

# Optimierung und Simulation von Stablamellen

Weese, Alexander

Lehrstuhl Holzbau und Baukonstruktion, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine,  
Karlsruher Institut für Technologie

---

Vortragender:

## Weese, Alexander

M.Sc.

Lehrstuhl Holzbau und Baukonstruktion  
Versuchsanstalt für Stahl Holz und Steine  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
alexander.weese@kit.edu



- 2016-2020 B.Sc.-Studium Bauingenieurwesen, KIT
- 2020-2023 M.Sc.-Studium Funktionaler und Konstruktiver Ingenieurbau, KIT
- Seit 2023 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Holzbau und Baukonstruktion des KIT

---

## Zusammenfassung

Im Forschungsprojekt „Speziallamellen – Ressourceneffizienz durch Homogenisierung und Laminierung“ wird die Machbarkeit von Stablamellen aus Ausschussholz untersucht. Dafür wurden Methoden zur Manipulation der Verteilung von Schwachstellen im Produkt untersucht. Der Beitrag beschreibt ein auf maschinellen Sortierdaten beruhendes Optimierungsverfahren für Stablamellen und die Grundlagen für deren FE-numerische Simulation.

## 1. Einleitung

Die Fichtenbestände deutscher Wälder sind rückläufig. Dennoch steigt die Nachfrage nach dem Baustoff Holz stetig an. Flache Kaskadennutzung von Fichtenholz, insbesondere die technische Verwertung von als Ausschuss klassifiziertem Holz kann einen Beitrag zur Ressourcenschonung leisten. Um dieses Material technisch zu verwerten, kann man sich die Wirkungsweisen der Laminierung in Schichtholzprodukten zunutze machen. Durch die Verarbeitung zu Stablamellen können diese Effekte nicht nur im Brettschichtholz (BSH) in Höhenrichtung, sondern auch inhärent in der Lamelle hervorgerufen werden.

Die Mechanismen der Lastumlagerungen in Stablamellen wurden bereits von Colling [1] eindrücklich dargestellt. Hierbei ist es aus zuverlässigkeitsanalytischer Sicht zweckmäßig, sich den Fällen zuzuwenden, die Minimalwerte der Festigkeiten hervorrufen. Um zuverlässige Verpartnerungen von Schwachstellen mit höherfesten Bereichen zu erzielen, wurde die Minimierung von Schwachstellenkonzentrationen in Stablamellen (= Optimierung) untersucht. Im Folgenden werden eine Systematik zur Bewertung von Schwachstellenkonzentrationen, Methoden zu deren Minimierung und die Basis für FE-numerische Simulationen von Stablamellen vorgestellt.

## 2. Herausforderungen und Chancen im Umgang mit Ausschussholz

In den Sortierwerken der Holzproduzenten fallen etwa 10 % der Brettware als Ausschuss an. Darunter fallen beispielsweise aufgrund zu geringer prognostizierter Festigkeiten ausgeschlossene Bretter („Festigkeitsausschuss“) sowie ebenfalls technisch einwandfreie,

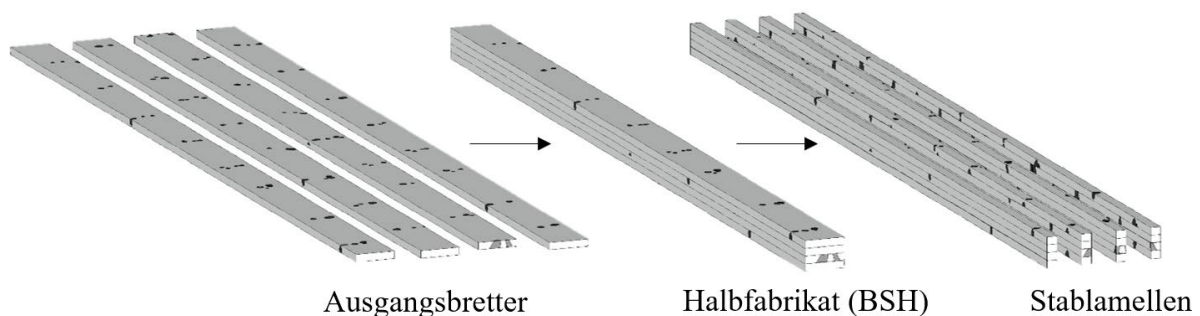
aufgrund geometrischer oder optischer Beeinträchtigungen ausgeschlossene Bretter (z.B. „Untermaßigkeitsausschuss“).

