ansatz wird vorgeschlagen als Ergänzung respektive Alternative zu einer engen Steuerung des Verklebungsprozesses. Damit könnte der Rahmen für die Herstellungs- und Nutzungsbedingungen von verklebten Produkten gezielter formuliert und neue Ansätze für Optimierungen der Laubholz-Verklebung entwickelt werden.
- Robustheit ist dabei nicht gleichzusetzen mit höchster Performance, sondern mit stabiler Verklebungsqualität als Folge einer möglichst geringen Sensitivität der Klebstoffe und der verklebten Produkte gegenüber abweichenden oder wechselnden Produktions- und Nutzungsbedingungen. Das Ziel ist eine verbesserte und Produkte-spezifische Beschreibung der Klebstoffe und der verklebten Produkte, mit einer Unterscheidung in kritische und eher tolerante Verklebungsparameter. Dazu gehört im Hinblick auf zukünftig sich ändernde Holzsortimente insbesondere auch die Eignung für verschiedene (Laub-)Holzarten.
- Effekte von Einflussfaktoren sind immer abhängig von den spezifischen Materialkombinationen und daher sollten Generalisierungen nur mit Vorsicht vorgenommen werden.
- Um Unterschiede bei den vorgeschlagenen Robustheits-Kenngrößen richtig zu interpretieren, sollten die untersuchten Effekte immer anhand der absoluten Messdaten eingeordnet werden. Dadurch kann verhindert werden, dass absolut gesehen geringe Effekte, welche aber Robustheits-Unterschiede zeigen, überbewertet werden.

5.1 Beantwortung der Forschungsfragen

- Wie kann die Robustheit einer Holzverklebung definiert und quantifiziert werden?
 - Robustheit im Kontext der Holzverklebung wird definiert als stabile Verklebungsqualität als Folge einer möglichst geringen Sensitivität der Klebstoffe und der verklebten Produkte gegenüber abweichenden oder wechselnden Produktions- und Nutzungsbedingungen.
- Welche Unterschiede bezüglich Verklebungsqualität und Langzeitverhalten müssen in einem Robustheitskonzept berücksichtigt werden?
 - Die Verklebungsqualität bei der Produktion ist primär das Ergebnis gut aufeinander abgestimmter Einzelkomponenten und Prozessparameter. Beim Langzeitverhalten müssen zusätzlich Last- und Klimaschwankungen sowie Alterungsphänomene berücksichtigt werden.
- Welche Prüfmethoden und Messgrößen sind zur Quantifizierung geeignet?
 - Die etablierten, in den Klebstoff- und Produktnormen für den tragenden Holzbau festgelegten Qualitäts-Prüfungen und -Merkmale sind für diesen Zweck gut geeignet. Je nach Fragestellung können auch zusätzliche Messgrößen einbezogen werden.
- Sind Klebstoffe bezüglich Robustheit unterschiedlich?
 - Ja. Die Verklebungsqualität ist immer abhängig von den jeweiligen konkreten Materialkombinationen. Die grundsätzlichen Eigenschaften der verschiedenen Klebstoffklassen widerspiegeln sich natürlich in der Robustheit. Die angeführten Beispiele zeigen aber auch grosse Unterschiede bei der Verklebungsqualität zwischen verschiedenen Produkten des gleichen Klebstofftyps. Und schliesslich können Klebstoffe auch gegenüber den verschiedenen Qualitätsmerkmalen unterschiedlich robust sein.
- Welches sind entscheidende Einflussgrößen?
 - Je nach Klebstofftyp oder spezifischem Produkt können andere Einflussgrößen massgebend sein. Bei der Laubholzverklebung sind die Holzart, die Jahrringstellung der Füge-teile, die Holzfeuchte sowie der Pressdruck besonders wichtig.

- Sind die Einflussgrößen spezifisch für Klebstofftypen oder einzelne Produkte?
→ Ja (siehe oben).
- Können Klebstoffe gleichzeitig robust sein bezüglich Verklebungsqualität und Langzeitverhalten?
→ (Vermutlich) Ja. Diese Frage konnte im Rahmen dieses Projektes nicht detailliert untersucht werden. Es ist allerdings anzunehmen, dass nur eine anfänglich einwandfreie Verklebungsqualität zu einem erwartungsgemässen und zuverlässigen Langzeitverhalten führt.
- Wie kann ein Robustheitskonzept bei der Entwicklung und Auswahl von Klebstoffen für die Laubholz-Verklebung angewendet werden?
→ Der Robustheits-Ansatz wird vorgeschlagen als Ergänzung respektive Alternative zu einer engen Steuerung des Verklebungsprozesses. Damit könnten Einschränkung der Herstellungs- und Nutzungsbedingungen von verklebten Produkten gezielter formuliert und neue Ansätze für Optimierungen entwickelt werden (z.B. durch Verbesserungen bezüglich kritischen Verklebungsparametern).

