

Holzbewehrtes Holz

Von der Forschung zur Baupraxis

Niklas Kainz, Stefan Winter, Markus Lechner

Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München

Zusammenfassung: Holzbewehrtes Holz ist ein zusammengesetztes, stabförmiges Bauteil aus Brettschichtholz und Furnierschichtholz. Das Furnierschichtholz wird dabei hochkant in unterschiedlichen Orientierungen, Holzarten und Einlegevarianten verwendet, um vor allem die Schubtragfähigkeit sowie die Tragfähigkeit quer zur Faser der zusammengesetzten Träger zu erhöhen. Der Beitrag zeigt Ergebnisse der ersten abgeschlossenen Machbarkeitsstudie und die aktuellen Entwicklungen von holzbewehrtem Holz.

1 Einleitung

Holzbewehrtes Holz (HBH) ist ein zusammengesetztes, stabförmiges Bauteil aus Brettschichtholz (BSH) und Furnierschichtholz (FSH). Ziel ist es, beide Materialien so einzusetzen, dass ein für den jeweiligen Zweck optimiertes Bauprodukt konstruiert werden kann. Die BSH-Teilquerschnitte bestehen hierbei i.d.R. aus Nadelholz, wohingegen die FSH-Verstärkung i.d.R. aus Laubholz besteht. Durch die hochkant stehende Verstärkungsebene aus FSH (vgl. Abb. 1) lässt sich die Tragfähigkeit von HBH in gewissen Situationen im Vergleich zu normalem BSH deutlich erhöhen, wie die erste Machbarkeitsstudie für HBH von Markus Lechner [1] gezeigt hat. Das FSH besteht je nach Verstärkungsschema aus Furnieren die entweder beliebig zueinander orientiert, faserparallel oder kreuzweise verleget sind. Auf die unterschiedlichen Verstärkungsschemata wird im Folgenden genauer eingegangen. Lechner [1] hat vier grundsätzliche Möglichkeiten für die Positionierung der Verstärkung aus FSH aufgezeigt, welche in Abb. 1 dargestellt sind.

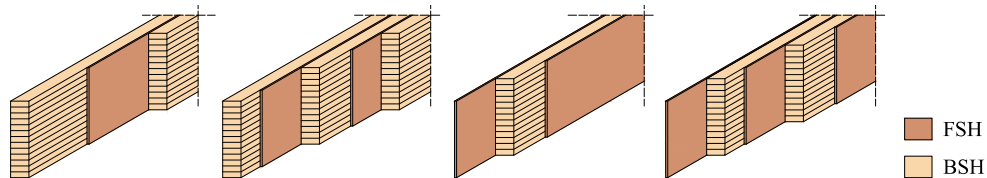


Abbildung 1: Anordnungsmöglichkeiten von Furnierebenen in HBH

Die Hauptaufgabe von HBH ist die Erhöhung der Tragfähigkeit und der Robustheit im Vergleich zu konventionellem BSH. Vor allem die Verbesserung der Schubtragfähigkeit sowie die Verstärkung der Tragfähigkeit in Richtung der Trägerhöhe (z-Richtung) ist erstrebenswert. Für die Verstärkung gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten, die in Betracht gezogen werden können. Zum einen ist dies die Verstärkung mittels Standardlamelle, welche über die Trägerlänge und -höhe hinweg denselben Aufbau besitzt. Zum anderen gibt es die maßgeschneiderte Verstärkung, angepasst an die jeweilige Position im Träger. Abb. 2 zeigt den Anschnitt eines HBH-Trägers mit dem Prinzip der beiden Verstärkungen.

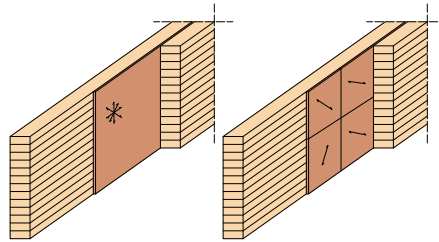


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Verstärkungsmöglichkeiten von HBH; (links) Verstärkung mit Standardlamelle; (rechts) Maßgeschneiderte Verstärkung

Die Verstärkung mittels Standardlamelle ist in Abb. 2 auf der linken Seite gezeigt. Zu sehen ist, dass diese über die gesamte Trägerlänge, sowie -höhe den gleichen Aufbau besitzt. Konträr dazu auf der rechten Seite dargestellt ist die maßgeschneiderte Verstärkung. Diese besteht aus FSH-Segmenten mit beliebiger Orientierung. Zu erkennen ist, dass die Verstärkungsebene aus FSH nun nicht mehr konstant über die Trägerlänge und -höhe ist, sondern zwischen den unterschiedlichen Segmenten variiert.