Im Forschungsvorhaben wurden 259 Ausschussbretter (nominell  $40 \times 180 \times 4000 \text{ mm}^3$ ) aus drei unterschiedlichen Einschlaggebieten analysiert. In der Auseinandersetzung mit dem Material wurde deutlich, dass Ausschussholz sehr niedrige, aber auch sehr hohe mechanische Eigenschaften aufweist. Der dynamische E-Modul der Bretter ( $E_{\text{dyn,B}}$ ) betrug im Mittel 10547 MPa mit einem Variationskoeffizienten von 26 % und einer Spannweite von 4789 MPa bis 18645 MPa. Wie Colling [1] und Egner et al. [2] erläutern, ist die Heterogenität des Ausgangsmaterial eine Grundvoraussetzung für dessen Aufwertung durch Homogenisierung und Laminierung. Die Verarbeitung von Ausschussholz zu Stablamellen mit ihrem inhärenten Laminierungseffekt ist daher vielversprechend.

### 3. Optimierung von Stablamellen

#### 3.1 Stablamellen

Stablamellen sind in der Regel aus drei bis sechs Stäben bestehende Schichtholzprodukte, welche wiederum als Lamellen in Brettschichtholz oder Brettsperrholz weiterverarbeitet werden können. Hergestellt werden Stablamellen in direkten Prozessen durch das Verkleben einzelner Stäbe oder in indirekten Prozessen über die Herstellung von BSH - Halbfabrikaten, welche anschließend mit Blockbandsägen aufgetrennt werden. Der indirekte Prozess ist in Abb. 1 dargestellt.



**Abb. 1:** Indirekte Herstellung von Stablamellen über das Halbfabrikat.

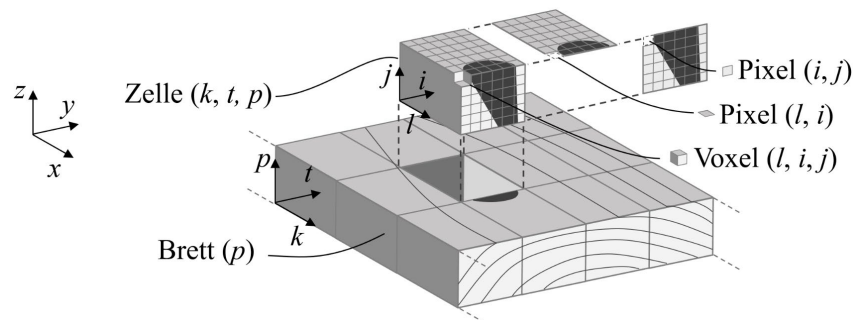
In den 1970er Jahren wurden in Schweden Stablamellen aus Fichte sondierend untersucht [1]. Neuere Entwicklungen beinhalten die Untersuchung von Stablamellen aus T22/26 (Fichte) von Egner et al. [2], aus Laubholz (z. B. aus Birke von Obernosterer et al. [3] oder aus Buche von Lux et al. [4]) oder aus rückgebautem BSH von Weidenhiller und Foller [5].

Durch die weitere Aufteilung der Ausgangsbretter in der Stablamelle wird eine zusätzliche Dimension für potentielle Laminierungseffekte erschlossen. Beim Einsatz im BSH werden somit zweidimensionale Laminierungseffekte hervorgerufen. Zur Sicherung dieser Effekte, insbesondere für zuverlässigkeitsrelevante Lamellen mit Minimalfestigkeiten, wurde das Minimieren der Intensität von Schwachstellenkonzentrationen in Stablamellen untersucht.