5.2 Zielerreichung

Die Hauptziele des Projektes wurden folgendermassen erfüllt:

Ziel 1. Definition von Robustheit im Kontext der Holzverklebung

- Review Robustheitskonzepte in anderen Fachgebieten (→ Kapitel 2.1)
- Spezifische Definition für die Holzverklebung (→ Kapitel 2.1 / Tabelle 5)

Ziel 2. Erarbeitung eines Konzeptes zur Quantifizierung der Robustheit

- Robustheitskonzept (→ Kapitel 2)

Ziel 3. Identifizierung und Quantifizierung von relevanten Einflussfaktoren

- Robustheitsfaktoren und Qualitätsmerkmale (→ Kapitel 2.2 / Tabelle 6)
- Quantifizierung (→ Kapitel 2.3)

Ziel 4. Demonstration des Konzeptes bezüglich Verklebungsqualität anhand von Pilotuntersuchungen (ausgewählte Fallbeispiele mit Flächenverklebung)

- Pilotversuche (→ Kapitel 3.1 und 4.1)
- Ergänzende Datenbeispiele aus Literaturquellen (→ Kapitel 3.2 und 4.2)

Ziel 5. Initiierung von nachfolgenden Industrieprojekten

- Identifikation von möglichen Projektthemen (→ Kapitel 5.3)
- Vorschlag Deklarationsraster Robustheit (→ Kapitel 5.3 / Tabelle 22)
- Offene Fragen / Weiterer Forschungsbedarf (→ Kapitel 5.4)

5.3 Umsetzung

Die gewonnenen Kenntnisse zu Robustheitsaspekten bei der Holzverklebung können zur Verbesserung von Qualität und Zuverlässigkeit von verklebten Holzprodukten genutzt werden. Anhand der Ergebnisse der durchgeführten Pilotversuche und den ergänzenden Beispielen aus der Literatur kann das entwickelte Robustheits-Konzept interessierten Industriepartnern erklärt werden und als Grundlage zur Diskussion und Entwicklung konkreter Firmen- oder Produkt-spezifischer Untersuchungen dienen.

Bezüglich Robustheit beim Langzeitverhalten können mit analogen Ansätzen spezifische Projekte definiert werden. Im Rahmen des beantragten Projektes wurden erste konzeptionelle Überlegungen gemacht, die Beobachtung des Langzeitverhaltens erfordert jedoch aufwändige Versuche in Bauteilgrösse und eine längere Projektlaufzeit. Die Versuchsplanung muss dabei die Ergebnisse vorangehender Robustheits-Untersuchungen zur Verklebungsqualität einbeziehen und ist daher erst in einem nachfolgenden Schritt sinnvoll. Aufgrund des grossen Versuchsaufwandes erfordert eine Realisierung solcher Projekte zwingend die Beteiligung von Industriepartnern.

Die Erkenntnisse des vorliegenden und auch des vorangegangenen WHFF-Projektes 2017.18 'Qualitätskontrolle der Flächenverklebung bei Brettschichtholz aus Laubholz' fliessen auch in die zur Zeit entstehende Herstellerrichtlinie für BSH und Stabschichtholz aus Laubholz ein. Diese Richtlinie ist eine Ergänzung des durch die Lignum in Zusammenarbeit mit dem HIS geplanten Lignatec 'Brettschichtholz aus Laubholz'. Der Projektleiter Martin Arnold arbeitet in der Projektgruppe 'Herstellerrichtlinie' mit und bringt vor allem die Erfahrungen bezüglich Qualitätssicherungsprüfungen ein.

Tabelle 22 enthält das entwickelte Deklarationsraster zur Beurteilung und Quantifizierung der Robustheit von Laubholz-Verklebungen. Dieses Raster kann als Basis dienen für eine umfassende Beurteilung von Klebstoffen respektive verklebten Holzprodukten entsprechend ihrer Robustheit bezüglich verschiedener Einflussgrössen. Das dazu notwendige Konzept zur Quantifizierung der Robustheit wurde im Rahmen des Projektes erarbeitet und muss nun auf seine (Praxis-)Tauglichkeit geprüft werden.

Ein solches Deklarationsraster bietet die Möglichkeit für eine erweiterte Klassierung von Klebstoffen entsprechend ihrer Robustheit und könnte es z.B. ermöglichen, für bestimmte Anwendungen gezielter Klebstoffe oder verklebte Holzprodukte mit einer besonderen Eignung gemäss ihrer Robustheit gegenüber den anwendungs-kritischen Eigenschaften auszuwählen.