2 Holzbewehrtes Holz mit Standardlamelle

2.1 Allgemeines

HBH mit Standardlamelle wurde von Markus Lechner [1] in einem Forschungsprojekt an der Technischen Universität München erforscht. Es wurden u.a. die Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte von FSH-Standardlamellen aus Buche, sowie das Trag- und Steifigkeitsverhalten von HBH bei Biege-, Schub-, Querkzug- und Querdrukbeanspruchung numerisch sowie experimentell untersucht. Des Weiteren wurde die Tragfähigkeit von Ausklinkungen, Durchbrüchen sowie Queranschlüssen als auch das Verhalten bei Holzfeuchteänderungen analysiert.

2.2 Ergebnisse der ersten Machbarkeitsstudie

In diesem Abschnitt werden wichtige Erkenntnisse aus [1] wiedergegeben. Die komplette Ausarbeitung der Ergebnisse kann in [1] nachgeschlagen werden. Bei den durchgeführten Biegeversuchen mit HBH wurde festgestellt, dass die Mittelwerte der Biegefestigkeiten von HBH mit Standardlamelle ca. 10 % niedriger waren als jene der BSH-Prüfkörper. Die Querschnittsbreite von HBH und BSH war hierbei gleich und der Anteil der FSH-Verstärkung betrug 10 %. Durch die Verwendung der Standardlamelle, welche in [1]

hauptsächlich dafür ausgelegt war, Schub und die Querrichtung zu verstärken, zeigt sich die Verminderung der Biegefestigkeit als Schwachpunkt von HBH mit Standardlamelle. Bei der Schubbeanspruchung konnte Lechner [1] bei den untersuchten Querschnitten feststellen, dass sich die aufnehmbare Querkraft in HBH gegenüber dem Mittelwert der BSH-Prüfkörper um 67 % erhöht hat. Des Weiteren konnte er bei den Schubversuchen ermitteln, dass sich der Mittelwert des Schubmoduls in den betrachteten HBH-Querschnitten, je nach Aufbau, zwischen 20 % und 50 % erhöht hat. Bei den Versuchen zur Querkraft- sowie Querkraftfestigkeit von HBH kam Lechner [1] zu dem Schluss, dass die FSH-Verstärkungsebenen in HBH die Querkraft- sowie die Querkraftspannungen in den BSH-Teilquerschnitten deutlich reduzieren. Die Bruchlast konnte bei seinem Versuchsaufbau, in Abhängigkeit vom FSH-Aufbau, bei Querkraft um einen Faktor von 2,3 bis 4,7 und bei Querkraft im Mittel um einen Faktor von 2,0 bis 2,9 gesteigert werden. Bei Ausklinkungen, Durchbrüchen und Queranschlüssen wurde ermittelt, dass durch das HBH im Vergleich zum BSH Laststeigerungsfaktoren für Ausklinkungen zwischen 4,1 und 5,4, für Durchbrüche von 1,9 bis 2,1 und für Queranschlüsse zwischen 3,1 und 3,6 erreicht werden konnten.

2.3 Aktuelle Entwicklungen

In aktuellen Entwicklungen zu HBH mit Standardlamelle wird sowohl für die FSH-Standardlamelle als auch für das HBH die Anwendbarkeit von einfachen Berechnungsmethoden untersucht. In [1] wurden die Ergebnisse von HBH aus den Versuchen hauptsächlich mit Volumenelementen nachgerechnet, welche aufwändig zu modellieren sind und lange Rechenzeiten benötigen. Lediglich bei einem Standardträger im ungestörten Bereich wurden mittels konstruktiver Anisotropie die Spannungen nachgewiesen. Das aktuelle Ziel ist es, dem Anwender von HBH ausreichend genaue, jedoch wirtschaftliche Berechnungsansätze bereitzustellen, die in den meisten Situationen angewendet werden können. Eine weitere aktuelle Entwicklung ist die Optimierung der Standardlamelle. Ziel ist es, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem HBH mit Standardlamelle sowohl für einzelne, als auch für kombinierte Situationen optimiert werden kann. Zusätzlich soll eine robotergestützte Produktion von HBH mit Standardlamelle entwickelt werden.