#### 3.2 Diskretisierung maschineller Scandaten

Im BSH sind festigkeitsbestimmende Merkmale herstellungsbedingt pseudozufällig verteilt. Detaillierte maschinelle Scandaten bilden die Basis für ein gezieltes Eingreifen. Handelsübliche maschinelle Sortieranlagen liefern flächig aufgenommene Daten mit einer Auflösung von 0,3-1 Pixel/mm<sup>2</sup>. Diese Informationsdichte wird in der Regel nicht vollständig erschöpft, sondern in diskretisierten 150-mm-Abschnitten (oder: Zellen) zur Festigkeitssortierung der Bretter

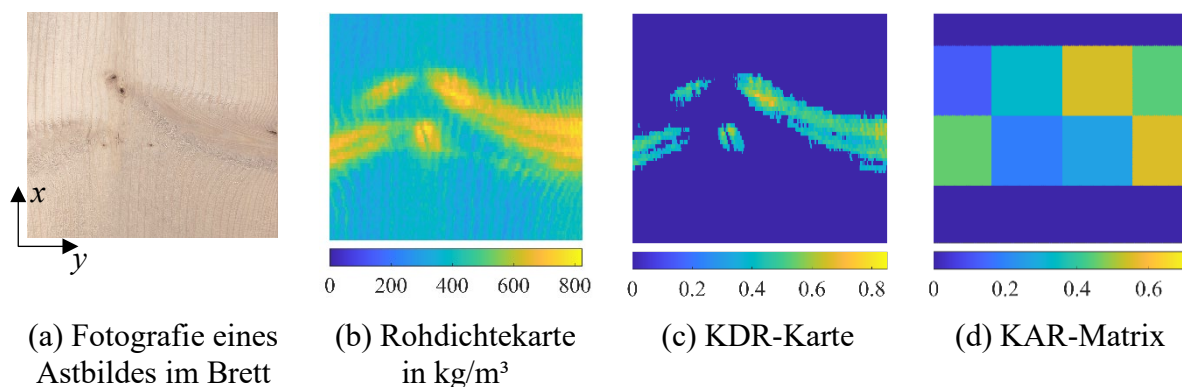
verwendet. Eine feinere Diskretisierung der Daten wird hier benötigt, da für Stablamellen eine integrale Betrachtung struktureller Eigenschaften über die Brettbreite nicht mehr zutreffend ist. In dieser Studie wurden Bretter in  $50 \times 40 \text{ mm}^2$  Zellen unterteilt und die flächig aufgenommenen Scandaten für diese Zellengröße diskretisiert. Zur Verfügung standen dafür Rohdaten eines Multisensors der Firma MiCROTEC S.p.A. (Goldeneye 706).



**Abb. 2:** Diskretisierte Indizierung flächig aufgenommener Scandaten.

Per Laserscanverfahren wurden Oberflächenfaserwinkel der Deck- und Seitenflächen aufgenommen. Die Oberflächenfaserwinkel wurden in der ursprünglichen Auflösung zwischen den Oberflächen linear interpoliert und an jedem diskreten Punkt (Voxel  $(l, i, j)$ ) trigonometrisch räumliche Faserwinkel ( $\text{SOG}_{(l,i,j)}$ ) errechnet ( $\text{SOG} = \text{Slope of Grain}$ ). Das Verfahren ist angelehnt an Rais et al. [6]. Um einen repräsentativen Zellenfaserwinkel  $\text{SOG}_{\text{rep}}$  abzuleiten, wurde zunächst für jeden Pixel  $(i, j)$  dessen Maximum entlang der Zellenlänge  $l$  gesucht. Jedem Pixel wurde anschließend der Verhältnisswert  $E_{\text{SOG}(i,j)} / E_0$  zugeordnet. Der Mittelwert aller Verhältnisswerte im projizierten Zellenquerschnitt  $(i, j)$  sei äquivalent zum Verhältnis  $E_{\text{SOG,rep}} / E_0$ .  $\text{SOG}_{\text{rep}}$  kann somit rückgerechnet werden.

Zur maschinellen Bestimmung der Ästigkeit eignen sich lokale Rohdichtekarten, da (insbesondere bei Nadelholz) Äste und die umliegende Holzmatrix („clearwood“) deutliche Rohdichteunterschiede aufweisen. Diese Daten werden durch vertikale Röntgendurchstrahlung der Bretter erfasst. Nach Oh et al. [7] kann damit das Verhältnis der Astdurchdringungstiefe ( $\text{KDR} = \text{Knot Depth Ratio}$ ) berechnet werden. Um hieraus eine KAR-ähnliche Ästigkeit (im Weiteren als KAR bezeichnet,  $\text{KAR} = \text{Knot Area Ratio}$ ) zu berechnen, wurden die maximalen KDR entlang der Zellenlänge  $l$  aufgefunden und über die Zellenbreite  $i$  gemittelt. Das Resultat entspricht einer vereinfachten Form der Projektion von Astflächen und folgt somit der Erfassungssystematik der KAR. Der Prozess vom realen Astbild zur KAR-Matrix ist beispielhaft für einen Astquirl in Abb. 3 dargestellt.