5.4 Offene Fragen / Weiterer Forschungsbedarf

Aus den Erkenntnissen des vorliegenden Projektes ergeben sich folgende offenen Fragen und Ansatzpunkte für weitere Untersuchungen:

- Das vorgeschlagene Robustheits-Konzept sollte in weiteren Projekten angewendet, auf seine (Praxis-)Tauglichkeit überprüft und allenfalls angepasst werden.
- Der Einbezug von mehr als 3 Parameterstufen bei kardinalskalierten Robustheitsfaktoren würde die Interpretation der entsprechenden Effekte verbessern (z.B. bezüglich Konsistenz oder Linearität). Der Versuchsaufwand wird dadurch allerdings erheblich erhöht.
- Die Gründe für die in den Pilotversuchen bei einer hohen Verklebungs-Holzfeuchte festgestellten Probleme mit der Verklebungsqualität bei Esche (auch bei Primereinsatz) sollten genauer untersucht werden.
- Umfassende Untersuchungen und Erfahrungen zum Langzeitverhalten bezüglich Zuverlässigkeit und Dauerhaftigkeit von verklebten Laubholzprodukten fehlen bisher weitgehend. Insbesondere zum Einsatz in verschiedenen Nutzungsklassen sind Forschungsanstrengungen notwendig.

Tabelle 22. Mögliches Deklarationsraster zur Beurteilung und Quantifizierung der Robustheit

Bereich	Robustheits-Ziel	Komponenten	(mögliche) Einflussgrössen	Robustheits-Bewertung
Verklebungsprozess (Herstellung)	konstante Verklebungsqualität resp. Minimierung von Fehlverklebungen	Fügeteile	<ul style="list-style-type: none"> - Holzart - Holzqualität, Dichte - Lamellendicke - Jahrring-Stellung - Holzfeuchte - Holzoberfläche (Struktur, Qualität, Alter) 	<i>verbale Beschreibung oder Klassierungs-Schema</i> <i>(Bewertungen gemäss Kap. 2.3 sowie Beispielen in Kap. 4)</i>
		Klebstoff	<ul style="list-style-type: none"> - Klebstofftyp/-produkte - Klebstoffeigenschaften (z.B. Viskosität) - Adhäsionsvermögen - Feuchte-/Temperatur-Verhalten 	
		Verklebungsprozess	<ul style="list-style-type: none"> - Auftragsmenge - Pressdruck - Temperatur - Timing (offene/geschlossene Zeit, Presszeit) 	
		Verbindungstyp	<ul style="list-style-type: none"> - Flächenverklebung / Keilzinkung - Ausbildung Klebfuge (Klebfugendicke, Formschluss) 	
Langzeitverhalten (Nutzungsphase)	Unempfindlichkeit gegenüber Nutzungseinflüssen	Klebfugenintegrität	<ul style="list-style-type: none"> - Verklebungsparameter - Lasteinwirkungen - Klimabeanspruchung (Nutzungs-kategorie) - Alterung 	
		Kriechen	<ul style="list-style-type: none"> - Verklebungsparameter - Lasteinwirkungen - Temperatur-/Feuchteeinfluss (saisonale Effekte) 	

Literatur

(sortiert nach Erstautor und Jahr)

- Ammann S, Schlegel S, Beyer M, Aehlig K, Lehmann M, Jung, Niemz P. 2016. Quality assessment of glued ash wood for construction engineering. *Eur J Wood Prod* 74:67–74.
- Arnold M., Risi W., Steiger R. 2019. Qualitätskontrolle der Flächenverklebung bei Brettschichtholz aus Laubholz. Schlussbericht WHFF-Projekt Nr. 2017.18.
- da Silva LFM, Öchsner A, Adams RD (Eds.). 2018. *Handbook of Adhesion Technology*. Springer.
- Frühwald A, Ressel JB, Bernasconi A. 2003. Hochwertiges Brettschichtholz aus Buchenholz. Abschlussbericht. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg.
- Göhler SM, Eifler T, Howard TJ. 2016. Robustness Metrics: Consolidating the multiple approaches to quantify Robustness. *Journal of Mechanical Design* 138(11).
- Jiang Y, van de Kuilen JW, Schaffrath J. 2014. Möglichkeiten der Verklebung verschiedener Holzarten und Untersuchungen zur Verwendbarkeit als Brettschichtholz. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 17284 N, München.
- Luedtke J, Amen C, van Ofen A, Lehringer C. 2015. 1C-PUR-bonded hardwoods for engineered wood products: influence of selected processing parameters. *Eur J Wood Prod* 73:167–178.
- McPhail C, Maier HR, Kwakkel JH, Giuliani M, Castelletti A, Westra S. 2018. Robustness Metrics: How Are They Calculated, When Should They Be Used and Why Do They Give Different Results? *Earth's Future*, 6, 169–191.
- Schmidt M, Glos P, Wegener G. 2010. Verklebung von Buchenholz für tragende Holzbauteile. *Eur J Wood Prod* 68:43–57.
- Sørensen JD, Dietsch P, Kirkegaard PH, Köhler J (Eds.). 2010. Guideline - Design for Robustness of Timber Structures. COST Action E55 'Modelling of the Performance of Timber Structures'.
- Spangenberg J, Uzala A, Nielsen MW, Hattel JH. 2018. A robustness analysis of the bonding process of joints in wind turbine blades. *Int J Adhesion Adhesives* 85:281–285.
- Stricker N, Lanza G. 2014. The concept of robustness in production systems and its correlation to disturbances. *Procedia CIRP* 19: 87-92.
- Yao H, Gao H. 2007. Mechanical principles of robust and releasable adhesion of gecko. *J Adhesion Sci Technol* (21)12–13:1185–1212.
- ZVEI 2015. Handbook for Robustness Validation of Semiconductor Devices in Automotive Applications. Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V., Frankfurt am Main, D (www.zvei.org).