3 Holzbewehrtes Holz mit maßgeschneiderter Verstärkung aus Furnierschichtholz mit und ohne Querlagen

3.1 Allgemeines

Die maßgeschneiderte Verstärkungsebene aus FSH-Segmenten erlaubt es im Gegensatz zur Standardlamelle, über die Trägerlänge und -höhe hinweg unterschiedliche Parameter zu verstärken. So ist es z.B. möglich, bei einem gewöhnlichen Einfeldträger die Schubtragfähigkeit im Auflagerbereich zu unterstützen und in der Mitte des Trägers die Biegesteifigkeit respektive -festigkeit zu erhöhen. Die maßgeschneiderte Verstärkung erlaubt alle möglichen Trägerformen und Verstärkungsrichtungen. Für die Konstruktion der Verstärkungsebene können unterschiedlichste Optimierungsalgorithmen, wie zum Beispiel evolutionäre Algorithmen, angewendet werden, um ein optimales Ergebnis zu erhalten. In dieser Arbeit wird ein einfacher und nur gering rechenaufwändiger Optimierungsprozess verwendet, um eine gut angenäherte Lösung zu bekommen und somit die Eigenschaften

dieser Verstärkungsvariante bei einer ersten numerischen Untersuchung zu ermitteln. Bei dem einfachen Optimierungsansatz wird zuerst ein konventioneller BSH-Träger berechnet. Anschließend werden die Spannungen ausgelesen und es wird die optimale Orientierung der FSH-Segmente gesucht. Danach wird mit dieser Orientierung das HBH modelliert. Abb. 3 zeigt diesen Prozess grafisch auf.

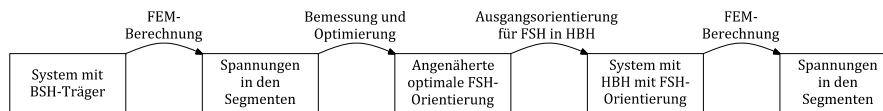


Abbildung 3: Grafische Darstellung des einfachen Optimierungsansatzes

3.2 Ergebnis erster numerischer Untersuchungen

Ein Einfeldträger mit Einzellast in der Nähe des Auflagers, dargestellt in Abb. 4, soll darlegen, welchen Einfluss die maßgeschneiderte Verstärkung auf den Träger hat. Der HBH-Träger besitzt einen Verstärkungsgrad von 10 %. Der Verstärkungsgrad bestimmt das Verhältnis von der Fläche der FSH-Verstärkung zu der des Gesamtquerschnittes.

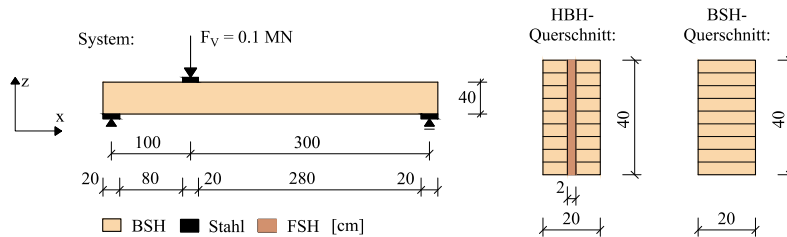


Abbildung 4: System und Querschnitt der Erstuntersuchung

Der zuvor dargestellte Einfeldträger wird für die Segmentierung in der Länge sowie in der Höhe in 10/10 cm große Segmente unterteilt. Abb. 5 zeigt die Segmentierung sowie die Nummerierung der Segmente, welche in der Ergebnisauswertung benötigt wird.