**Abb. 3:** Bestimmung der KAR mit maschinellen Rohdichtekarten.

### 3.3 Bewertungssystematik für Schwachstellenkonzentrationen

Um einen Zustand mit Schwachstellenkonzentrationen minimaler Intensität aufzufinden, wurde zunächst eine Bewertungssystematik für diese Konzentrationen entwickelt. Dafür wurden die Zellen-Parameter  $KAR_{k,t,p}$  und  $SOG_{k,t,p}$ , bezogen auf das 95-%-Quantil ihrer Verteilung, normalisiert und zu  $NP_{k,t,p}$  addiert ( $NP =$  „normalised Parameter“). Dieser Parameter wurde für jeden Stablamellenquerschnitt über die Anzahl miteinander verklebter Bretter  $n$  sowie in Längsachse von  $\Delta k = -2$  bis  $\Delta k = +2$  zu einem Penalty-Wert ( $PEN_{k,t}$ ) summiert. Mit zunehmendem Abstand der Nachbarzelle ( $k+\Delta k, t, p$ ) vom Querschnitt ( $k, t$ ) wird  $NP_{k+\Delta k,t,p}$  niedriger gewichtet. Die Berechnung der  $PEN$  ist in Gl. (1) und (2) dargestellt.

$$PEN_{k,t} = \sum_{p=1}^n \sum_{\Delta k=-2}^2 \beta_{|\Delta k|} \cdot NP_{k+\Delta k,t,p} \quad (1)$$

$$NP_{k,t,p} = \frac{KAR_{k,t,p}}{KAR_{0,95}} + \frac{SOG_{k,t,p}}{SOG_{0,95}} \quad (2)$$

$KAR_{0,95}$  ist das 95-%-Quantil der Verteilungsfunktion von  $KAR$ ,  $SOG_{0,95}$  ist das 95-%-Quantil der Verteilungsfunktion von  $SOG$  und  $\beta_{|\Delta k|}$  ist der Wichtungsfaktor der  $(k+\Delta k)$ -ten Spalte, mit  $\beta_{|\Delta k|=0} = 1$ ,  $\beta_{|\Delta k|=1} = 0,5$  und  $\beta_{|\Delta k|=2} = 0,25$ . Für eine Definition von  $(k, t, p)$  siehe Abb. 2.

Als maßgebende  $PEN$  des untersuchten Produkts wurde hier der maximale  $PEN$  aller Stablamellen eines Halbfabrikats definiert, siehe Abb. 4 (b). Diese Annahme ist kongruent mit dem Ziel, insbesondere niedrige Werte der Festigkeitsverteilung anzuheben. Die Minimierung dieses maßgebenden  $PEN$ -Wertes stellt nachfolgend das Optimierungsziel dar.

Je nach zukünftiger Belastungsart, für die eine Optimierung erfolgt, kann ein weiterer Wichtungsfaktor proportional zur Dehnungsverteilung im Querschnitt eingeführt werden.