Normen

- SIA 260:2013. Grundlagen der Projektierung von Tragwerken
- SN EN 302-1:2013. Klebstoffe für tragende Holzteile – Teil 1: Bestimmung der Längszugscherfestigkeit
- SN EN 302-2:2018. Klebstoffe für tragende Holzteile – Teil 2: Bestimmung der Delaminierungsbeständigkeit
- SN EN 14080:2013. Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen

Abkürzungen

AP	Arbeitspaket
BFH	Berner Fachhochschule
BSH	Brettschichtholz
BU	Buche
BUp	Buche plan gehobelt
BUv	Buche verformt (gehobelt ohne Abrichten)
CEN	Europäisches Komitee für Normung
CoV	Variationskoeffizient
EI	Eiche
EN	Europäische Norm
EPI	Emulsionspolymer-Isocyanat Klebstoff
ES	Esche
ETHZ	ETH Zürich
FI	Fichte
H	Halbrift
JR	Jahrring
LA	Lärche
LH	Laubholz
max	Maximum/maximal
MF	Melamin-Formaldehyd Klebstoff
min	Minimum/minimal
Min	Minuten
MUF	Melamin-Harnstoff-Formaldehyd Klebstoff
MW	(arithmetischer) Mittelwert
PRF	Phenol-Resorcin-Formaldehyd Klebstoff
PU, PUR	Polyurethan Klebstoff
PURp	Polyurethan Klebstoff mit Primer
R	Radial
RH	relative Luftfeuchte (relative humidity)
SIA	Schweizer Ingenieur- und Architektenverein
Std	Standardabweichung
Sx	VersuchsSerie
T	Tangential
TI/UHH	Thünen-Institut / Universität Hamburg
TUM	Technische Universität München
WHFF	Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung

Anhang

Anhang 1: Pilotversuche - Übersicht Versuchsvarianten

Anhang 2: Pilotversuche - Datentabellen

Anhang 3: Gesamtüberblick verfügbare Daten / Robustheits-Beispiele

Anhang 1: Pilotversuche - Übersicht Versuchsvarianten

Serie	Proben-Nr.	Holzart	Klebstoff	Holzfeuchte	GWZ	Pressdruck	Formschluss	
S1	1, 2, 3	Buche	PUR	65	10	0.2	plan	
	4, 5, 6					1.2		
	7, 8, 9					1.8		
	10, 11, 12		PURp			0.2		verformt
	13,14, 15					1.2		
	16, 17, 18					1.8		
	19, 20, 21		PUR			0.2	verformt	
	22, 23, 24					1.2		
	25, 26, 27					1.8		
	28, 29, 30		PURp			0.2		verformt
	31, 32, 33					1.2		
	34, 35, 36					1.8		

Serie	Proben-Nr.	Holzart	Klebstoff	Holzfeuchte	GWZ	Pressdruck
S2	40, 41, 42	Buche	PURp	35	10	1.2
	43, 44, 45			65		
	46, 47, 48			85		
	49, 50, 51		MUF	35	35	
	52, 53, 54			65		
	55, 56, 57			85		
	58, 59, 60	Esche	PURp	35	10	
	61, 62, 63			65		
	64, 65, 66			85		
	67, 68, 69		MUF	35	35	
	70, 71, 72			65		
	73, 74, 75			85		
	76, 77, 78	Eiche	PURp	35	10	
	79, 80, 81			65		
	82, 83, 84			85		
	85, 86, 87		MUF	35	35	
	88, 89, 90			65		
	91, 92, 93			85		

Serie	Proben-Nr.	Holzart	Klebstoff	Holzfeuchte	GWZ	Pressdruck
S3	100, 101, 102	Buche	MUF	65	10	1.2
	103, 104, 105				35	
	106, 107, 108				60	
	109, 110, 111	Esche			10	
	112, 113, 114				35	
	115, 116, 117				60	
	118, 119, 120	Eiche			10	
	121, 122, 123				35	
	124, 125, 126				60	

