

# Hochleistungsverbundträger aus Vollholz- und Furnierschichtholz- Lamellen

Gerhard Dill-Langer  
MPA Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland





# Hochleistungsverbundträger aus Vollholz- und Furnierschichtholz-Lamellen

## 1. Einleitung

Das Bauprodukt Brettschichtholz ist seit Jahrzehnten der wichtigste holzbasierte Ingenieurwerkstoff sowohl für Standard-Anwendungen als auch für spezielle Konstruktionen mit hohen Materialanforderungen. Für die unterschiedlichen Anforderungsbereiche sind in der entsprechenden harmonisierten Produktnorm EN 14080 [1] abgestufte Festigkeitsklassen definiert, die entsprechende Lamellenfestigkeitsklassen voraussetzen. Beim Übergang von nationalen zu europäischen Normen ergaben sich dabei einige Verschiebungen, die für die Herstellungspraxis im Einzelfall erhebliche Auswirkungen haben können: Während sich im unteren und mittleren Festigkeitsbereich durch stärkere Abstufungen und die generelle Einführung von kombinierten Querschnittsaufbauten eher Erleichterungen / Flexibilisierungen ergaben, sind die Anforderungen an die Herstellung höherer Festigkeitsklassen – vor allem jenseits der Klasse GL28 – deutlich verschärft worden. Zusätzlich ergeben sich auch aus jüngsten Anpassungen / Änderungen der entsprechenden Sortiernormen – insbesondere für die maschinelle Sortierung – implizit ein weiteres Anheben des Anforderungsniveaus und eine Verringerung der erzielbaren Ausbeuten aus dem Grundmaterial. Für den anspruchsvollen Ingenieurholzbau mit dem Ziel, weite Spannweiten und eine schlanke Konstruktionsweise zu verbinden, ist es somit zunehmend technisch wie wirtschaftlich schwieriger geworden, Brettschichtholz der notwendigen hohen Festigkeitsklassen herzustellen oder zu beschaffen. Beispielsweise ist die früher für spezielle Fälle zur Verfügung stehende höchste Klasse GL36c praktisch völlig vom Markt verschwunden.

Um Brettschichtholz mit höheren Festigkeitskennwerten zu erhalten, sind unterschiedliche Wege beschränkt worden. Zum einen bietet sich der Einsatz von Laubholzlamellen an, die alleine oder in Hybridquerschnitten mit Nadelholzlamellen kombiniert – abhängig von der Holzart – zu erheblichen Steigerungen der Leistungsfähigkeit führen können. Bislang blieb jedoch trotz teilweise seit mehreren Jahren vorliegender nationaler oder europäischer Zulassungen eine weite Verbreitung dieser Bauprodukte aus. Gründe hierfür sind einerseits hohe Anforderungen bzw. technischen Einschränkungen beim Verklebungsprozess und andererseits die bislang sehr beschränkte Markt-Verfügbarkeit des geeigneten Lamellenmaterials mit annehmbaren Ausbeuten für die notwendige Festigkeitssortierung.

Andere Ansätze wie z.B. die Verstärkung von Standard-Brettschichtholz mit Glas- oder Kohlefaserverbundwerkstoffen blieben teils aus wirtschaftlichen Gründen, teils aufgrund nicht vollständig gelöster Fragen der Verklebung und deren Dauerhaftigkeit in Mitteleuropa auf wenige Einzel-Anwendungsfälle beschränkt.

In dem vorliegenden Referat wird über die Ergebnisse eines Forschungsprojektes berichtet, in welchem die Kombination von Nadel-Vollholzlamellen einerseits mit Furnierschichtholzlamellen andererseits untersucht wurde. Das Ziel des Projektes war die Charakterisierung der Leistungsfähigkeit einer solchen Kombination aus kostengünstigem Standard-Brettschichtholz mit dem hochwertigen Werkstoff Furnierschichtholz (FSH) in Abhängigkeit vom Verstärkungsgrad, von der FSH-Holzart und von dem Vorhandensein von Keilzinkenverbindungen in den FSH-Lamellen. Im Fokus des Interesses standen einerseits die erzielbare Biegefestigkeit von Verbundträgern mit einseitiger Verstärkung in der Zugzone und andererseits der Nachweis und die Qualitätssicherung einer dauerhaften Verklebung zwischen Voll- und Furnierschichtholz.

## 2. Experimentelle Untersuchungen

### 2.1. Furnierschichtholz und Keilzinkenverbindungen

In dem Projekt wurden Furnierschichthölzer aus vier unterschiedlichen Holzarten – und vier verschiedenen Herstellern – einbezogen, wodurch die FSH-Produkte des europäischen Marktes im Wesentlichen repräsentiert sind. Durch die Einbeziehung von zwei Nadelholzarten (Fichte und Kiefer) und zwei Laubholzarten (Birke und Buche) konnte so ein weiterer Festigkeits- und Steifigkeitsbereich abgedeckt werden.

Die verwendeten vier Furnierschichthölzer waren sämtlich längslagig, d.h. alle Furnierschichten hatten die gleiche Faserorientierung. Die Furnierschichthölzer wurden jeweils nach den Vorgaben der harmonisierten Norm EN 14374 [2] hergestellt und CE-gekennzeichnet. Die wesentlichen nominellen Eigenschaften konnten jeweils einer Leistungserklärung, die auf Typprüfungen beruht, entnommen werden.

Zusätzlich zu den Angaben der Leistungserklärungen wurde das Ausgangsmaterial durch experimentelle Untersuchungen charakterisiert, um etwaige Abweichungen von den Angaben – die als zugesicherte Mindestwerte natürlich jeweils Überschreitungen erlauben – feststellen zu können. Hierzu wurden an insgesamt mehr als 100 faserparallel herausgetrennten Furnierschichtholz-Streifen Zugversuche nach EN 408 durchgeführt. Die Streifen entsprachen von den Querschnittsabmessungen und der Materialherkunft den für die Verbundträger verwendeten Furnierschichtholzlamellen.

Ein Teil der FSH-Lamellen wurde in den industriellen Produktionsanlagen der Brettschichtholzhersteller keilgezinkt, wobei vier unterschiedliche Klebstoffe aus drei unterschiedlichen Klebstofffamilien zum Einsatz kamen. Es wurde versucht, die für Nadelvollholz eingerichteten und optimierten Keilzinkenanlagen an die unterschiedlichen Holzarten und Rohdichten – z.B. durch Erhöhung des Pressdrucks oder Verlängerung der Presszeit – anzupassen. Eine umfangreiche Optimierung der Keilzinkenherstellung war jedoch nicht Gegenstand des Forschungsprojektes.

Die Ergebnisse der Zugfestigkeiten für die Furnierschichthölzer der vier verschiedenen Holzarten mit und ohne Keilzinkenverbindungen sind in Abb. 1 zusammengefasst.