### 3.4 Methoden zur gezielten Verteilung von Schwachstellen

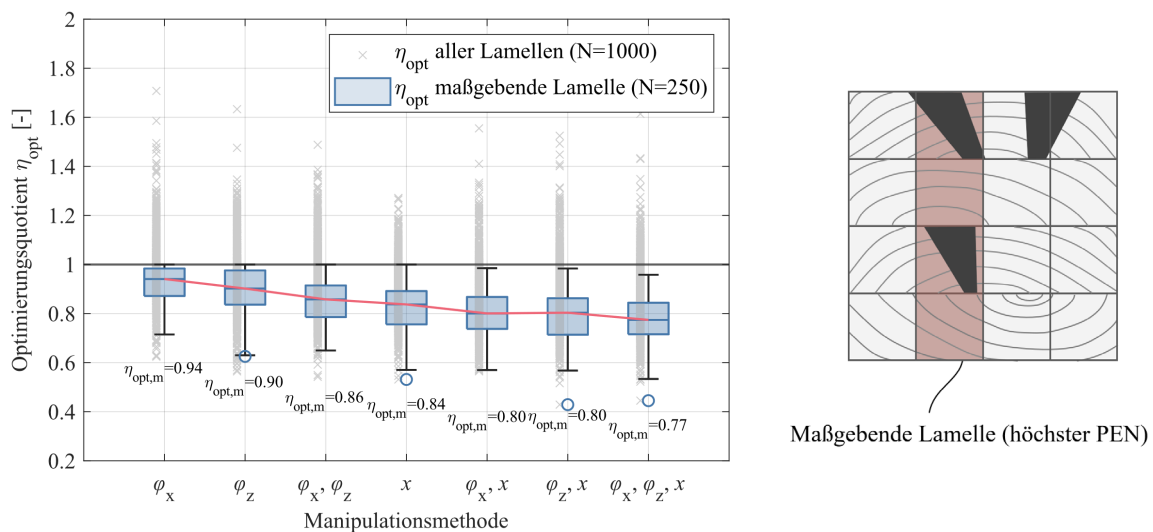
Um eine gezielte Verteilung von Schwachstellen zu erreichen sind verschiedene Methoden geometrisch-kombinatorisch möglich und herstellungstechnisch umsetzbar. Auf einer lokalen Skala werden hier zwei Methoden untersucht: Translation und Rotation der Ausgangsbretter relativ zueinander.

Die Methode der  $x$ -Translation umschreibt ein Relativverschieben der Ausgangsbretter in diskreten Schritten. Über die Relativverschiebung werden im optimierten Zustand Distanzen zwischen maßgebenden Schwachstellen generiert und somit wird das Gefüge homogenisiert. Die  $x$ -Translation wird hier auf ein Intervall  $[-150 \text{ mm}, 150 \text{ mm}]$  begrenzt und in 50-mm-Schritten untersucht. In einem Halbfabrikat, bestehend aus  $n = 4$  Brettern, sind somit 343 Gefügekombinationen möglich ( $7^{(n-1)}$ ). Im Herstellungsprozess der Leimholzindustrie könnte die aufgefundene Relativposition der Ausgangsbretter über gezielte Kappschnitte sichergestellt werden.

An rotatorischen Relativbewegungen sind drei Verdrehungen möglich ( $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ ). Die alleinige Relativrotation einzelner Bretter kann je Brett zwei Werte annehmen  $[0^\circ, 180^\circ]$ . Im beispielhaften Halbfabrikat sind somit je Rotationstyp 8 Gefügekombinationen möglich ( $2^{(n-1)}$ ). Verdrehungen sind aus Sicht der Leimholzindustrie zweckmäßige Optimierungsmethoden, da sie gut in bestehende Prozesse eingebunden werden können.

### 3.5 Geometrisch-kombinatorische Simulation der Optimierung von Stablamellen

Die aufgezeigten Methoden wurden einzeln sowie in beliebiger Kombination am Beispiel von Stablamellen simuliert. Die Ausgangsbretter wurden global zufällig aus dem Datensatz mit 259 Brettern ausgewählt. Daraus wurde ein virtuelles Halbfabrikat mit je vier Brettern erstellt, das virtuell in vier Stablamellen zerteilt wird. 250 Halbfabrikate und somit 1000 Stablamellen wurden auf diese Weise zufällig generiert und anschließend mit den verschiedenen Methoden optimiert. Zur Veranschaulichung der aufgefundenen optimierten Zustände wird ein Optimierungsquotient  $\eta_{\text{opt}}$  eingeführt. Als Verhältniswert des maßgebenden PEN im optimierten Zustand zum maßgebenden PEN des Ausgangszustands lässt der Quotient Rückschlüsse über die Effektivität der einzelnen Methoden zur Schwachstellenverteilung zu.



(a) Simulierte Optimierungsquotienten unterschiedlicher Manipulationsmethoden

(b) Veranschaulichung der „maßgebenden Lamelle“

**Abb. 4:** Ergebnisse der geometrischen Simulation optimierter Stablamellen.

Abb. 4 (a) zeigt  $\eta_{\text{opt}}$  aller simulierten Stablamellen sowie  $\eta_{\text{opt}}$  der maßgebenden Stablamelle jedes Halbfabrikats. Die einzelnen Methoden führten im Mittel zu um 6 bis 16 % verringerten maßgebenden PEN. Kombinationen der Methoden führen mit steigender Komplexität zu weiter fallenden Optimierungsquotienten, bis hin zum minimalen Mittelwert von 0,77. Auffällig ist außerdem, dass speziell bei Relativrotationen Lamellen im Gefüge entstehen, deren PEN sich durch die Änderung deutlich erhöhen. Die endgültigen maximalen PEN des Halbfabrikats sind jedoch im Optimierungsprozess auf den Maximalwert im Ausgangszustand begrenzt. Ob die gewählten Annahmen und Methoden eine Erhöhung der Minimalwerte der Festigkeitsverteilung tatsächlich zulassen, soll zukünftig mit FE-numerischen Simulationen untersucht und validierenden Versuchen überprüft werden.