Anhang 2: Pilotversuche - Datentabellen

Legende Spaltenbeschriftung:

Repl	Wiederholungsprobe (1-3)
HA	Holzart (BU=Buche, ES=Esche, EI=Eiche)
JRSuo	Jahringstellung der unteren - oberen Lamelle (T=Tangential, H=Halbrift, R=Rift)
KS	Klebstoff (PUR=Polyurethan, PURp=Polyurethan mit Primer, MUF= Melamin-Harnstoff-Formaldehyd)
HF	Relative Luftfeuchte für Holzkonditionierung bei 20°C [%]
GWZ	geschlossene Wartezeit [Min]
Pressd.	Pressdruck [N/mm ²]
Formschl.	Formschluss (plan=plan gehobelt, verformt=gehobelt ohne Abrichten)
KD	Klebfugendicke [µm]
IB	Delaminierung - Anteil intakter Klebfugenlänge [%]
SF	Scherfestigkeit Klebfuge [N/mm ²]
SL	Scherfestigkeit Holz in Lamellenmitte [N/mm ²]
SH	Scherfestigkeit - Holzbruchanteil [%]
SF%	relative Fugenfestigkeit in % der mittleren Holzfestigkeit der beteiligten Lamellen [%]

Versuchsserie S1

Proben			Versuchsparameter							Qualitätskenngrößen (Proben-Mittelwerte)						
Serie	Probe	Repl	HA	JRSuo	KS	HF	GWZ	Pressd.	Formschl.	KD	IB	SF	SL	SH	SF%	
S1	1	1	BU	T-T	PUR	65	10	0.2	plan	15.8	100.0	17.8	20.1	88.3	88.4	
S1	2	2	BU	T-T	PUR	65	10	0.2	plan	17.3	36.7	16.9	21.6	35.8	78.1	
S1	3	3	BU	T-T	PUR	65	10	0.2	plan	27.9	8.2	16.6	21.8	59.2	76.3	
S1	4	1	BU	T-T	PUR	65	10	1.2	plan	9.3	98.4	18.9	20.4	83.3	92.7	
S1	5	2	BU	T-T	PUR	65	10	1.2	plan	5.0	26.8	18.1	21.8	67.5	83.1	
S1	6	3	BU	T-T	PUR	65	10	1.2	plan	5.0	16.2	18.3	22.6	36.7	81.0	
S1	7	1	BU	T-T	PUR	65	10	1.8	plan	5.0	58.7	17.7	22.3	70.0	79.3	
S1	8	2	BU	T-T	PUR	65	10	1.8	plan	3.8	40.9	18.2	22.6	52.5	80.6	
S1	9	3	BU	T-T	PUR	65	10	1.8	plan	5.0	24.4	17.4	22.7	58.3	76.8	
S1	10	1	BU	T-T	PURp	65	10	0.2	plan	22.8	100.0	20.7	21.8	96.7	95.0	
S1	11	2	BU	T-T	PURp	65	10	0.2	plan	31.8	100.0	20.4	22.1	83.3	92.3	
S1	12	3	BU	T-T	PURp	65	10	0.2	plan	20.0	100.0	21.5	23.1	77.5	93.3	
S1	13	1	BU	T-T	PURp	65	10	1.2	plan	2.5	100.0	20.1	21.5	100.0	93.8	
S1	14	2	BU	T-T	PURp	65	10	1.2	plan	12.0	100.0	21.2	21.6	98.3	98.5	
S1	15	3	BU	T-T	PURp	65	10	1.2	plan	3.8	100.0	22.3	23.3	98.3	95.5	
S1	16	1	BU	T-T	PURp	65	10	1.8	plan	2.5	100.0	19.4	19.8	96.7	97.9	
S1	17	2	BU	T-T	PURp	65	10	1.8	plan	13.5	100.0	20.2	21.0	90.0	95.9	
S1	18	3	BU	T-T	PURp	65	10	1.8	plan	2.5	100.0	22.6	23.6	97.5	95.5	
S1	19	1	BU	T-T	PUR	65	10	0.2	verformt	25.3	49.4	15.4	20.3	56.7	75.9	
S1	20	2	BU	T-T	PUR	65	10	0.2	verformt	53.3	16.3	15.6	21.2	35.8	73.4	
S1	21	3	BU	T-T	PUR	65	10	0.2	verformt	79.0	13.3	12.8	23.3	20.0	55.0	
S1	22	1	BU	T-T	PUR	65	10	1.2	verformt	2.5	90.9	18.1	22.2	75.8	81.6	
S1	23	2	BU	T-T	PUR	65	10	1.2	verformt	18.5	12.0	16.8	20.7	63.3	81.1	
S1	24	3	BU	T-T	PUR	65	10	1.2	verformt	36.5	16.3	18.4	22.7	69.2	80.9	
S1	25	1	BU	T-T	PUR	65	10	1.8	verformt	12.8	19.7	18.1	19.6	58.3	92.3	
S1	26	2	BU	T-T	PUR	65	10	1.8	verformt	8.5	54.2	20.3	23.5	80.8	86.6	
S1	27	3	BU	T-T	PUR	65	10	1.8	verformt	2.5	25.8	19.8	23.6	69.2	84.0	
S1	28	1	BU	T-T	PURp	65	10	0.2	verformt	211.3	90.9	11.0	21.7	48.3	50.5	
S1	29	2	BU	T-T	PURp	65	10	0.2	verformt	23.0	100.0	20.3	23.3	79.2	86.9	
S1	30	3	BU	T-T	PURp	65	10	0.2	verformt	79.5	59.0	13.3	24.4	34.2	54.7	
S1	31	1	BU	T-T	PURp	65	10	1.2	verformt	41.0	67.0	16.6	22.5	72.5	73.9	
S1	32	2	BU	T-T	PURp	65	10	1.2	verformt	19.0	100.0	22.1	23.7	87.5	93.1	
S1	33	3	BU	T-T	PURp	65	10	1.2	verformt	29.3	92.9	18.3	24.9	50.0	73.7	
S1	34	1	BU	T-T	PURp	65	10	1.8	verformt	8.5	90.4	19.0	22.0	85.8	86.3	
S1	35	2	BU	T-T	PURp	65	10	1.8	verformt	5.0	100.0	22.9	24.3	100.0	94.5	
S1	36	3	BU	T-T	PURp	65	10	1.8	verformt	70.5	77.7	15.4	25.8	55.0	59.9	