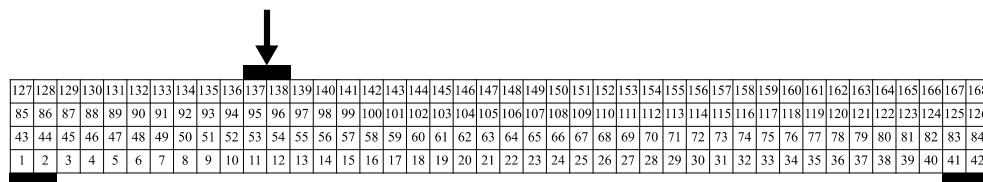


Abbildung 5: Nummerierung der Segmente für die Ergebnisauswertung

Die numerische Untersuchung wird mittels Finite Elemente Methode (FEM) in Ansys MAPDL 2023 R1 durchgeführt. Die Segmente werden bei der FEM-Berechnung in nochmals kleinere Elemente diskreditiert. Die radialen und tangentialen Eigenschaften des Holzes werden als „Eigenschaften quer zur Faser“ zusammengefasst. Es ergibt sich ein transversal isotropes Materialmodell. Als Material wird für das BSH „GL24h“ nach [2] und für das FSH „Baubuche S“ mit Materialkennwerten nach [3] verwendet. Die Modellierung wird als Volumen und dem Elementtyp SOLID185 durchgeführt. Als Versagenskriterium wird das Kriterium von Tsai-Hill [4] verwendet. Beim Optimierungsprozess wird als optimale Orientierung angesehen, die zur geringsten Ausnutzung des Gesamtquerschnittes unter dem Tsai-Hill-Kriterium führt. Als Vergleichsgrundlage werden zudem noch eine Verstärkung

mit FSH mit Faserrichtung ausschließlich in longitudinaler Trägerrichtung (x-Richtung) sowie eine Verstärkung ausschließlich in z-Richtung betrachtet. Diese sollen als Referenzbeispiele dienen.

Die resultierende Orientierung der FSH-Segmente mit dem vereinfachten Optimierungsprozess ist in Abb. 6 grafisch dargestellt.

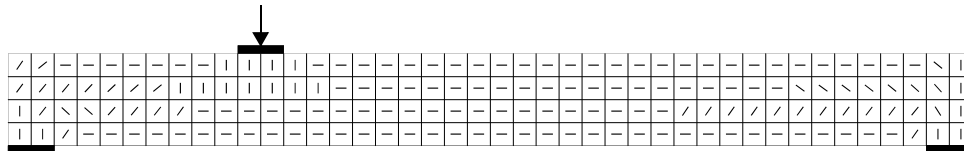


Abbildung 6: Angepasste Orientierung für die einzelnen FSH-Segmente als angenäherte optimale Verstärkung für Spannungs- und Dehnungsverhältnisse aus der Berechnung des BSH-Trägers

In den Auflagerbereichen sowie im Lasteinleitungsbereich ergeben sich Orientierungen, die vor allem die Querrichtung des Trägers unterstützen sollen. Am linken Trägerende zeigt sich zwischen Auflager und Lasteinleitung eine Verstärkung, die der Richtung der sich einstellen Druckdiagonalen entspricht. Dass in Trägermitte hauptsächlich die Längsrichtung gestützt wird, erweist sich ebenso als sinnvoll, da hier die höchsten Biegespannungen und nur in geringem Maße Schubspannungen vorhanden sind. Am rechten Trägerrand nehmen die Biegespannungen ab und es ergibt sich in Trägermitte eine Schubverstärkung als angenähertes optimales Ergebnis. Es lässt sich für den einfachen Optimierungsprozess behaupten, ein plausibles, jedoch nicht optimales Ergebnis erzielt zu haben.

Bei der weiteren Ergebnisbetrachtung werden Ergebnisse der Segmente ausgewertet und verglichen. Die Spannungen eines Segmentes ergeben sich aus dem Mittelwert der Spannungen aller zum Segment gehörenden finiten Elemente. Abb. 5 zeigt die Nummerierung der Segmente, auf welche in folgenden Grafiken verwiesen wird. Bei der Darstellung der Spannungs- sowie Ausnutzungsergebnisse werden Liniendiagramme verwendet, die den Ausnutzungsunterschied bzw. den Spannungsunterschied von Spannungen im BSH-Teilquerschnitt des HBH-Querschnitts zu den Spannungen des BSH-Trägers ohne Verstärkung darstellen sollen. Abb. 7 bis Abb. 10 beinhalten die Ergebnisse für die Segmente nach Abb. 6. Die strichlierten Linien symbolisieren den linken sowie den rechten Trägerrand für eine bessere Übersicht.