## 4. Grundlagen für probabilistische FE-Simulationen von Stablamellen

Das hier angestrebte Simulationsmodell beruht auf den Prinzipien des Karlsruher Rechenmodells (KAREMO), das in den 1980er Jahren entwickelt und seither vielfach validiert und weiterentwickelt wurde. Im Simulationsablauf des KAREMO werden virtuelle Bretter anhand bekannter Gesetzmäßigkeiten struktureller Eigenschaften erzeugt. Diesen Brettern werden durch Regressionsmodelle unter Verwendung streuender Fehlerterme mechanische

Eigenschaften zugewiesen. 1980 publizierten Heimeshoff und Glos die Grundlage des Regressionsmodells für Bretter aus Fichtenholz [8].

Der hier verfolgte Ansatz unterscheidet sich vor allem in zwei grundlegenden Aspekten:

- Mechanische Eigenschaften mussten für Stäbe abgebildet werden. Bestehende, für Bretter aufgefundene Modelle verlieren hierfür an Gültigkeit.
- Statt freier Erzeugung virtueller Bretter und deren struktureller Eigenschaften liegen hier reale, diskretisierte maschinelle Scandaten als strukturelle Datenbasis vor.

Es mussten demnach neue Regressionsbeziehungen für elementare Stäbe aufgefunden werden, basierend auf rein zerstörungsfrei, maschinell am Ausgangsbrett ermittelbaren Parametern.

#### 4.1 Empirisches Repräsentieren mechanischer Eigenschaften von Elementarzellen

Zur Schaffung einer experimentellen Datenbasis für die mechanischen Eigenschaften von Stäben unter Zugbeanspruchung wurden 204 Zugversuche durchgeführt. Für die Adäquanz der Regressionsbeziehungen für den späteren Anwendungsfall ist es essentiell, den Belastungszustand im Versuch bestmöglich nachzuahmen. Der Belastungszustand eines im Verbund eingebetteten Elementes zeichnet sich durch einen ebenen Dehnungszustand aus.

Zuggeprüft wurden Stäbe (40 x 40 x 750 mm<sup>3</sup>), deren Schwachstelle gezielt in Prüfmittle lag (= repräsentierte „Elementarzelle“). Die Prüfkörper wurden durch beidseitige Keilspannzeuge mit einer Spannlänge von 200 mm gehalten. Durch biegesteife Aufnahmen wurde der ebene Dehnungszustand im Prüfkörper bestmöglich sichergestellt. Lokale Verformungen der Prüfkörper wurden mittels digitaler Bildkorrelation (LIMESS, Istra Q400) an je acht Punkten an zwei Prüfkörperseiten gemessen. Dadurch konnten Elastizitätsmoduln für eine Messlänge von 50 mm sowie von 150 mm ausgewertet werden. Aus 178 gültigen Versuchsergebnissen wurden schließlich in Verbindung mit den ermittelten strukturellen Eigenschaften und dem dynamischen E-Modul der Ausgangsbretter folgende Regressionsmodelle für die Zugfestigkeit  $f_t$  und den Zug-E-Modul  $E_t$  (150 mm) ermittelt:

$$E_t = 2.16 \cdot 10^3 + E_{\text{dyn,B}} \cdot (0.948 - 0.534 \cdot \text{KAR} - 0.163 \cdot \ln(\eta_{\text{SOG}})) + \varepsilon \quad (3)$$