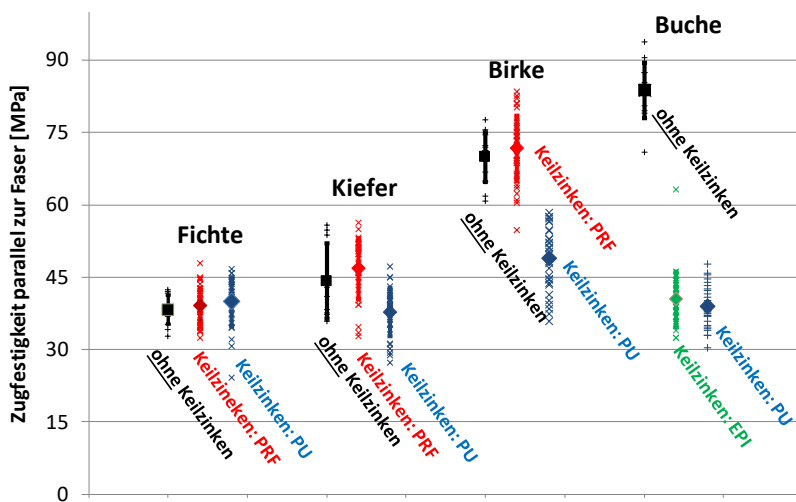


Abbildung 1: Experimentell bestimmte Zugfestigkeiten von Furnierschichthölzern mit und ohne Keilzinkenverbindungen aus vier unterschiedlichen Holzarten

Es ist zu erkennen, dass die Festigkeiten sowohl auf dem Mittelwerts- als auch auf dem charakteristischen Niveau in der Reihenfolge Fichte, Kiefer, Birke und schließlich Buche deutlich anwachsen. Der Unterschied zwischen der mittleren Zugfestigkeit des stärksten (Buche) und schwächsten (Fichte) Furnierschichtholzes beträgt rd. 2:1.

Bei den Keilzinkenfestigkeiten zeigen die beiden Nadelholzarten – nahezu unabhängig von der Klebstofffamilie – nur geringe oder in manchen Fällen nahezu gar keinen Festigkeitsabfall gegenüber dem ungezinkten Material. Die Keilzinkenfestigkeiten der beiden Laubhölzer hängen hingegen sehr ausgeprägt vom verwendeten Klebstoff ab. Teilweise sind erhebliche Festigkeitsminderungen festzustellen.

An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass die Keilzinkenfestigkeiten natürlich nicht nur vom verwendeten Klebstoff, sondern auch von vielen anderen Produktionsparametern – die hier nicht oder jedenfalls nicht vollständig optimiert werden konnten – abhängen. Die Bedeutung der quantitativen Bestimmung der jeweiligen Festigkeitsminderung besteht daher nicht in der Feststellung absoluter Festigkeiten, sondern vor allem in der Gewinnung von vollständigen Datensätzen zur Kalibrierung des anzuwendenden Rechenmodells (siehe Abschnitt 3). Die vorgefundene deutliche Variabilität der Festigkeitsminderung ist für eine empirische Validierung der rechnerischen Modellbildung dabei sogar ein erheblicher Vorteil.

## 2.2. Verbundträger

Neben der Charakterisierung des Ausgangsmaterials standen Biegefestigkeitsuntersuchungen an insgesamt 104 Verbundträgern hergestellt von 4 Brettschichtholzerstellern im Mittelpunkt des experimentellen Prüfprogramms. Die Abmessungen und der grundsätzliche Aufbau der Trägerquerschnitte waren stets identisch:

- Aufbau aus insgesamt 8 Lamellen mit 40 mm Dicke (Gesamthöhe = 320 mm) und einer Breite von 150 mm, Trägerlänge jeweils ca. 6100 mm.
- Bei der Hälfte der Verbundträger bestand eine Lamelle aus Furnierschichtholz (und entsprechend der restliche Querschnitt aus 7 Fichte-Vollholzlammellen der Festigkeitsklasse T14), bei der anderen Hälfte war der Querschnitt aus 2 FSH-Lamellen und 6 Fichte-Vollholzlammellen aufgebaut.
- Die Festigkeitsklasse des Nadelvollholz-Brettschichtholzes war stets GL24h.
- Bei der Hälfte der Träger wiesen die FSH-Lamellen *keine Keilzinkenstöße* auf, die andere Hälfte der Träger enthielt FSH-Lamellen *mit Keilzinkenverbindungen*. Die Vollholzlammellen enthielten wie üblich stets Keilzinkenverbindungen.
- Für die Flächenverklebung zwischen Furnierschichtholz- und Vollholzlammellen wurden Klebstoffe zweier Klebstoff-Familien (Melamin-Harnstoffharze (MUF) und Phenol-Resorzinharze (PRF)) verwendet. Für die Keilzinkenverklebung wurden Klebstoffe aus drei Klebstofffamilien - Phenol-Resorzin-Harze, EPI-Klebstoffe und PU-Klebstoffe – eingesetzt.

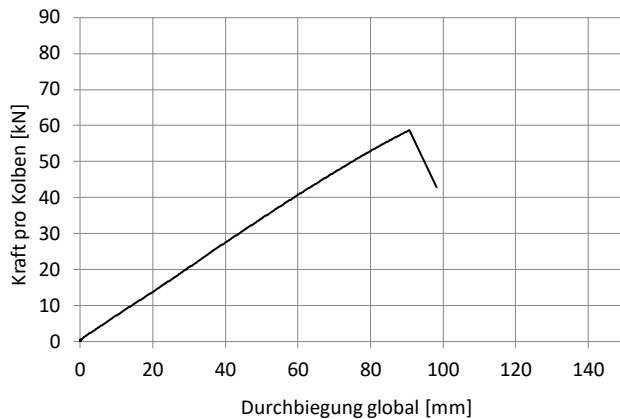
Die Prüfkörperanzahlen für die unterschiedlichen Konfigurationen sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Übersicht zum Versuchsprogramm der Verbundträger

FSH-Holzart	Anzahl Träger je Holzart	FSH-Lamellen	Anteil FSH-Lam.	ohne Keilzinken-Verbindungen	mit Keilzinken-Verbindungen		
					PRF	PU	EPI
Fichte	28	1	12,5%	7	4	3	--
		2	25%	7	4	3	--
Kiefer	24	1	12,5%	6	3	3	--
		2	25%	6	3	3	--
Birke	28	1	12,5%	7	4	3	--
		2	25%	7	4	3	--
Buche	24	1	12,5%	6	--	3	3
		2	25%	6	--	3	3

An allen 104 Trägern wurden Vierpunkt-Biegeversuche nach EN 408 durchgeführt. Einzelheiten der Versuchsdurchführung, der Messtechnik und der Versuchsauswertung wurden z.B. in [3] und [4] dokumentiert. Die drei Hauptversagensmodi, die in [3] detailliert anhand von Dehnungsmessungen untersucht wurden, sollen hier kurz zusammengefasst vorgestellt werden:

In den Fällen mit einem geringen Verstärkungsgrad oder geringer Festigkeit des Furnierschichtholzes bzw. – im Fall keilgezinkter Lamellen – geringer Keilzinkenfestigkeit wurde ein spröder Biegezugbruch ohne oder nur mit sehr leichten Nichtlinearitäten beobachtet. Abb. 2a zeigt exemplarisch die Last-Durchbiegungslinie eines Verbundträgers mit einer FSH-Lamelle der Holzart Fichte ohne Keilzinkenverbindung; Abb. 2b zeigt das entsprechende Bruchbild des spröden Biegezugbruches.

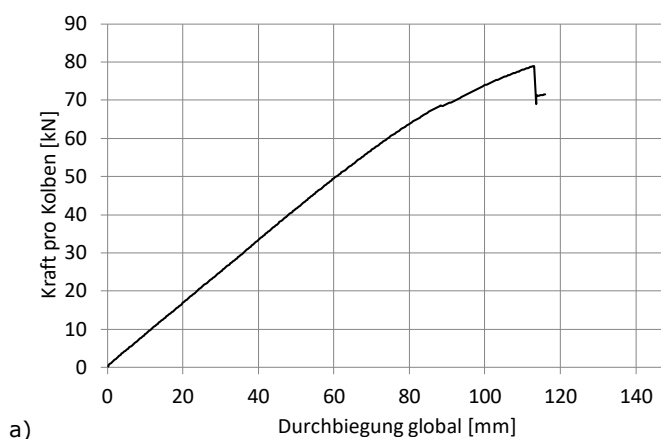


a)

b)

Abbildung 2: Typisches Beispiel für die Lastverschiebungskurve (a) und das Bruchbild (b) eines im Biegezug-Modus versagten Verbundträgers (hier: FSH-Anteil 12,5%, Holzart Fichte, ohne Keilzinken)

In den Fällen mit höherem Verstärkungsgrad oder einer höheren Furnierschichtholzfestigkeit bzw. höheren FSH-Keilzinkenfestigkeit ergaben sich deutlich erkennbare lokale Schädigungen – d.h. Druckfalten und sekundäre Rissbildungen – im Druckbereich mit einer deutlichen globalen Nichtlinearität des Last-Durchbiegungsverhaltens. Nachfolgend kommt es in vielen Fällen dann zu einem spröden Biegezug-Bruch. Abb. 3a zeigt exemplarisch die Last-Durchbiegungslinie eines Verbundträgers mit zwei Birke-FSH-Lamellen mit Keilzinkenverbindungen; Abb. 3b zeigt die deutlich sichtbare Schädigung im Druckbereich und das Bruchbild des letztendlich erfolgten Biegezugbruches.



a)

b)



c)



Abbildung 3: Typisches Beispiel für die Lastverschiebungskurve (a) und die Bruchbilder eines zunächst in der Druckzone geschädigten Verbundträgers (b), der schließlich im Biegezug-Modus versagt (c); FSH-Anteil 25%, Holzart Birke, mit Keilzinken

In einigen Fällen – hier ausschließlich bei den Holzarten Buche und Birke – wurde nach der Ausbildung von Schädigungszonen im Druckbereich und einem stark nichtlinearem Verhalten sogar ein regerechtes Biege-Druck-Versagen mit lokalem Stabilitätsversagen (Ausknicken) der Nadelholzlamellen beobachtet. Bei diesen Verbundträgern bleibt die Biegezugzone nach dem globalen Versagen unversehrt. Abb. 4a zeigt exemplarisch die Last-Durchbiegungslinie eines Verbundträgers mit zwei Buche-FSH-Lamellen ohne Keilzinkenverbindungen; Abb. 4b zeigt das Bruchbild des Biege-Druck-Bruches.

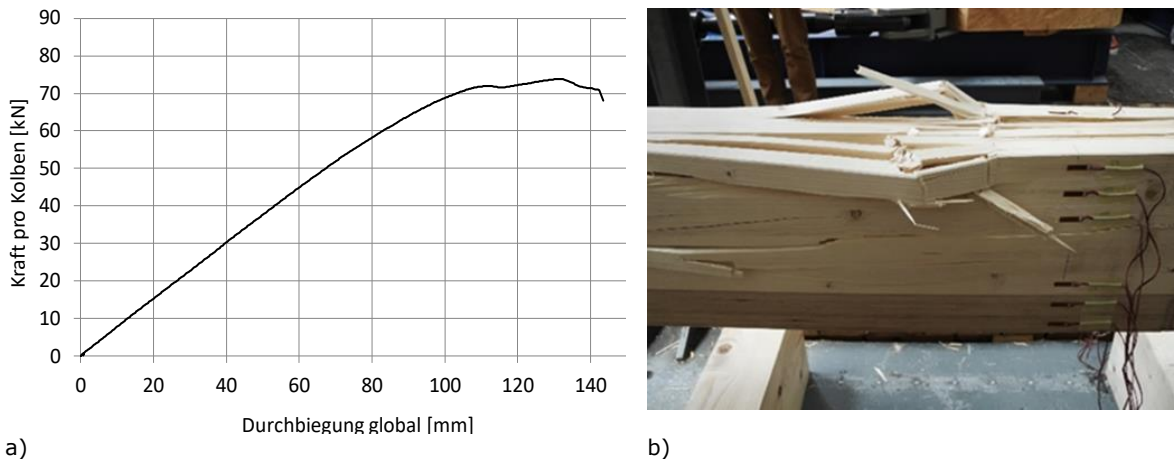


Abbildung 4: Typisches Beispiel für die Lastverschiebungskurve (a) und das Bruchbild (b) eines im Druckbereich versagten Verbundträgers; hier: FSH-Anteil 25%, Holzart Buche, ohne Keilzinken

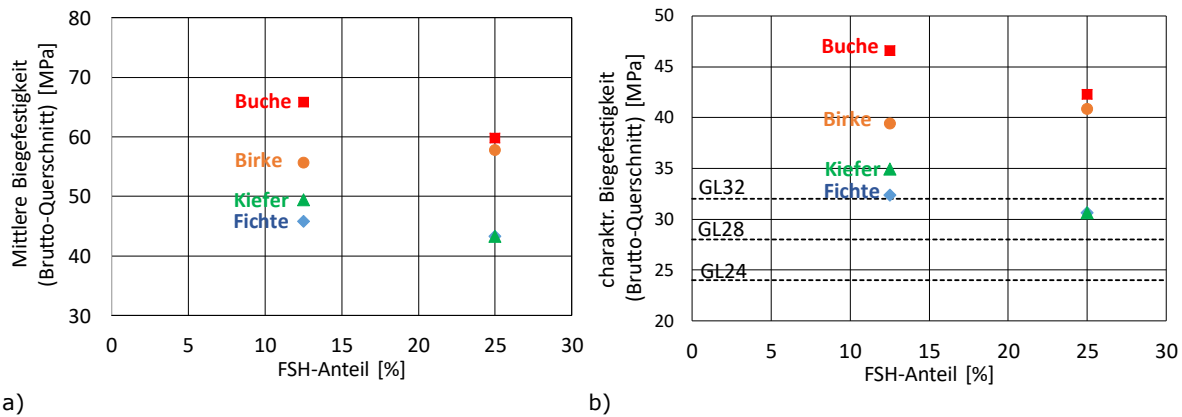
Von den vielfältigen Messergebnissen sollen im Folgenden in erster Linie die wichtigsten Ergebnisse, nämlich die Biegefestigkeiten überblicksartig vorgestellt werden. In Abb. 5a sind die Mittelwerte der Biegefestigkeiten für alle Verbundträger ohne Keilzinkenverbindungen gegenüber dem Furnierschichtholzanteil dargestellt. Jeder Datenpunkt repräsentiert dabei den Mittelwert von 6 bzw. 7 Bauteilversuchen. Es ergeben sich mittlere Biegefestigkeiten zwischen 32,4 und 46,6 N/mm<sup>2</sup>. Es ist klar zu erkennen, dass durch die Erhöhung des Furnierschichtholzanteils von 1 auf 2 Lamellen bzw. von 12,5% auf 25% Querschnittsanteil die Festigkeitswerte nicht mehr, wie intuitiv zu vermuten, ausgeprägt ansteigen. Bei drei von 4 Holzarten (Ausnahme ist die Holzart Birke) ist sogar ein leichter Abfall zu beobachten.

Aufgrund der geringen Prüfkörperzahl (pro Holzart und Konfiguration jeweils nur 6 oder 7 Prüfkörper) wurden die charakteristischen Werte der Biegefestigkeiten nicht direkt aus den empirischen Daten abgeleitet, sondern unter folgenden Annahmen abgeschätzt:

- Es wird eine Normalverteilung angenommen.
- Der Mittelwert der angenommenen Normalverteilung ist identisch mit dem empirisch bestimmten Mittelwert.
- Der angenommene Variationskoeffizient liegt bei 15%.
- Als charakteristischer Wert wurde der 5%-Quantilwert der Normalverteilung definiert

Zusätzlich wurde – für eine Vergleichbarkeit mit Normwerten – eine Abminderung mit einem Größenskalen-Effekt (size-Effekt) gemäß EN 14080 bzw. Eurocode 5 auf die Referenzhöhe von 600 mm durch Multiplikation mit dem Faktor  $k_h = (320/600)^{0,1}$  vorgenommen.

Zufolge der genannten Annahmen, die – vor allem hinsichtlich des angenommenen Streuungsmaßes als eher konservativ anzusehen sind – können die in Abb 5b dargestellten charakteristischen Biegefestigkeitswerte abgeleitet und mit den charakteristischen Biegefestigkeitswerten der üblichen in EN 14080 tabellierten Brettschichtholzfestigkeitsklassen verglichen werden. Letztere sind in dem Bild als gestrichelte Linien eingetragen.



a)

b)

Abbildung 5: Ergebnisse der Biegeversuche an Verbundträgern ohne Keilzinkenverbindungen in den FSH-Lamellen in Abhängigkeit vom Furnierschichtholzanteil

a) Mittelwerte (von jeweils 6 bzw. 7 Trägerbauteilen)

b) aus den empirischen Mittelwerten abgeleitete charakteristische Werte

Die Abschätzung ergibt folgende Biegefestigkeitseinstufungen der Verbundträger ohne Keilzinken in den FSH-Lamellen (jeweils für den Verstärkungsgrad 12,5%)

- Fichte-FSH kombiniert mit GL24 → ≈ GL32
- Kiefer-FSH kombiniert mit GL24 → ≈ GL35
- Birke-FSH kombiniert mit GL24 → ≈ GL40
- Buche-FSH kombiniert mit GL24 → ≈ GL45.

Es ist festzustellen, dass bereits der Einsatz des schwächsten FSH-Materials zu Biegefestigkeiten führt, die der höchsten heute am Markt verfügbaren Standard-BSH-Festigkeitsklasse entspricht. Mit Kiefer-FSH erreicht man bereits nahezu den Bereich der früheren «Premiumklasse» GL36 und mit Birke und Buche stößt man in Festigkeitsbereiche vor, die bislang ausschließlich mit Buche-Hybridträgern – hierbei jedoch mit wesentlich höheren Laubholzanteilen – erreicht werden konnten. In diesem Sinne kann man mit Recht von «Hochleistungs-Verbundträgern» sprechen.

Hierbei ist jedoch zu betonen, dass sich diese Einstufung ausschließlich auf die Biegefestigkeit bezieht und zunächst nur für Verbundträger mit FSH-Lamellen ohne Keilzinkenverbindungen gilt. Im Weiteren sollen daher die Ergebnisse der Verbundträger mit Keilzinkenverbindungen in den FSH-Lamellen betrachtet werden.

Abbildung 6 zeigt exemplarisch den Einfluss der Keilzinkenverbindungen in Nadelholz-FSH-Lamellen – hier für die Holzart Fichte – und in Laubholz-FSH-Lamellen – hier für die Holzart Buche. Es sind jeweils die Mittelwerte und Streuungsmaße für die Verbundträger mit ungezinkten FSH-Lamellen und für zwei Kollektive mit keilgezinkten FSH-Lamellen – für zwei unterschiedliche Klebstoffe – in Abhängigkeit vom Furnierschichtholzanteil dargestellt. Die Verbundträger mit Nadelholz-FSH-Lamellen zeigen einen nur sehr geringen Einfluss der Keilzinkungen auf die Festigkeitswerte. Entsprechend unterscheiden sich die beiden Klebstoffvarianten kaum. Ebenso ist der Unterschied zwischen den beiden Furnierschichtholzanteilen 12,5% und 25% gering, wobei für die Träger mit den keilgezinkten Lamellen – im Gegensatz den Trägern mit nicht keilgezinkten FSH-Lamellen – eine leicht positive Tendenz für höhere Anteile zu beobachten ist (Lamellierungseffekt).

Aufgrund der tendenziell schwierigeren Verklebbarkeit der Keilzinkenstöße in den Laubholz-FSH-Lamellen (siehe Abb. 1, Abschnitt 2.1) sinkt die entsprechende Biegefestigkeit der Laubholz-FSH-Verbundträger – in Abhängigkeit vom Klebstofftyp – teilweise deutlich ab. Bei Erhöhung der Lamellenanzahl kann ein Teil dieses Abfalls dann wieder kompensiert werden (tw. ausgeprägter Lamellierungseffekt).



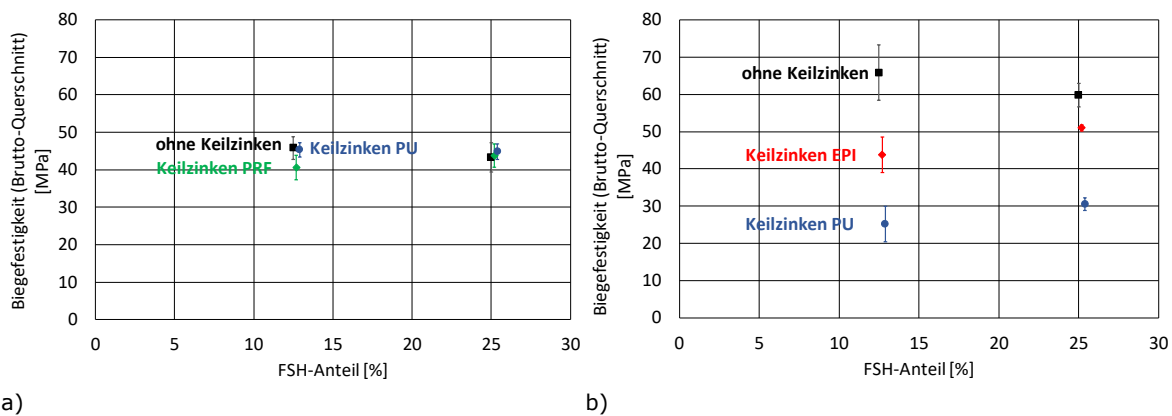


Abbildung 6: Einfluss der Keilzinkenverbindungen in den FSH-Lamellen auf die Biegefestigkeit der Verbundträger

a) Fichte-FSH mit und ohne Keilzinkenverbindungen

b) Buche-FSH mit und ohne Keilzinkenverbindungen

Insgesamt kann das Leistungspotential der Verbundträger hinsichtlich der Biegefestigkeit – in vereinfachender Weise – wie folgt charakterisiert werden:

- Die Verbundträger mit Nadelholz-FSH-Lamellen können – mit nur geringem Optimierungsaufwand und üblichen Klebstoffen – auch aus keilgezinkten Lamellen hergestellt werden, ohne in größerem Maße an Festigkeit einzubüßen. Das absolute Festigkeitsniveau bleibt jedoch auf den für Standardbrettschichtholz üblichen Rahmens beschränkt.
- Verbundträger mit Laubholz-FSH-Lamellen stoßen – ohne Keilzinken im Furnierschichtholz – in deutlich höhere Festigkeitsbereiche vor. Ob der Festigkeitsvorteil jedoch beim Einsatz keilgezinkter FSH-Lamellen erhalten bleibt, hängt ausgeprägt von der spezifischen Holzart/Klebstoffkombination ab. Für die Realisierung hoher Keilzinkenfestigkeiten und damit der Ermöglichung wirtschaftlich herstellbarer «Hochleistungs-Verbundträger» besteht dabei ein hohes Optimierungspotential.

### 2.3. Vollholz-Furnierschichtholz-Verklebung

Für die dauerhafte Sicherstellung der Leistungseigenschaften der Verbundträger ist eine feste und dauerhafte Verklebung zwischen den Vollholz- und Furnierschichtholzlamellen sicherzustellen. In dem Forschungsprojekt wurde insbesondere untersucht, mit welchen Methoden und nach welchen Anforderungskriterien die Klebfugenintegrität bei einer anfänglichen Typprüfung und anschließend dann regelmäßig im Rahmen der werkseitigen Produktionskontrolle (WpK) beurteilt werden kann.

Zunächst wurden folgende Prüfmethode auf die Verbundfuge angewandt, die für die beiden Bestandteile Brettschichtholz und Furnierschichtholz in den entsprechenden europäischen harmonisierten Bauproduktnormen EN 14080 und EN 14374 verankert und zur Qualitätssicherung der jeweiligen Bauprodukte seit Jahren bewährt sind:

- Delaminierungsprüfung nach EN 14080
- Blockscherprüfung nach EN 14080 und
- Aufstechprüfung nach Kochwechsellagerung nach EN 14374

Die drei Testmethoden wurden mit einer Reihe unterschiedlicher Holzart / Klebstoff-Kombinationen getestet. In den Abbildungen 7 bis 10 sind die Ergebnisse für vier exemplarisch ausgewählte Konfigurationen dargestellt. Bei einer der vier Konfigurationen (Buche/MUF1) waren im Rahmen der Untersuchungen Verklebungsdefizite festgestellt worden, die anderen drei Konfigurationen zeigten eine gute Verklebungsintegrität.

Für die einzelnen Konfigurationen sind die Mittelwerte und Minimal- bzw. Maximalwerte der bestimmten Parameter – d.h. des Delaminierungsgrades, der Scherfestigkeit und der Faserbruchanteile – in einem Säulendiagramm aufgetragen. Der jeweilige Anforderungswert aus der entsprechenden Produktnorm wurde als gestrichelte Linie eingetragen. Im Einzelnen ist zu erkennen, dass

- alle Konfigurationen den Anforderungswert der EN 14080 für den Delaminierungsgrad deutlich erfüllen (Verfahren A: weniger als 10% nach dem 3. Zyklus),
- alle Konfigurationen die geforderte Mindest-Scherfestigkeiten nach EN 14080 deutlich überschreiten (Einzelwerte: 4 N/mm<sup>2</sup> und Mittelwert 6 N/mm<sup>2</sup>) und dass
- sich aus der Aufstechprüfung bei 2 Konfigurationen geringfügige Unterschreitungen und bei der Konfiguration Buche / MUF1 erhebliche Unterschreitungen des Mindestwertes des Faserbruchanteils von 70% gemäß EN 14374 ergeben.

Somit lassen sich für alle drei Methoden – in unterschiedlichem Umfang – Defizite feststellen:

- Die Delaminierungsprüfung erlaubt keine Unterscheidung zwischen schlechter und ausreichender Verklebungsqualität, da die erzeugten Klima-Beanspruchungen aufgrund der fehlenden Jahrringkrümmung – und damit geringerer Anisotropieeinflüsse – im Furnierschichtholz vergleichsweise gering sind und beinahe alle Klebefugen unabhängig von der Verklebungsqualität die Anforderungen erfüllen würden. Aus diesem Grund ist die Delaminierungsprüfung z.B. auch nicht für die Qualitätssicherung von Furnierschichtholz selbst anwendbar.
- Die Block-Scherfestigkeit (ohne Vorbehandlung) ist deutlich von der Rohdichte abhängig und daher im Allgemeinen – ohne weitere Anpassung und spezielle Kalibrierung – nicht zusammen mit den Nadelholz-Anforderungswerten auf Laubholz übertragbar. Dies zeigt sich hier an den sehr hohen Festigkeitswerten ausgerechnet an den Proben der problematischen Buche/MUF1-Verklebung; vermutlich ausschließlich aufgrund der hohen Buche-Rohdichte des Furnierschichtholzes.
- Die Aufstechprüfung nach Kochwechsellagerung ist prinzipiell geeignet zur Charakterisierung der Verklebungsintegrität der Verbundfuge. So ist mit dieser Methode klar eine Unterschreitung des Mindest-Faserbruchanteils für die problematische Buche / MUF1-Konfiguration festzustellen. Jedoch werden auch bei den anderen drei unproblematischen Referenz-Verklebungen der Grenzwert entweder leicht unterschritten oder gerade noch erreicht. Hierbei müssen die leichten Unterschreitungen des Mindestwertes jedoch aufgrund der Unsicherheit bei der – visuell und teilweise nach reinen Erfahrungskriterien durchgeführten – Bestimmung des Faserbruchanteils vorsichtig bewertet werden. Das Verfahren hat generell einen recht hohen subjektiven Anteil und dient eher zur einer qualitativen Bewertung, wobei andererseits deutliche «Ausreißer» sicher detektierbar sind.

Aufgrund der Nachteile der getesteten Methoden wurde eine neue Methode entwickelt und ein entsprechender Anforderungswert vorgeschlagen. Bei der neuen Methode handelt es sich um ein modifiziertes Blockscher-Verfahren. Hierbei werden zwei Prüfscheiben direkt nebeneinanderliegend aus dem Prüfling herausgetrennt und an der Verbundfuge folgende Prüfungen durchgeführt:

1. Blockscherprüfung nach EN 14080 ohne vorherige Vorbehandlung
2. Blockscherprüfung nach EN 14080 nach Kochwechsellagerung nach EN 14374 mit Rücktrocknung auf die Ausgangsholzfeuchte
3. Bildung des Verhältniswertes der Scherfestigkeiten mit und ohne Vorbehandlung.

Abb. 10 zeigt das Ergebnis der neuen Prüfmethode für die 4 Holzart/Klebstoff-Konfigurationen. Während bei der problematischen Konfiguration Buche / MUF1 ein deutlicher Abfall der Scherfestigkeiten durch die Vorbehandlung sowohl auf dem Mittelwerts- wie auf dem Minimalwerts-Niveau zu erkennen ist, gibt es bei den anderen (Referenz-) Konfigurationen nur sehr geringe Reduktionen. Insgesamt kann eine trennscharfe Unterscheidung zwischen problematischer und intakter Verklebung durch einen Anforderungswert von 70% erreicht werden. Dieser Wert ist in das Diagramm als gestrichelte Linie eingetragen.

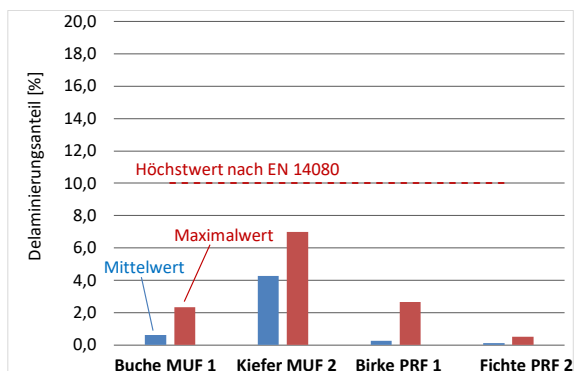


Abbildung 7: Ergebnisse der Delaminierungsprüfungen nach EN 14080

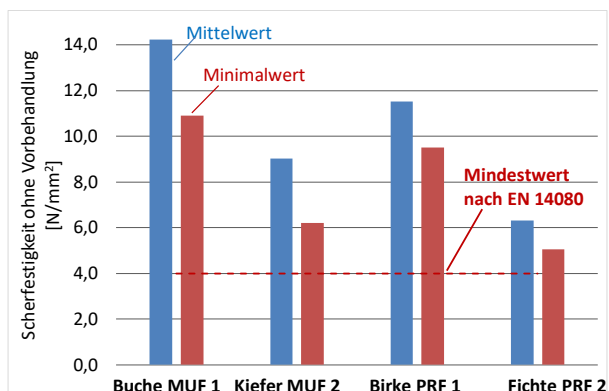


Abbildung 8: Ergebnisse der Blockscherprüfungen nach EN 14080

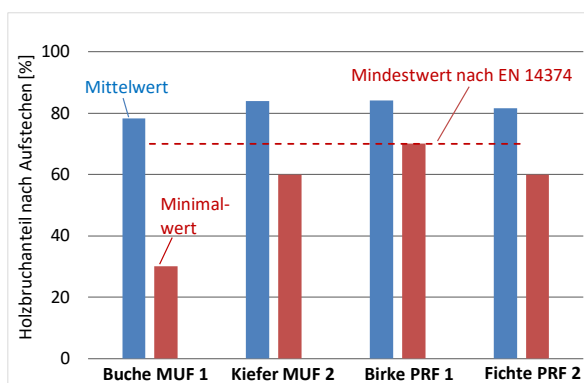


Abbildung 9: Ergebnisse der Aufstechprüfungen nach EN 14374

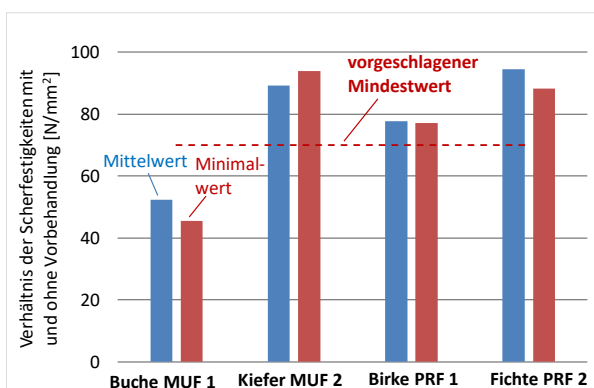


Abbildung 10: Verhältniswerte der Blockscherprüfungen mit und ohne Kochwechsellvorbehandlung

Das neue Verfahren ist – anders als die Aufstechmethode – vollständig objektiv und quantitativ, detektiert klar die problematische Verklebung und scheint insgesamt ein robustes Verfahren zu sein, da der vorgeschlagene Anforderungswert auch auf das Mittelwertsniveau anwendbar und damit unempfindlicher gegenüber einzelnen Ausreißern ist.

### 3. Rechnerische Modellierung

Für die notwendige Verallgemeinerung der empirisch ermittelten Festigkeitsergebnisse von bestimmten experimentell geprüften Konfigurationen und Holzarten auf im Prinzip beliebige Querschnittsaufbauten und auch andere Furnierschichtholzmaterialien ist eine rechnerische Modellierung notwendig. Hierzu wurden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt: Zum einen wurde eine zweidimensionale FE-Modellierung der Hybridträger einschließlich Schädigungsansätzen und stochastischer Variation aller verwandter Parameter durchgeführt. Zum anderen wurde – deutlich vereinfacht und eindimensional – eine durch Materialnichtlinearitäten im Biegedruckbereich modifizierte Verbundtheorie entwickelt.

#### 3.1. Modifizierte Verbundtheorie

Die lineare Verbundtheorie ist für die Modellierung der im Rahmen des Forschungsprojektes im Mittelpunkt stehenden einseitig durch Furnierschichtholz verstärkten Brettschichtholzträger nicht unmittelbar anwendbar. Durch die Verstärkung der Zugseite wäre nach linearer Berechnung stets sofort die Druckseite überlastet und praktisch keine Verstärkungswirkung erzielbar. Dies ist auch der Grund, weshalb bei asymmetrisch kombinierten Brettschichtholzträgern zufolge EN 14080 bei der Bestimmung der Tragfähigkeit der Nachweis der Biegedruckspannungen zufolge linearer Verbundtheorie in bestimmten Fällen entfallen kann. Da Brettschichtholz bei Erreichen der Druckfestigkeit parallel zur Faserichtung ein ausgeprägt duktileres bzw. später nichtlineares Verhalten ohne die sofortige Tendenz zum Spröbruch zeigt, muss dieser Effekt für eine Berechnung des Tragverhaltens miteinbezogen werden. Durch die nichtlineare Modifikation ist jedoch zunächst das Gleichgewicht von Biegedruck- und Biegezugspannungen im Querschnitt verletzt und kann

erst wieder durch eine geeignete Verschiebung der – zunächst auf Grundlage einer linearen Rechnung festgelegten – neutralen Faser wiederhergestellt werden. Durch die eingeführte Materialnichtlinearität ist also für jeden Beanspruchungsschritt eine iterative Berechnung notwendig.

Für die Anwendung der modifizierten Verbundtheorie wurde folgendes Materialverhalten bei Druckbelastung parallel zur Faserrichtung implementiert (vergl. z.B. [5]): Lineares Verhalten bis zur charakteristischen Druckfestigkeit, danach Verringerung der Steifigkeit auf 30% des Ausgangswertes bis zum Erreichen des 1,25-fachen charakteristischen Druckfestigkeitswertes; danach Entfestigung.

Für die Zugzone wurde lineares Materialverhalten mit sprödem Versagen bei Erreichen der jeweiligen charakteristischen Zugfestigkeit angenommen. Zur Berücksichtigung des Lamellierungseffektes zwischen Vollholz- und Furnierschichtholzlamellen – also der möglichen Lastumlagerung bei Erreichen der lokalen Festigkeiten – wurden eine um den Faktor 1,2 erhöhte Biegezugfestigkeit des Vollholzmaterials angesetzt.

Zur Modellierung der Tragfähigkeit von einseitig verstärkten Verbundträgern wurde folgendes Vorgehen gewählt, das eine rechnerische Nachbildung der 4-Punkt-Biegeversuche ermöglicht:

- Mit den gegebenen linearen Anfangssteifigkeiten wird die Lage der neutralen Faser und anschließend aus einer aufgeprägten Rotation das resultierende Moment bestimmt.
- Bei Erreichen einer Nichtlinearität wird die neutrale Faser so lange verschoben, bis der Gleichgewichtszustand wieder erreicht ist.
- Die aufgeprägte Rotation wird solange erhöht, bis das Maximum des resultierenden Momentes – in diesem Zusammenhang als das Bruchmoment definiert – erreicht ist.

Mit der geschilderten Methode lässt sich das Momentenragverhalten von Querschnitten mit unterschiedlichen Furnierschichtholzanteilen und / oder mit unterschiedlichen Furnierschichtholzeigenschaften berechnen.

In Abbildung 11 ist das Ergebnis einer solchen Berechnung in Abhängigkeit von dem Furnierschichtholzanteil für die vier verschiedenen Furnierschichtholz-Arten dargestellt. Die Momentenragfähigkeit ist hierbei verallgemeinernd als effektive Biegefestigkeit – bezogen auf den Brutto-Querschnitt – angegeben. Als Eingangsdaten wurden nominelle Werte verwendet; d.h. es wurden die charakteristischen Zug- und Druckfestigkeiten von FSH und BSH sowie die Mittelwerte der E-Moduln den Leistungserklärungen bzw. Normen entnommen.

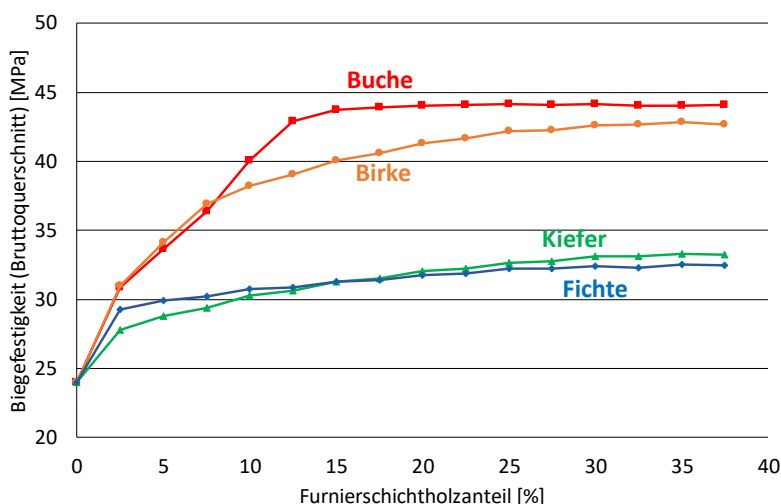


Abbildung 11: Rechnerische Biegefestigkeiten als Ergebnis der modifizierten Verbundtheorie in Abhängigkeit vom Furnierschichtholzanteil und der vier FSH-Holzarten

Vergleicht man die Berechnungsergebnisse mit den aus den empirischen Biegefestigkeiten abgeschätzten charakteristischen Werten (siehe Abbildung 6b), ist sowohl qualitativ als auch quantitativ generell eine gute Übereinstimmung festzustellen. Darüber hinaus kann auf andere Furnierschichtholzanteile extrapoliert werden: Für sehr kleine Verstärkungsgrade sind die Unterschiede zwischen den Holzarten deutlich geringer als im getesteten

Bereich. Der geprüfte Verstärkungsgrad von 12,5% liegt nahe an der Stelle mit der größten Spreizung der Festigkeiten zwischen den Laub- und Nadelholzarten. Für die Holzart Buche gibt es danach – in Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen – kaum noch eine weitere Steigerung der Tragfähigkeit, während für die Holzart Birke noch Steigerungspotential – ebenfalls tendenziell in den experimentellen Daten sichtbar – für größere Verstärkungsgrade vorhanden ist.

### 3.2. Stochastische Finite-Element-Modellierung

Trotz guter Übereinstimmungen der Ergebnisse der modifizierten Verbundtheorie mit den empirischen Daten, hat das vergleichsweise einfache Modell einige Nachteile:

- Der Einfluss der stark unterschiedlichen Streuungsmaße der verbundenen Materialien lässt sich nicht abbilden.
- Bei der Übertragung auf größere Querschnitte bleibt die Frage des Größenskalen-Effektes (size-Effekt) unbeantwortet.
- In der eindimensionalen Modellierung können lokale Schwachstellen – z.B. Keilzinkenverbindungen – und deren Verteilung nicht adäquat berücksichtigt werden.

Zur Modellierung der genannten Aspekte wurde ein 2D Finite-Element-Modell mit voller Berücksichtigung der Materialnichtlinearitäten, lokalisierter Keilzinkenverbindungen und stochastischer Monte-Carlo-Variation aller streuenden Parameter sowie deren Autokorrelation entwickelt. Die Grundlagen des Modells, das hinsichtlich der nichtlinearen Materialmodellierung auf der XFEM-Methode beruht, sind in [6] erläutert. Als Eingangsdaten wurden die empirisch ermittelten Festigkeitsverteilungen und E-Moduln der keilgezinkten und ungezinkten FSH-Lamellen verwendet. Das konstitutive Modell des Druckversagens entsprach den gleichen Annahmen wie denjenigen, die für die modifizierte Verbundtheorie verwendet wurden. Für die Keilzinken wurde ein Kohäsiv-Zonen-Ansatz (siehe z.B. [7]) verwendet.

Abbildung 12b zeigt Modellierungsergebnisse im Vergleich zu den empirischen Daten (Abb. 12a) für die Biegefestigkeiten der Verbundträger aus FSH-Lamellen mit Keilzinkenverbindungen für vier verschiedene Holzart/Klebstofftyp-Konfigurationen.

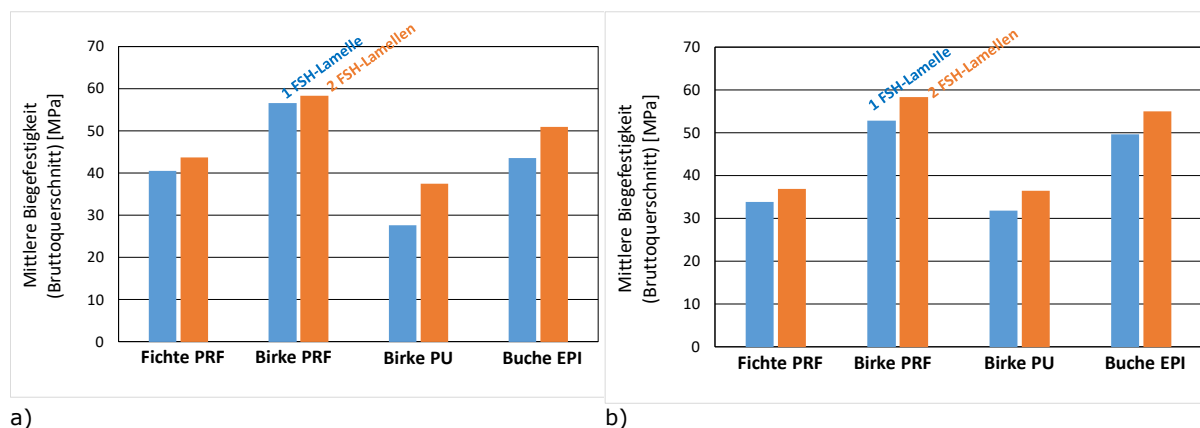


Abbildung 12: Rechnerischer und empirischer Einfluss der Zahl der Verstärkungslamellen mit Keilzinkenverbindungen auf die mittlere Biegefestigkeit der Verbundträger

a) Empirische Daten

b) Ergebnisse der stochastischen FE-Simulationen

Zunächst ist – bei vielen Konfigurationen auch quantitativ – eine gute Übereinstimmung zwischen Versuchs- und Simulationsergebnissen festzustellen.

Die rechnerischen Ergebnisse spiegeln auch die Tatsache wider, dass – im Gegensatz zu dem Fall der Verbundträger aus FSH-Lamellen ohne Keilzinkenverbindungen – die Erhöhung der FSH-Lamellenzahl von 1 auf 2 Lamellen eine Steigerung der auf den Bruttoquerschnitt bezogene Biegefestigkeit bewirkt. Im Mittel über alle Konfigurationen wird außerdem die Größe der Festigkeitserhöhung infolge einer zusätzlichen 2ten FSH-Lamelle mit dem Faktor 1,11 – gegenüber 1,15 aus den Versuchen – sehr gut vorhergesagt. Wie hier exemplarisch gezeigt eignet sich das Modell zur Festigkeitsberechnung beliebiger Konfigurationen einschließlich der Berücksichtigung von keilgezinkten FSH-Lamellen.

## 4. Zusammenfassung

In dem vorgestellten Forschungsprojekt wurden Hochleistungsverbundträger aus Vollholz- und Furnierschichtholzlamellen untersucht. Die Ergebnisse für Verbundträger mit FSH-Lamellen ohne Keilzinkenverbindungen ergaben bei einseitiger Verstärkung von GL24-BSH mit Furnierschichtholz aus Laubholz und einem Verstärkungsgrad von 12,5% charakteristische Biegefestigkeiten bis zu etwa GL45. Bei Furnierschichtholzlamellen aus Nadelholz können die Biegefestigkeiten der höchsten Standard-Brettschichtholzklassen (GL32, GL36) erreicht werden. Der Einfluss von Keilzinkenverbindungen in den Furnierschichtholzlamellen wirkt sich je nach Holzart/Klebstoffkombination unterschiedlich aus. Während sich für die Nadelholzlamellen bei gängigen Klebstofftypen nur geringe bis gar keine Festigkeitsreduktionen ergeben, kann das hohe Festigkeitspotential der Laubholz-FSH-Lamellen nur bei einigen Klebstoffen ausgeschöpft werden. Durch Optimierung der Verklebungsparameter sind hier jedoch voraussichtlich noch erhebliche weitere Verbesserung zu erreichen.

Hinsichtlich der Flächenverklebung von FSH und Vollholz wurde gezeigt, dass übliche Methoden zur Qualitätssicherung aus dem Brettschichtholzbereich – Delaminierungs- und Blockscherprüfung – keine validen Qualitätsaussagen zur dauerhaften Klebfugenintegrität liefern. Es wurde daher ein neues Verfahren zur Klebfugenbeurteilung entwickelt, welches auf einer Bewertung des Verhältnisses von Blockscherfestigkeiten mit und ohne Kochwechsel-Vorbehandlung beruht.

Zur Modellierung der Festigkeitseigenschaften von einseitig verstärkten Verbundträgern wurden zwei Ansätze verfolgt. Neben einer umfassenden Finite-Element-Modellierung mit Berücksichtigung aller Materialnichtlinearitäten und der stochastischen Variabilität der Parameter wurde ein vereinfachtes Modell auf Grundlage einer modifizierten Verbundtheorie angewandt. Letzteres war – mit einigen notwendigen Modellannahmen – in der Lage, die charakteristischen Biegefestigkeiten von Verbundträgern ohne Keilzinken in den FSH-Lamellen gut vorherzusagen. Für die Modellierung des Einflusses von Keilzinkenverbindungen und der quantitativen Bestimmung des Größenskaleneffektes ist jedoch die aufwändigere FE-Modellierung notwendig.

## 5. Literatur

- [1] DIN EN 14080:2013: Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen. Deutsches Institut für Normung, Berlin, 2013
- [2] DIN EN 14374:2005: Holzbauwerke: Furnierschichtholz; Anforderungen. Deutsches Institut für Normung, Berlin
- [3] Dill-Langer, G., Aicher, S. (2016) High performance glulam beams made of beech LVL and solid wood lamellas: experiments and modelling. Proc. World Timber Eng. Conf., Wien
- [4] Dill-Langer, G., Aicher, S. (2017): High performance hybrid timber beams. in "Werkstoffe, Denkmalschutz und ..." (Hrsg. J. Hofmann), S. 73 – 90, ISBN 978-3-945773-05-5, IWB, Stuttgart
- [5] Frese, M., Enders-Comberg, M., Blaß, H.J. et al. (2012) Compressive strength of spruce glulam, Eur. J. Wood Prod. 70: 801.
- [6] Tapia, C., Aicher, S. (2017): Oak glulam bending strength by XFEM simulation including stochastic and autocorrelated board properties. in "Werkstoffe, Denkmalschutz und ..." (Hrsg. J. Hofmann), S. 365 – 382, ISBN 978-3-945773-05-5, IWB, Stuttgart
- [7] Serrano, E. (2000). Adhesive Joints in Timber Engineering. Modelling and Testing of Fracture Properties Division of Structural Mechanics, Lund University, Sweden