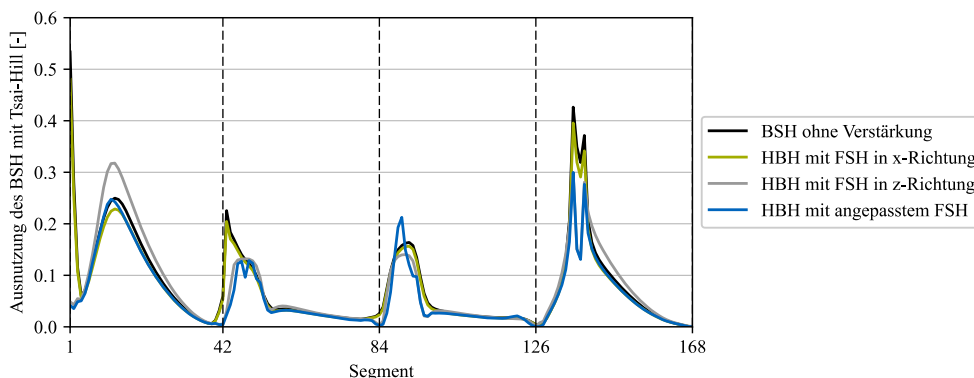


Abbildung 7: Ausnutzung des BSH in den unterschiedlichen Varianten

Bei der Ausnutzung der einzelnen Segmente ist zu erkennen, dass die angenäherte optimierte Variante in unterschiedlichen Bereichen des Trägers zu einer Verstärkung der Struktur führt. Die angepasste FSH-Orientierung führt in den Auflagerbereichen sowie im Lasteinleitungsbereich zu einer signifikanten Verringerung der Ausnutzung. Im Feldbereich zeigen sich ebenso Verbesserungen gegenüber dem BSH-Träger, allerdings nur in geringem Maße. Konträr hierzu erweisen sich die Verstärkung ausschließlich in x-Richtung sowie in z-Richtung nur in gewissen Bereichen als vorteilhaft. Während sich die Verstärkung in x-Richtung hauptsächlich im Feldbereich als wirksam erweist, zeigt sich bei der Verstärkung in z-Richtung eine erhebliche Verringerung der Ausnutzung im Auflagerbereich. Nachteilig ist bei der Verstärkung in z-Richtung allerdings die Erhöhung der Ausnutzung im Feldbereich. Hierdurch ergibt sich der Hauptvorteil der maßgeschneiderten Verstärkung.