$$N=178 \qquad R^2 = 0,76 \qquad \varepsilon \in N(0; 1745^2)$$

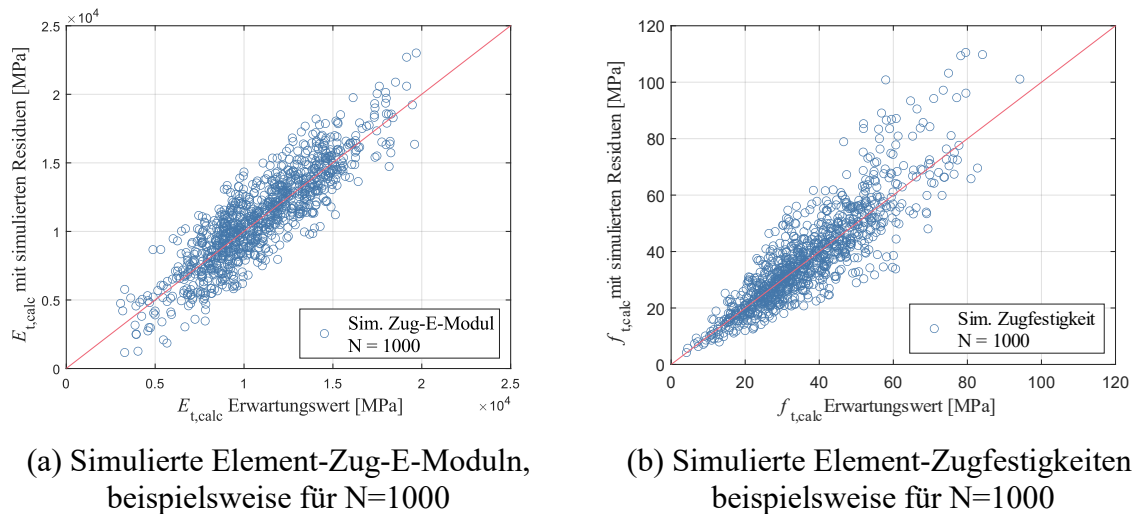
$$\ln(f_t) = -4.39 + \ln(E_t) \cdot (0.768 - 0.0132 \cdot \ln(\eta_{\text{SOG}}) + 2,44 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_{\text{cw}}) + \varepsilon \quad (4)$$

$$N=178 \qquad R^2 = 0,84 \qquad \varepsilon \in N(0; 0,235^2)$$

mit  $\eta_{\text{SOG}}$  Faserwinkel-Parameter [-]  
 $\eta_{\text{SOG}} = 35 \cdot \sin^2(\text{SOG}) + 1$

$\rho_{\text{cw}}$  Rohdichte der fehlerfreien Holzmatrix („clearwood“) [kg/m<sup>3</sup>]

Zusätzlich müssen die Fehler der Regressionsmodelle berücksichtigt werden. Hierbei ist die scheinbare Autokorrelation der Fehlerterme eines Brettes relevant. Abgebildet wird das durch das Aufteilen der Fehlerterme in normalverteilt streuende brettbezogene Mittelwerte und um diesen Mittelwert normalverteilte Reststreuungen. Eine weitere, brettbezogene zweidimensionale Aufteilung der Reststreuung wird zukünftig untersucht.



**Abb. 5:** Simulierte Eingangsdaten.

Wie in Abb. 5 gezeigt, ergeben sich für die nach der diskutierten Systematik simulierten Eingangsdaten typische Streudiagramme für den Zug-E-Modul und die Zugfestigkeit. Weitere Untersuchungen hinsichtlich der Fehlerterme sind geplant. Durch die Verwendung von Normalverteilungen werden teilweise mechanisch unmögliche Zufallswerte erzeugt, so sind etwa in diesem statistischen Modell E-Moduln  $< 0$  möglich. Dieser Umstand kann unter Bewahrung der Streuung z. B. durch die Wahl anderer Verteilungsfunktionen für die Fehlerterme verändert werden. Hier wurden die normalverteilten Fehlerterme in erster Näherung trunziert, was jedoch zu verringerten Streuungen führt.

#### 4.2 Entwicklung des Simulationsablaufs

Die in 3.5 diskutierte Auswahl der Ausgangsbretter soll nun in FE-Simulationen übernommen werden. Die strukturellen Eigenschaften wurden anhand des in 4.1 diskutierten Ablaufes in realistische mechanische Eigenschaften überführt.

Die Stablamellen ( $72 \times 4$  Elemente =  $3600 \times 160 \text{ mm}^2$ ) werden beidseitig über je 150 mm lange starre Bereiche an Punktlagern gelenkig gehalten. Einseitig wird als Belastung eine Horizontalverschiebung (Streckung) eingepreßt. Das System ist in Abb. 6 dargestellt.