Versuchsserie S2

Proben			Versuchsparameter							Qualitätskenngrößen (Proben-Mittelwerte)					
Serie	Probe	Repl	HA	JRSuo	KS	HF	GWZ	Pressd.	Formschl.	KD	IB	SF	SL	SH	SF%
S2	40	1	BU	T-T	PURp	35	10	1.2	plan	2.5	100.0	23.7	21.1	100.0	112.5
S2	41	2	BU	T-T	PURp	35	10	1.2	plan	14.5	100.0	25.6	21.6	98.3	118.3
S2	42	3	BU	T-T	PURp	35	10	1.2	plan	7.0	100.0	25.5	24.8	95.8	102.8
S2	43	1	BU	T-T	PURp	65	10	1.2	plan	7.5	100.0	22.1	20.4	99.2	108.5
S2	44	2	BU	T-T	PURp	65	10	1.2	plan	18.5	97.4	21.3	20.9	86.7	101.6
S2	45	3	BU	T-T	PURp	65	10	1.2	plan	9.3	100.0	24.5	24.3	93.3	100.7
S2	46	1	BU	T-T	PURp	85	10	1.2	plan	2.5	100.0	20.1	21.0	100.0	95.8
S2	47	2	BU	T-T	PURp	85	10	1.2	plan	16.8	100.0	20.1	21.9	85.0	91.9
S2	48	3	BU	T-T	PURp	85	10	1.2	plan	3.8	100.0	21.0	24.3	99.2	86.3
S2	49	1	BU	T-T	MUF	35	35	1.2	plan	28.3	100.0	23.4	24.0	100.0	97.5
S2	50	2	BU	T-T	MUF	35	35	1.2	plan	78.3	100.0	21.3	25.0	100.0	85.0
S2	51	3	BU	T-T	MUF	35	35	1.2	plan	68.8	100.0	25.0	24.4	99.2	102.3
S2	52	1	BU	T-T	MUF	65	35	1.2	plan	7.3	100.0	21.2	24.6	100.0	86.0
S2	53	2	BU	T-T	MUF	65	35	1.2	plan	26.0	100.0	21.0	22.1	100.0	95.0
S2	54	3	BU	T-T	MUF	65	35	1.2	plan	5.0	100.0	21.7	25.2	100.0	85.8
S2	55	1	BU	T-T	MUF	85	35	1.2	plan	3.8	88.6	20.5	20.8	100.0	98.7
S2	56	2	BU	T-T	MUF	85	35	1.2	plan	17.3	100.0	18.5	21.9	98.3	84.3
S2	57	3	BU	T-T	MUF	85	35	1.2	plan	5.8	100.0	19.0	22.8	100.0	83.4
S2	58	1	ES	T-T	PURp	35	10	1.2	plan	11.0	89.7	18.7	17.6	100.0	106.0
S2	59	2	ES	H-H	PURp	35	10	1.2	plan	38.5	100.0	18.7	19.0	100.0	98.6
S2	60	3	ES	R-R	PURp	35	10	1.2	plan	3.8	100.0	19.0	20.6	98.3	92.1
S2	61	1	ES	T-T	PURp	65	10	1.2	plan	4.5	97.1	19.1	15.5	100.0	123.2
S2	62	2	ES	H-H	PURp	65	10	1.2	plan	15.0	92.1	17.7	18.5	98.3	95.7
S2	63	3	ES	R-R	PURp	65	10	1.2	plan	2.5	95.5	17.2	19.3	95.0	89.3
S2	64	1	ES	T-T	PURp	85	10	1.2	plan	5.0	76.6	17.5	18.0	88.3	97.1
S2	65	2	ES	H-H	PURp	85	10	1.2	plan	15.8	62.5	15.4	17.6	75.0	87.5
S2	66	3	ES	R-R	PURp	85	10	1.2	plan	5.0	30.1	7.5	17.8	18.3	42.5
S2	67	1	ES	T-T	MUF	35	35	1.2	plan	56.0	72.4	19.3	16.5	100.0	117.3
S2	68	2	ES	H-H	MUF	35	35	1.2	plan	65.8	100.0	19.1	19.3	89.2	99.1
S2	69	3	ES	R-R	MUF	35	35	1.2	plan	39.8	98.1	19.8	19.9	99.2	99.3
S2	70	1	ES	T-T	MUF	65	35	1.2	plan	72.0	96.6	18.5	20.3	93.3	91.1
S2	71	2	ES	H-H	MUF	65	35	1.2	plan	94.0	99.0	17.9	19.9	69.2	89.9
S2	72	3	ES	R-R	MUF	65	35	1.2	plan	52.3	100.0	18.2	19.7	98.3	92.4
S2	73	1	ES	T-T	MUF	85	35	1.2	plan	31.0	77.1	16.9	15.9	100.0	105.7
S2	74	2	ES	H-H	MUF	85	35	1.2	plan	57.0	82.2	17.7	18.7	78.3	94.6
S2	75	3	ES	R-R	MUF	85	35	1.2	plan	16.5	76.3	17.3	18.8	100.0	92.4
S2	76	1	EI	T-T	PURp	35	10	1.2	plan	9.0	96.2	19.8	19.5	97.5	101.7
S2	77	2	EI	H-H	PURp	35	10	1.2	plan	48.0	99.5	17.7	18.4	100.0	96.7
S2	78	3	EI	R-R	PURp	35	10	1.2	plan	2.5	100.0	15.1	16.6	100.0	91.1
S2	79	1	EI	T-T	PURp	65	10	1.2	plan	3.8	75.3	19.4	19.5	96.7	99.7
S2	80	2	EI	H-H	PURp	65	10	1.2	plan	16.0	92.6	17.3	19.0	98.3	91.4
S2	81	3	EI	R-R	PURp	65	10	1.2	plan	5.0	97.1	14.7	16.3	100.0	90.3
S2	82	1	EI	T-T	PURp	85	10	1.2	plan	5.0	68.8	17.6	18.2	91.7	96.6
S2	83	2	EI	H-H	PURp	85	10	1.2	plan	23.3	90.5	15.4	16.6	85.0	92.8
S2	84	3	EI	R-R	PURp	85	10	1.2	plan	5.0	100.0	14.1	15.1	100.0	93.6
S2	85	1	EI	T-T	MUF	35	35	1.2	plan	75.8	100.0	18.8	18.9	92.5	99.3
S2	86	2	EI	H-H	MUF	35	35	1.2	plan	77.0	99.2	15.8	18.3	89.2	86.5
S2	87	3	EI	R-R	MUF	35	35	1.2	plan	25.5	99.4	14.7	16.9	88.3	87.2
S2	88	1	EI	T-T	MUF	65	35	1.2	plan	63.8	97.9	18.3	18.7	97.5	97.9
S2	89	2	EI	H-H	MUF	65	35	1.2	plan	85.5	100.0	15.2	16.9	90.8	90.1
S2	90	3	EI	R-R	MUF	65	35	1.2	plan	65.8	99.2	13.8	15.8	98.3	87.3
S2	91	1	EI	T-T	MUF	85	35	1.2	plan	29.3	82.4	17.4	17.5	97.5	99.3
S2	92	2	EI	H-H	MUF	85	35	1.2	plan	35.3	91.5	14.8	17.2	100.0	86.0
S2	93	3	EI	R-R	MUF	85	35	1.2	plan	7.5	91.5	13.4	14.8	94.2	90.8

Versuchsserie S3

Proben			Versuchsparameter							Qualitätskenngrößen (Proben-Mittelwerte)						
Serie	Probe	Repl	HA	JRSuo	KS	HF	GWZ	Pressd.	Formschl.	KD	IB	SF	SL	SH	SF%	
S3	100	1	BU	T-T	MUF	65	10	1.2	plan	10.8	92.0	23.5	24.5	86.7	95.7	
S3	101	2	BU	H-H	MUF	65	10	1.2	plan	21.3	100.0	19.3	21.5	100.0	89.7	
S3	102	3	BU	R-R	MUF	65	10	1.2	plan	2.5	95.7	16.6	18.9	100.0	88.0	
S3	103	1	BU	T-T	MUF	65	35	1.2	plan	30.5	100.0	21.8	22.6	100.0	96.7	
S3	104	2	BU	H-H	MUF	65	35	1.2	plan	42.0	100.0	17.2	19.2	100.0	89.8	
S3	105	3	BU	R-R	MUF	65	35	1.2	plan	22.0	98.1	15.8	16.9	100.0	93.3	
S3	106	1	BU	T-T	MUF	65	60	1.2	plan	104.5	98.6	20.8	22.9	95.8	90.7	
S3	107	2	BU	H-H	MUF	65	60	1.2	plan	103.0	98.2	15.9	20.0	100.0	79.6	
S3	108	3	BU	R-R	MUF	65	60	1.2	plan	91.5	100.0	14.4	16.3	100.0	88.4	
S3	109	1	ES	T-T	MUF	65	10	1.2	plan	3.8	89.1	15.8	15.6	100.0	101.2	
S3	110	2	ES	H-H	MUF	65	10	1.2	plan	20.5	99.5	16.8	17.8	98.3	94.5	
S3	111	3	ES	R-R	MUF	65	10	1.2	plan	2.5	98.6	17.2	18.2	98.3	94.6	
S3	112	1	ES	T-T	MUF	65	35	1.2	plan	22.8	98.6	16.2	15.9	100.0	102.2	
S3	113	2	ES	H-H	MUF	65	35	1.2	plan	32.3	99.5	16.5	18.2	98.3	90.9	
S3	114	3	ES	R-R	MUF	65	35	1.2	plan	2.5	96.3	17.8	18.2	100.0	97.7	
S3	115	1	ES	T-T	MUF	65	60	1.2	plan	52.5	100.0	16.1	16.0	98.3	100.8	
S3	116	2	ES	H-H	MUF	65	60	1.2	plan	80.5	100.0	16.2	18.1	85.0	89.5	
S3	117	3	ES	R-R	MUF	65	60	1.2	plan	40.5	100.0	17.6	19.5	100.0	90.4	
S3	118	1	EI	H-R	MUF	65	10	1.2	plan	2.5	98.4	15.4	17.4	100.0	88.5	
S3	119	2	EI	H-H	MUF	65	10	1.2	plan	23.8	100.0	19.2	19.0	100.0	101.2	
S3	120	3	EI	R-R	MUF	65	10	1.2	plan	5.0	98.7	14.5	17.0	96.7	85.4	
S3	121	1	EI	H-R	MUF	65	35	1.2	plan	2.5	96.2	16.3	16.4	100.0	99.1	
S3	122	2	EI	H-H	MUF	65	35	1.2	plan	35.8	99.2	19.5	20.1	100.0	97.2	
S3	123	3	EI	R-R	MUF	65	35	1.2	plan	2.5	100.0	14.8	17.2	100.0	86.0	
S3	124	1	EI	H-R	MUF	65	60	1.2	plan	75.5	100.0	16.1	17.5	94.2	91.7	
S3	125	2	EI	H-H	MUF	65	60	1.2	plan	95.5	99.5	17.9	19.8	95.8	90.4	
S3	126	3	EI	R-R	MUF	65	60	1.2	plan	73.8	93.9	13.4	16.3	97.5	82.0	

Anhang 3: Gesamtüberblick verfügbare Daten / Robustheits-Beispiele

Serie	Verklebungsparameter / Versuchsfaktoren														Qualitätsmerkmale				
	Fügeteile						Klebstoffe						Verklebung			Klebfugen- dicke	Delami- nierung	Block- scher- Test	Zug- scher- Test
	Holzart			Lamellen- dicke	Jahring- stellung	Holz- feuchte	Form- schluss	Typ				Pri- mer	Auftrags- menge	Press- druck	geschl. Wartez.				
	BU	ES	El					FI	LA	PUR	MUF								
S1	X						J/N	X						X		X	X		
S2	X	X	X			X		X	X							X	X		
S3	X	X	X			X			X							X	X		
L1	X	X						X		X		J/N	X	X		X	X		
L2	X							X	X							X			
L3	X								X							X	X		
L4		X							X							X		X	
L5	X	X	X	X						X		J/N				X	X		
L6	X	X		X				X	X							X	X	X	

Versuchsparameter / Qualitätsmerkmale
untersuchter Robustheitsfaktor

X
X