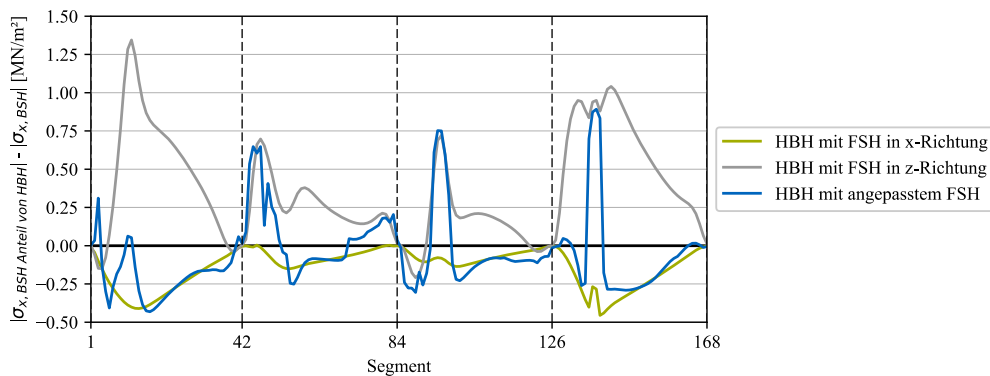


Abbildung 8: Spannungsunterschied der Normalspannung σ_x

Die Auswertung der Spannung in Trägerlängsrichtung (x-Richtung) zeigt eine deutliche Zunahme der Spannungen im BSH-Teilquerschnitt bei der Variante mit der Verstärkung in z-Richtung. Konträr hierzu führt die Variante mit der Verstärkung in x-Richtung zu einer Verringerung der Spannungen im BSH in x-Richtung. Bei der optimierten Verstärkung zeigt sich ein wechselndes Bild. Im Feldbereich ergibt sich i.d.R. eine Verringerung der Spannungen durch die Verstärkung, wohingegen in den Auflagerbereichen eine Vergrößerung der Spannungen in x-Richtung entsteht. Diese resultiert aufgrund der Verstärkung in den Auflagerbereichen auf Schub und Querdruck und ist in diesem Bereich mit dem aktuellen System nicht relevant.

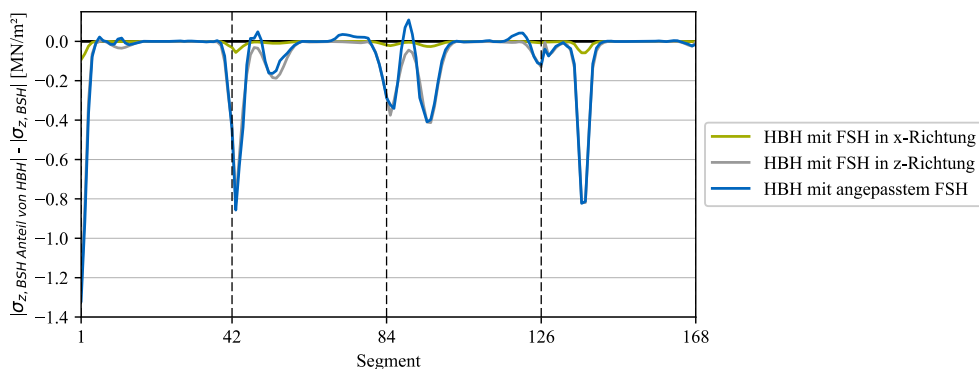


Abbildung 9: Spannungsunterschied der Normalspannung σ_z

Beim Vergleich des Einflusses der Varianten auf die Normalspannungen in z-Richtung ergeben sich bei der Verstärkung mit FSH in x-Richtung kaum Unterschiede zum BSH-Träger. Bei der Verstärkung mit FSH in z-Richtung ist, ebenso wie bei der optimierten Verstärkung, eine deutliche Verringerung der Spannungen in z-Richtung in den Auflagerbereichen und beim Lasteinleitungsbereich zu beobachten.

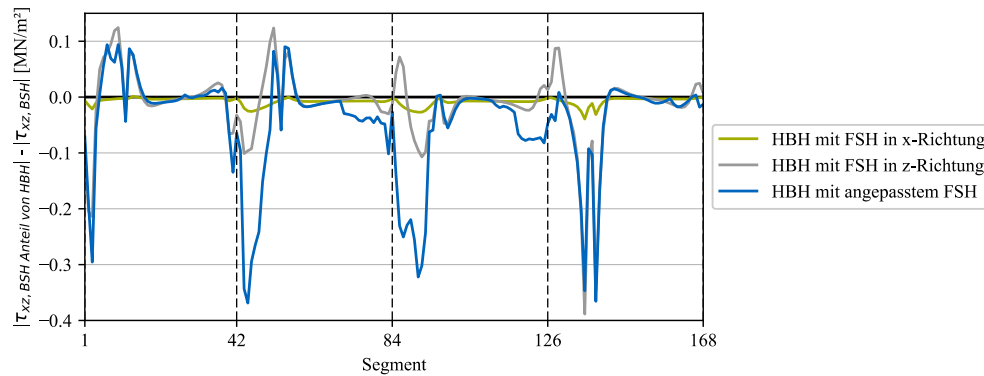


Abbildung 10: Spannungsunterschied der Schubspannung τ_{xz}

Der Vergleich der Schubspannungen offenbart, dass die optimierte Variante, wie erwartet, hauptsächlich in den auflagnahen Bereichen als Schubverstärkung wirkt. Durch die geneigte Orientierung des FSH-Segementes entsteht bei dem HBH-Querschnitt eine weitaus höhere Schubsteifigkeit als bei dem konventionellen BSH-Träger. Die erhöhte Schubsteifigkeit resultiert in geringeren Verzerrungen für das Segment, was wiederum zu geringeren Schubspannungen für die BSH-Teilquerschnitte führt.