**Abb. 6:** FE-Modell einer Stablamelle nach Anfangsstreckung um 0,1 mm, die Falschfarbenskala zeigt lokale Längsspannungen.

Nach dem Erstellen der Modellgeometrie werden den Elementen (CPS4R) die orthotropen, elastischen Elementsteifigkeitsmatrizen zugeordnet. Über eine eingepreßte Anfangsstreckung von 0,1 mm wird die Systemantwort abgetastet. Anhand der entstandenen Längsspannungen und folglich Ausnutzungsgrade der Zugfestigkeiten wird das maßgebende Element identifiziert

und die Verschiebung des nächsten Belastungsschritts so skaliert, dass dieses Element seine Zugfestigkeit erreicht. Nach diesem Belastungsschritt werden die Einträge der Elementsteifigkeitsmatrix des versagten Elements nahe Null gesetzt und der Vorgang wird wiederholt. Verschiedene Kriterien für das globale Versagen können definiert werden, siehe [1]. In erster ingenieurmäßiger Näherung wird als zweckmäßig erachtet, die Struktur nicht weiter als bis zum Versagen des dritten Elements zu berechnen.

Eine extensive Studie des FE-Modells, für das hier die Grundlage gelegt wurde, steht noch aus.

## 5. Fazit und Ausblick

Es wurde ein Verfahren zur Lageoptimierung von Stablamellen entwickelt. In geometrisch-kombinatorischen Simulationen wurden maßgebende Schwachstellen wirksam verteilt. Anhand von Zugversuchen an Stäben und Regressionsanalysen wurde die Möglichkeit des empirischen Repräsentierens mechanischer Eigenschaften von Elementarzellen und damit die Basis für FE-numerische Simulationen von Stablamellen geschaffen.

Ein FE-Modell zur Simulation optimierter Stablamellen wurde erstellt und sondierend berechnet. Großformatige probabilistische Simulationsreihen hierzu stehen noch aus.

Zudem wird die Wirksamkeit der Laminierung in Stablamellen anhand von Zug- und Biegeversuchen an BSH mit Stablamellen untersucht. Diese zweidimensionale Laminierung wird ebenfalls Gegenstand von FE-Simulationen sein.

## Literatur

- [1] COLLING, F.: *Tragfähigkeit von Biegeträgern aus Brettschichtholz in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflußgrößen*. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Diss., 1990.
- [2] EGNER, S.; STRÜBEL, S.; FRESE, M.: *Fünfteilige Fichtenlamellen zur Erzielung eines zweidimensionalen Laminierungseffekts in Brettschichtholz*. In: Bautechnik, Sonderheft Holzbau, Nr. 98, S. 61-74, 2021.
- [3] OBERNOSTERER, D.; JEITLER, G.; SCHICKHOFER, G.: *Birch for Engineered Timber Products: Part II*. In: Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023), S. 615-620, Oslo, Norwegen, 2023.
- [4] LUX, S.; KONNERTH, J.; NEUMÜLLER, A.: *Mechanical properties of strip-like laminations made from hardwood*. In: European Journal of Wood and Wood Products, S. 83–90, 2025.
- [5] WEIDENHILLER, A.; FOLLER, A.: *Strip-Laminated Timber from Recovered Glulam Beams – Test results and challenges*. In: ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Wood Mechanics (CompWood 2025) – Book of Abstracts, S. 103, Wien, 2025.
- [6] RAIS, A.; BACHER, M.; KHALOIAN-SARNAGHI, A.; ZEILHOFER, M.; KOVRYGA, A.; FONTANINI, F.; HILMERS, T.; WESTERMAYR, M.; JACOBS, M.; PRETZSCH, H.; VAN DE KUILEN, J.-W.: *Local 3D fibre orientation for tensile strength prediction of European beech timber*. In: Construction and Building Materials, Nr. 279, 2021.
- [7] OH, J.-K.; KIM, K.-M.; LEE, J.-J.: *Development of Knot Quantification Method to Predict Bending Strength Using X-ray Scanner*. In: Mokchae Konghak, Nr. 36(5), S. 33-41, 2008.
- [8] HEIMESHOFF, B.; GLOS, P.: *Zugfestigkeit und Biege-E-Modul von Fichten-Brettlamellen*. In: Holz als Roh- und Werkstoff, Nr. 38, S. 51-59, 1980.