Zusammenfassend lässt sich behaupten, dass die erste numerische Betrachtung der maßgeschneiderten Verstärkung die Erwartungen erfüllt hat. Durch die gezielte Orientierung der einzelnen Segmente ist es möglich, über die gesamte Trägerlänge sowie -höhe, eine Verstärkung der Struktur zu erzielen. Mit der gewählten einfachen Optimierung, die lediglich eine Annäherung erzielen sollte, konnte nicht in allen Bereichen eine Verstärkung erreicht werden. Die Ergebnisse bringen jedoch Zuversicht, dass mit einem besseren Optimierungsansatz das Ziel der Verstärkung der kompletten Struktur erreicht werden kann.

3.3 Herausforderungen

Es wird angenommen, dass das Verhalten der Fugen zwischen den einzelnen Segmenten wichtig für die Erhöhung der Tragfähigkeit und der Steifigkeit sein wird. Dieser Einfluss wurde in dieser Arbeit vernachlässigt und sollte mittels Parameterstudie und experimentellen Versuchen überprüft werden. Zurzeit ist noch offen, welche Plattenfüugung bezüglich des mechanischen Verhaltens sowie der Wirtschaftlichkeit geeignet wäre. Hierzu werden an der Technischen Universität München im aktuell durchgeführten Projekt zu HBH Versuche durchgeführt. Weitere Herausforderungen sind u.a. die wirtschaftliche und robotergestützte Herstellung der HBH-Träger.

4 Zusammenfassung und Ausblick

4.1 Holzbewehrtes Holz mit Standardlamelle

Die Erhöhung der Schubtragfähigkeit respektive -steifigkeit sowie die Erhöhung der Tragfähigkeit und Steifigkeit in Richtung der Trägerhöhe (z-Richtung) konnte durch die erste Machbarkeitsstudie von Lechner [1] bewiesen werden. Aktuelle Forschung zu HBH mit Standardlamelle wird hauptsächlich für die baupraktische Umsetzung durchgeführt. Fokussiert wird u.a. die einfache Handhabung von HBH bei der Berechnung sowie bei der Produktion. Des Weiteren werden Prozesse entwickelt, mit denen das HBH optimiert werden kann. Zusammenfassend lässt sich behaupten, dass HBH mit Standardlamelle aufgrund der Laststeigerungseffekte ein hohes Potential für die Zukunft besitzt.

4.2 Holzbewehrtes Holz mit maßgeschneiderter Verstärkung

Das HBH mit maßgeschneiderter Verstärkung steht noch am Anfang der Entwicklung. Erste numerische Berechnungen zeigen allerdings, dass sich die Theorie als zukunftsfähig erweist. Die Segmentierung und die damit verbundene Möglichkeit, den Träger variabel über die Trägerlänge und -höhe zu verstärken, kann eine Tragfähigkeitserhöhung in allen Bereichen des Trägers zur Folge haben. Aktuelle Untersuchungen werden u.a. zur Optimierung der Anordnung und Segmentierung, zur wirtschaftlichen Herstellung des Trägers sowie zum Einfluss der Fugen auf das Gesamttragverhalten durchgeführt.

Literatur

- [1] LECHNER, M.; Holzbewehrtes Holz – Entwicklung eines furnierverstärkten stabförmigen Holzproduktes für tragende Zwecke. Dissertation, Technische Universität München, 2021
- [2] DIN EN 14080:2013-09, Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen; Deutsche Fassung EN14080:2013.
- [3] POLLMEIER FURNIERWERKSTOFFE GMBH; Furnierschichtholz aus Buche zur Ausbildung stabförmiger und flächiger Tragwerke "Platte BauBuche S" und "Platte BauBuche Q": Allgemeine Bauartgenehmigung. Z-9.1-838
- [4] AZZI, V.D., TSAI, S.W.; Anisotropic strength of composites; Experimental Mechanics 5(9); S. 283-288; 1965

Finanzierung

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages