

Modellierung der Biegefestigkeit von hochkant auf Biegung beanspruchten Bauteilen aus Brettsperrholz

**FLAIG
MARCUS**
Dipl.-Ing. (FH)
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Karlsruher Institut für Technologie
Reinhard-Baumeister-Platz 1
76131 Karlsruhe
Marcus.Flaig@kit.edu



2000 – 2004 Studium des
Bauingenieurwesens an der
Fachhochschule Karlsruhe

2004 – 2009 Mitarbeiter im
Ingenieurbüro Blaß & Eberhart, KA

seit 2009 wissenschaftlicher Mitarbeiter
am Lehrstuhl für Holzbau und
Baukonstruktionen, Karlsruher Institut
für Technologie

Zusammenfassung

Die Verwendung von Brettsperrholz zur Herstellung trägerförmiger Bauteile erscheint vielversprechend im Hinblick auf die geringere Rissempfindlichkeit und die daraus resultierende größere Robustheit im Vergleich mit Bauteilen aus Brettschichtholz. Der in Längsrichtung tragende Querschnitt wird jedoch bei Bauteilen aus Brettsperrholz um den Anteil der Querlagen reduziert. Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit solcher Bauteile erscheint es daher erforderlich, diesen Verlust durch eine Optimierung der Querschnitte und die Ausnutzung von Vergütungseffekten soweit wie möglich auszugleichen.

Zur quantitativen Erfassung der Vergütungseffekte wurde ein Rechenmodell für die numerische Simulation der Biegefestigkeit von Brettsperrholz unter Berücksichtigung streuender Materialeigenschaften entwickelt. Anhand der Simulationsergebnisse können Systembeiwerte für die charakteristischen Festigkeitskennwerte von Brettsperrholzquerschnitten in Abhängigkeit der Anzahl der Längslagen ermittelt werden. In einer ersten Reihe von Simulationsrechnungen wurden Systembeiwerte für Querschnitte mit rein auf Biegung beanspruchten Lamellen ermittelt. Zur Überprüfung der Simulationsergebnisse wurden Biegeversuche durchgeführt.

1. Einleitung

Brettsperrholz hat sich in den vergangenen Jahren als Werkstoff für die Herstellung tragender Bauteile im Holzbau zunehmend etabliert. Die kontinuierlich wachsende Zahl der Produktionsstätten und der erteilten Zulassungen belegen deutlich die Akzeptanz und Attraktivität des Werkstoffes. Der Anwendungsbereich ist bislang jedoch weitgehend auf flächige Bauteile, wie beispielsweise Wand- Decken- oder Dachscheiben begrenzt. Schlanke, in Plattenebene beanspruchte Biegebalken aus Brettsperrholz werden hingegen nur wenig eingesetzt, meist als untergeordnete Bauteile mit geringer Stützweite. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens werden derzeit am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktionen die Anwendungsmöglichkeiten von stabförmigen Bauteilen aus Brettsperrholz untersucht. Vielversprechend erscheint der Einsatz des gesperrten Werkstoffes insbesondere für die Herstellung von Bauteilen mit hohen Querzug- und/ oder Schubbeanspruchungen, wie sie in Trägern mit Ausklinkungen, Durchbrüchen und Queranschlüssen oder in Pult- und Satteldachträgern an den Rändern schräg zur Faserrichtung auftreten.

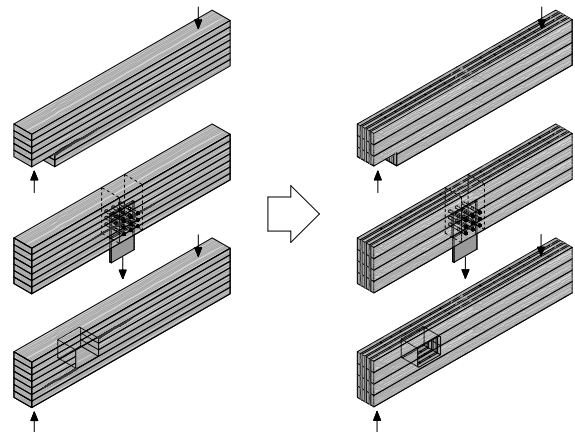


Abb. 1: mögliche Anwendungen für stabförmige Bauteile aus Brettsperrholz

Die Vorteile gegenüber Brettschichtholz liegen auf der Hand: Aufgrund der hohen Querkzug- und Schubfestigkeiten sind Bauteile aus Brettsperrholz weniger rissempfindlich und weisen eine hohe Robustheit gegenüber klimatischen Beanspruchungen auf. Die Querlagen, auf die diese günstigen Eigenschaften zurückzuführen sind, mindern jedoch die Tragfähigkeit und Steifigkeit in Trägerlängsrichtung, sodass im Vergleich mit Brettschichtholz größere Bauteilquerschnitte erforderlich werden. Aus wirtschaftlichen Gründen erscheint es daher erforderlich, den Lagenaufbau für den Anwendungsfall ‚stabförmiges Bauteil‘ zu optimieren und darüber hinaus Vergütungseffekte auszunutzen, die sich aus dem Zusammenwirken mehrerer parallel wirkender Längslagen ergeben. Eine ausschließlich auf der Grundlage experimenteller Untersuchungen basierende Ermittlung der Systembeiwerte erscheint indes, wegen der sehr großen Anzahl der erforderlichen Versuche, schwer umsetzbar. Erfolgversprechender erscheint die Möglichkeit, die Systembeiwerte durch die Verwendung geeigneter Rechenmodelle zu ermitteln und die Ergebnisse der Modelle anhand weniger Versuche zu validieren.

2. Systemeffekte in Brettsperrholz - Kenntnisstand

Für Flächen aus Vollholzlamellen sind in DIN 1052 [1] und EC5 [2] Systembeiwerte zur Erhöhung der Biege- und der Schubfestigkeit in Abhängigkeit der Anzahl der mitwirkenden Lamellen und der Verbindung zwischen den einzelnen Lamellen angegeben. Der Höchstwert für nachgiebig miteinander verbundene Lamellen beträgt $k_t = 1,1$ (Gl. 1a). Bei verklebten Lamellen darf ein Systembeiwert bis zu 1,2 angesetzt werden (Gl. 1b). In beiden Normen wird ein linearer Zusammenhang zwischen der Anzahl der Lamellen und dem Systembeiwert k_t unterstellt.

$$k_t = \min \begin{cases} 1 + 0,1 \cdot \frac{n-1}{7} \\ 1,1 \end{cases} \quad (\text{Gl. 1a})$$

$$k_t = \min \begin{cases} 1 + 0,2 \cdot \frac{n-1}{7} \\ 1,2 \end{cases} \quad (\text{Gl. 1b})$$

Ähnliche Angaben sind in vielen der für Brettsperrholzprodukte erteilten nationalen und europäischen Zulassungen enthalten. Da bei Querschnitten aus Brettsperrholz die Lamellen der Längslagen in der Regel nur über die Kreuzungsflächen mit den benachbarten Querlagen miteinander verbunden sind, ist der Systembeiwert, aufgrund der Nachgiebigkeit dieser Verbindungen, in den meisten Zulassungen auf einen Größtwert von 1,1 bei vier mitwirkenden Lamellen begrenzt (Gl. 2a). Dabei ist in den meisten Zulassungen der Ansatz eines Systembeiwertes nur für die Biegefestigkeit bei Beanspruchungen rechtwinklig zur Plattenebene vorgesehen. In einigen neueren Zulassungen sind Systembeiwerte auch für die Biegefestigkeit bei Beanspruchung in Plattenebene angegeben, z.B. [3], [4]. Für die beiden Beanspruchungsrichtungen rechtwinklig zur Plattenebene und in Plattenebene ist ein Größtwert von $k_t = 1,2$ bei jeweils acht mitwirkenden Lamellen gegeben (Gl. 2b).

$$k_t = \min \begin{cases} 1 + 0,025 \cdot n \\ 1,1 \end{cases} \quad (\text{Gl. 2a})$$

$$k_t = \min \begin{cases} 1 + 0,025 \cdot n \\ 1,2 \end{cases} \quad (\text{Gl. 2b})$$

Jeitler und Brandner [5] geben auf der Grundlage experimenteller und theoretischer Untersuchungen Systembeiwerte für Querschnitte aus mehreren miteinander verklebten Schnitthölzern in Abhängigkeit der Lamellenanzahl und des Variationskoeffizienten der betrachteten Festigkeitskenngröße wie folgt an:

$$k_t = 1 + 2,7 \cdot \text{VarK}(f)^{1,95} \cdot \ln(n) \quad (\text{Gl. 3})$$

für $\text{VarK} \leq 0,25$ und $1 \leq n \leq \infty$

Die von Jeitler und Brandner ermittelte logarithmische Funktion für den Systembeiwert führt im Vergleich mit den in den Normen und Zulassungen angegebenen abschnittsweise linearen Funktionen zu größeren Systembeiwerten. Dies trifft insbesondere für kleine Werte von n zwischen zwei und sechs zu, die im Hinblick auf die praktische Anwendung von stabförmigen Bauteilen aus Brettspertholz von besonderer Bedeutung sind.

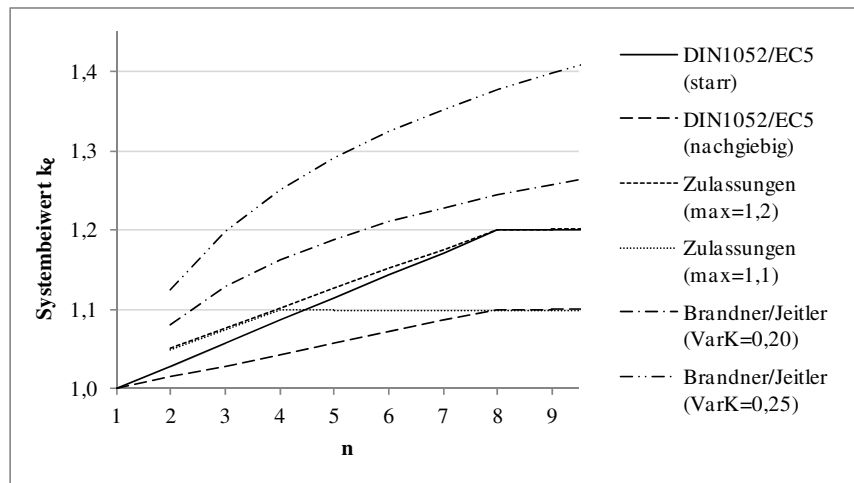


Abb.2: Systembeiwerte nach DIN1052/EC5, nationalen und europäischen Zulassungen für Brettspertholzprodukte und nach Brandner/Jeitler

3. Rechenmodell

Bereits in den 1990-er Jahren wurde am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktionen des KIT ein Rechenmodell für die Simulation der Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern mit Lamellen aus Nadelholz entwickelt [6]. 2005 bereitete Frese das Modell für die Simulation von Brettschichtholz aus Buche neu auf [7]. Aufbauend auf diesen Arbeiten konnte ein Rechenmodell für die Simulation der Biegefestigkeit von rechtwinklig zur Plattenebene und in Plattenebene beanspruchtem Brettspertholz entwickelt werden.

Das weiterentwickelte Rechenmodell besteht wie die Vorgängerversionen aus zwei wesentlichen Teilen: einem Programm zur Simulation der mechanischen Eigenschaften von Brettlamellen und einem FE-Modell, in dem die geometrischen und strukturellen Eigenschaften der simulierten Träger abgebildet werden.

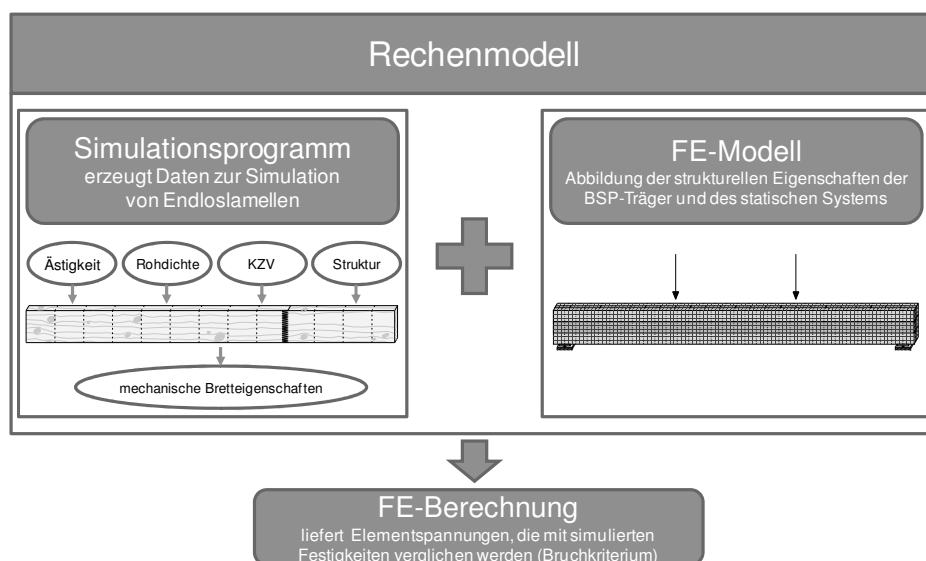


Abb. 3: Im Rechenmodell werden die streuenden Materialeigenschaften, die wachstumsbedingte Struktur der Bretter, der Aufbau und die Abmessungen der Träger abgebildet. Die FE-Berechnung am virtuellen Träger ersetzt den Biegeversuch nach EN 408.

Um die Streuungen der simulierten Materialkennwerte durch das Modell hinreichend genau abbilden zu können, werden die Brettlamellen in Längsrichtung in 150 mm lange Zellen unterteilt. Im Simulationsprogramm werden mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode für jede dieser Zellen mechanische Eigenschaften generiert und anschließend den entsprechenden Elementen im FE-Modell zugewiesen. Die Grundlage für die Simulation der mechanischen Eigenschaften von Brettabschnitten und Keilzinkenverbindungen bilden dabei experimentell ermittelte Häufigkeitsverteilungen verschiedener Holzeigenschaften, wie z.B. der Rohdichte und der Ästigkeit, sowie ebenfalls experimentell ermittelte Regressionsgleichungen, die den Zusammenhang zwischen diesen Eigenschaften und den zu generierenden Festigkeits- und Steifigkeitskennwerten beschreiben [8].

Aus dem Rechenmodell für die Simulation von Brettschichtholzträgern konnten Modelle für die Simulation der Elastizitätsmoduln bei Zug- und Druckbeanspruchung sowie die Zug- und Druckfestigkeit von Brettabschnitten und Keilzinkenverbindungen übernommen werden. Die verwendeten Regressionsgleichungen gehen auf Untersuchungen von Glos zurück und sind beispielsweise in [9] angegeben.

Im Gegensatz zu Brettschichtholzträgern mit Flachkant-Biegebeanspruchung der Lamellen sind bei in Plattenebene auf Biegung beanspruchten stabförmigen Bauteilen aus Brettsperrholz die Normalspannungen innerhalb der einzelnen Lamellen nicht mehr annähernd konstant, sondern, aufgrund des größeren Verhältnisses zwischen Lamellenbreite und Bauteilhöhe, in Richtung der Lamellenbreite linear veränderlich. Wegen der unterschiedlichen Festigkeiten des Holzes bei Beanspruchung durch Biege-, Zug- und Druckspannungen war es daher erforderlich, die Biegefestigkeit als zusätzliche Materialeigenschaft im Modell aufzunehmen.

Isaksson [10] hat umfangreiche Untersuchungen zur Ermittlung der Biegefestigkeit von hochkant auf Biegung beanspruchten Nadelschnitthölzern durchgeführt. In Abhängigkeit der Brettrohde und der Ästigkeit gibt er folgende Beziehung für die Biegefestigkeit an:

$$f_m = 34,3 + 76,5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{12} - 51 \cdot \text{KAR} \quad (\text{Gl. 4})$$

$$r = 0,50 \quad s_R = 11,8$$

Isaksson führte die Biegeversuche an kurzen Brettabschnitten durch, wobei jeweils mehrere Abschnitte pro Brett geprüft wurden. Die Streuung der ermittelten Biegefestigkeiten konnte daher, wie auch bei den im Modell verwendeten Regressionsmodellen für die Zug- und die Druckfestigkeit, in einen Anteil innerhalb eines Brettes und eine Reststreuung aufgeteilt werden. Durch diese Zerlegung der Residuen ist es möglich, die Autokorrelation der (Biege-) Festigkeiten innerhalb einzelner Bretter im Modell angemessen zu berücksichtigen.

Neben der Biegefestigkeit der Brettabschnitte musste im Modell auch die Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindungen abgebildet werden. Zur Ermittlung einer Regressionsgleichung für die Hochkantbiegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen wurden insgesamt 264 Biegeversuche durchgeführt. Mit Hilfe einer Regressionanalyse wurden anhand der Versuchsergebnisse Regressionsgleichungen für den Elastizitätsmodul und die Biegefestigkeit von hochkant auf Biegung beanspruchten Keilzinkenverbindungen ermittelt.

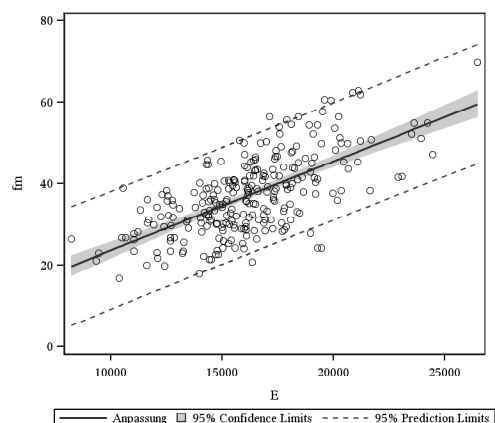


Abb. 4: experimentell ermittelte Biegefestigkeit $f_{m,KZV}$ von hochkant auf Biegung beanspruchten Keilzinkenverbindungen über dem Elastizitätsmodul E_{KZV}

$$\ln(E_{m,KZV}) = 8,602 + 2,410 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{0,max} \quad (\text{Gl. 5})$$

$$r = 0,655 \quad s_R = 0,128$$

$$f_{m,KZV} = 2,474 + 2,160 \cdot 10^{-3} \cdot E - 2,057 \cdot 10^{-3} \cdot (h-150) \quad (\text{Gl. 6})$$

$$r = 0,663 \quad s_R = 7,205$$

4. Ergebnisse der Simulationsrechnungen

Als Grundlage für die Simulation der mechanischen Bretteigenschaften steht an der Holzforschung München eine breite Datenbasis für Lamellen aus Fichtenholz zur Verfügung. In [9] sind zahlreiche Sortierverfahren aufgeführt, die mit Fokus auf die Zugfestigkeit der Lamellen in München entwickelt wurden. Neben verschiedenen maschinellen und kombinierten Sortierverfahren werden auch rein visuelle Sortierverfahren aufgeführt. Wegen der allgemeinen Verfügbarkeit der visuellen Sortierverfahren wurde für die hier durchgeführten Simulationsrechnungen das Sortierverfahren VIS1 verwendet. Dieses Verfahren entspricht der visuellen Sortierung für die Sortierklasse S10 nach DIN 4074 Teil 1. In Abb. 5 sind exemplarisch für jeweils 650 Bretter die simulierten strukturellen Bretteigenschaften (Ästigkeit, Brettroh-dichte und Brettlänge) in Form von Häufigkeitsverteilungen dargestellt. Als Referenzwert für die Ermittlung der Systembeiwerte k_t wurde zunächst die Biegefestigkeit einzelner, hochkant auf Biegung beanspruchter Lamellen ermittelt.

Um die Vergütung der Biegefestigkeit in Abhängigkeit der Anzahl parallel beanspruchter Brettlamellen ohne überlagernde Einflüsse aus Längeneffekten und der Verteilung der Normalspannungen über die Lamellenhöhe ermitteln zu können, wurden Biegeträger mit einheitlicher Stützweite und Querschnittshöhe mit jeweils nur einer Lamelle in Richtung der Querschnittshöhe simuliert.

Die ermittelten Häufigkeitsverteilungen der Biegefestigkeit für Querschnitte mit n Längslagen und $(n-1)$ Querlagen sind in Abb. 7 angegeben. Vergleichende Simulationsrechnungen für Querschnitte mit starr verbundenen Lamellen ohne Querlagen bestätigen die Regelungen in DIN 1052 und EC5, wonach sich für Parallelsysteme aus nachgiebig verbundenen Lamellen ungünstigere Systembeiwerte k_t ergeben als bei starrem Verbund (Abb. 8).

Um möglichst große Festigkeiten in Richtung der Längslagen zu erreichen, sollte daher bei der Festlegung des Lagenaufbaus von in Plattenebene beanspruchten Biegeträgern aus Brettsperrholz nicht nur der Anteil der Querlagen am Gesamtquerschnitt sondern auch die Anzahl der Querlagen so gering wie möglich gehalten werden. Diese Forderung steht im Widerspruch zu einer möglichst großen Anzahl von Kreuzungsflächen, die zur Erlangung hoher Schubfestigkeiten erforderlich ist. Als Grundlage für eine Optimierung des Lagenaufbaus sind daher weitere Simulationsrechnungen zur Untersuchung des Einflusses von Anzahl und Anordnung der Querlagen innerhalb eines Querschnittes erforderlich.

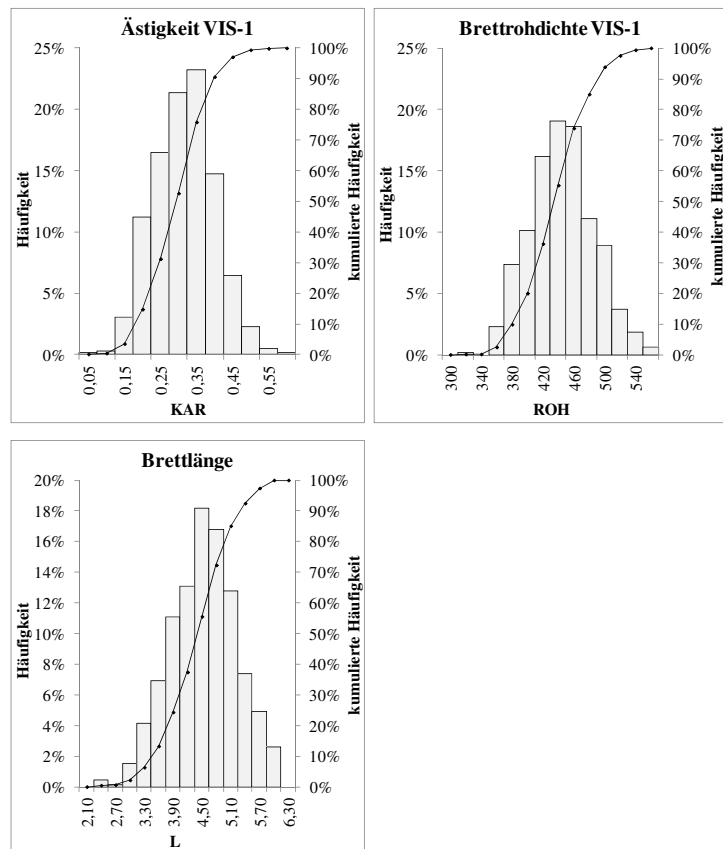


Abb.5: simulierte Häufigkeitsverteilungen struktureller Bretteigenschaften

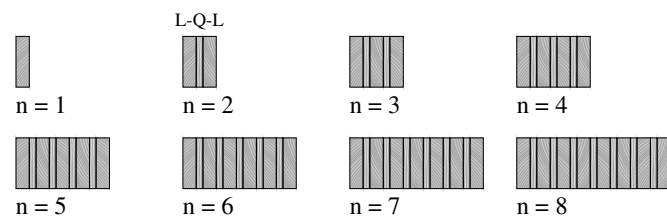


Abb. 6: simulierte Querschnitte mit Querlagen zur Ermittlung der Systembeiwerte k_t für die Biegefestigkeit

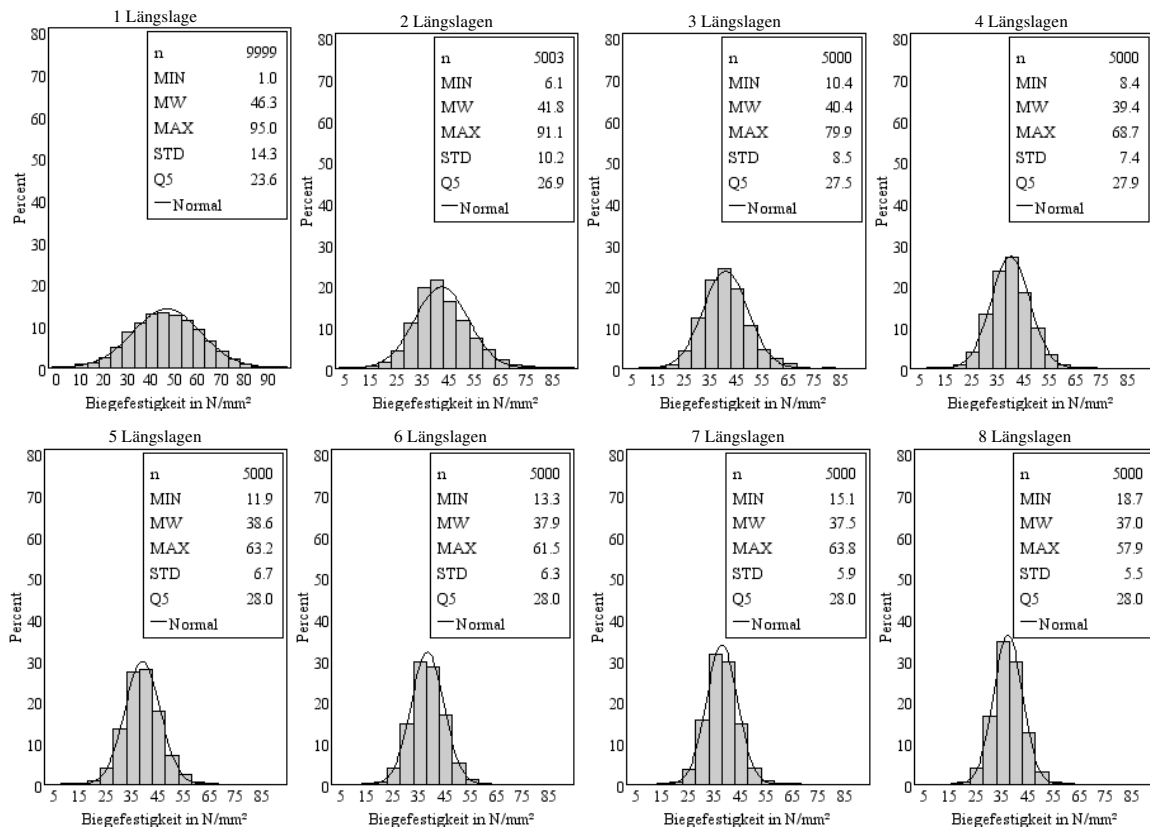


Abb. 7: Häufigkeitsverteilungen der simulierten Biegefestigkeiten für Querschnitte mit n Längslagen und $(n-1)$ Querlagen aus keilgezinkten Brettlamellen

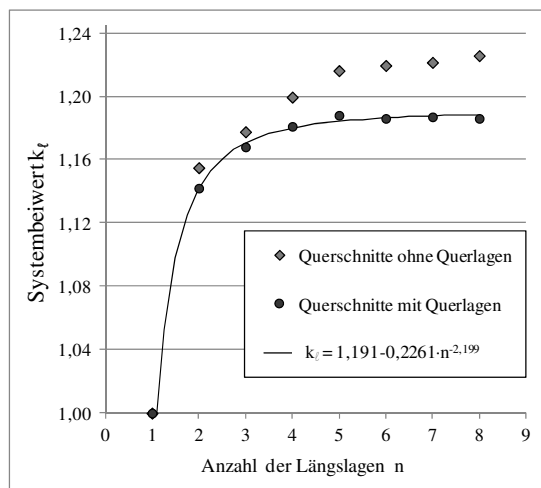


Abb. 8: Systembeiwert k_{ℓ} in Abhängigkeit der Anzahl der Längslagen für simulierte Biegefestigkeiten

Aus den Ergebnissen der Simulationsrechnungen für Querschnitte mit bis zu acht Längslagen sind die mit steigender Lamellenanzahl n abnehmenden Streuungen der Biegefestigkeit unmittelbar ablesbar.

Die Systembeiwerte k_{ℓ} können aus dem Verhältnis der 5%-Quantile der simulierten Biegefestigkeiten in Abhängigkeit der Anzahl der Längslagen im Querschnitt ermittelt werden.

$$k_{\ell} = f_{m,05}(n) / f_{m,05}(n=1) \quad (\text{Gl. 7})$$

Es zeigt sich, dass auch bei in Plattenebene beanspruchten Biegeträgern aus Brettsperrholz mit nachgiebigem Verbund der Lamellen die Systembeiwerte für kleine n sehr schnell ansteigen. Für Querschnitte mit zwei Längslagen ergibt sich bereits ein Systembeiwert von $k_{\ell} = 1,14$, der über dem in vielen Zulassungen angegebenen Größtwert von $k_{\ell} = 1,1$ für vier Lamellen liegt.

Für Querschnitte mit mehr als vier Längslagen ergibt sich ein konstanter Systembeiwert von 1,19.

Der in neueren europäisch technischen Zulassungen angegebene Maximalwert von $k_{\ell} = 1,2$ für acht Lamellen kann damit für die hier betrachteten Querschnitte mit reiner Biegebeanspruchung der Lamellen anhand der numerischen Untersuchungen mit guter Übereinstimmung bestätigt werden. Für Querschnitte mit weniger als acht Längslagen ergeben sich im Vergleich, auch mit neueren Zulassungen, günstigere Systembeiwerte.

Der Variationskoeffizient der Biegefestigkeit für die simulierten einzelnen Lamellen ($n = 1$) beträgt 0,308. Unter Verwendung der Gl. 3 ergeben sich damit deutlich größere Systembeiwerte als aus der numerischen Simulation. Die Abweichungen können jedoch nur teilweise auf die Unterschiede im Verbund der Lamellen zurückgeführt werden (vgl. Abb.8). Da der Wertebereich der streng monoton steigenden logarithmischen Funktion nicht begrenzt ist, werden insbesondere für große Werte von n die Systembeiwerte überschätzt.

Die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen deuten darauf hin, dass der Systembeiwert für Querschnitte aus Nadelholzlamellen unabhängig von der Art des Verbundes zwischen den Lamellen gegen einen Grenzwert strebt. Für die Ermittlung eines funktionalen Zusammenhanges erscheinen daher gebrochene rationale oder hyperbolische Funktionen geeignet. Anhand der Ergebnisse der numerischen Simulation wurde für den Systembeiwert von Querschnitten mit n Längslagen und $(n-1)$ Querlagen folgende Beziehung ermittelt werden (vgl. Abb. 8).

$$k_{\ell} = 1,191 - \frac{0,2261}{n^{2,199}} \quad (\text{Gl. 7})$$

5. Versuche zur Überprüfung des Rechenmodells

Zur Überprüfung der mit Hilfe des Rechenmodells ermittelten Systembeiwerte wurden 40 Vierpunkt-Biegeversuche nach EN 408 durchgeführt. Die Querschnitte der geprüften Träger entsprechen den simulierten Querschnitten mit zwei, drei, vier und sechs Längslagen. Biegeversuche mit einzelnen Brettlamellen zur Bestimmung eines Referenzwertes für die Ermittlung von Systembeiwerten auf der Grundlage der Versuchsergebnisse stehen noch aus.

Trotz des geringen Stichprobenumfangs von nur 10 Versuchen je Reihe ist die Abnahme der Streuung mit zunehmender Anzahl der Längslagen in der Tendenz erkennbar. Dies gilt auch für den Anstieg der 5%-Quantile der Biegefestigkeit, die für jede Versuchsreihe für eine an die Häufigkeitsverteilung der Versuchsergebnisse angepasste Normalverteilung ermittelt wurden.

Die statistische Auswertung der Versuchsreihe mit $n = 2$ Längslagen wird sehr stark vom kleinsten Messwert der Reihe beeinflusst, der mit $22,1 \text{ N/mm}^2$ deutlich geringer ist als der nächstkleinere Wert mit $33,9 \text{ N/mm}^2$. Wird der Kleinstwert als Ausreißer betrachtet und bei der statistischen Auswertung außer Acht gelassen, ergibt sich für die Versuchsreihe ein Mittelwert von $42,3 \text{ N/mm}^2$. Das 5%-Quantil steigt auf $29,5 \text{ N/mm}^2$.

Die außergewöhnlich geringe Standardabweichung der Reihe mit $n = 4$ Längslagen erscheint aufgrund der geringen Stichprobe und der im Vergleich größeren Standardabweichung der Reihe mit $n = 6$ Längslagen wenig repräsentativ.

Insgesamt zeigt sich damit eine gute qualitative Übereinstimmung zwischen den experimentell ermittelten Biegefestigkeiten und den Ergebnissen der numerischen Simulation.

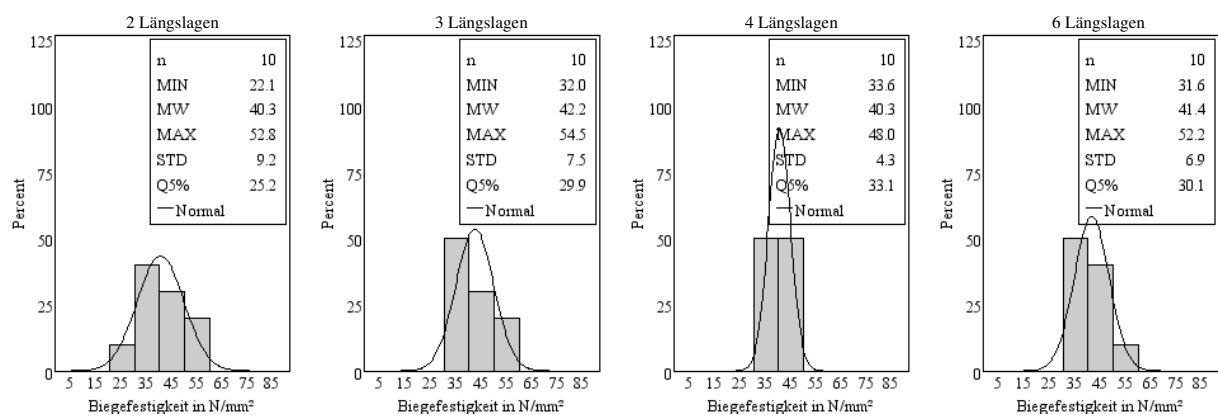


Abb. 9: Häufigkeitsverteilungen und angepasste Normalverteilungen der experimentell ermittelten Biegefestigkeiten für Querschnitte mit 2, 3, 4 und 6 Längslagen

6. Ausblick

Anhand der bisher durchgeführten numerischen Simulationen konnte gezeigt werden, dass aufgrund des nichtlinearen Zusammenhanges zwischen der Anzahl n der Längslagen und dem Systembeiwert k_t die Biegefestigkeit von in Plattenebene beanspruchten Brettsperrholzträgern für Querschnitte mit weniger als acht Längslagen bei Ansatz der in den Normen und Zulassungen angegebenen Systembeiwerte unterschätzt wird.

Für die praktische Anwendung sind Querschnitte mit Höhen bis zu 2,00 m denkbar. Bei größeren Querschnitten mit mehreren übereinander angeordneten Lamellen in den Längslagen, tritt, im Gegensatz zu den bislang betrachteten Querschnitten, in den einzelnen Lamellen, keine reine Biegebeanspruchung, sondern eine gleichzeitige Beanspruchung durch Biegemomente und Normalkräfte auf. Letztere werden beim Spannungsnachweis mit der im Vergleich zur Biegefestigkeit geringeren Zugfestigkeit der Lamellen nachgewiesen.

Im Rahmen weiterer numerischer Simulationen soll daher der Einfluss der Lamellenanzahl in Richtung der Bauteilhöhe auf die die Biegefestigkeit von in Plattenebene beanspruchten Brettsperrholzträgern ermittelt werden. Der in den bisherigen Betrachtungen unberücksichtigte Einfluss der Bauteillänge auf die Biegefestigkeit soll dabei ebenfalls untersucht werden.

7. Literatur

- [1] DIN 1052:2008-12 - Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau
- [2] DIN EN 1995-1-1:2008-09 - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004+A1:2008
- [3] Europäisch Technische Zulassung ETA-11/0189 vom 10. Juni 2011. Deutsches Institut für Bautechnik
- [4] Europäisch Technische Zulassung ETA-11/0210 vom 20. September 2011. Deutsches Institut für Bautechnik
- [5] Jeitler, G.; Brandner, R., (2008): Modellbildung für DUO-, TRIO- und QUATTRO-Querschnitte. In: Modellbildung für Produkte und Konstruktionen aus Holz – Bedeutung von Simulation und Experiment, Tagungsband zur 7. Grazer Holzbau Fachtagung, S. C-1 - C-9; Verlag der Technischen Universität Graz
- [6] Colling F., (1990): Tragfähigkeit von Biegeträgern aus Brettschichtholz in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflussgrößen. Universität Karlsruhe (TH), Dissertation
- [7] Blaß, H. J.; Frese, M.; Glos, P.; Linsenmann, P.; Denzler, J., (2005): Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe (TH), Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen
- [8] Görlacher, R., (1990): Klassifizierung von Brettschichtholzlamellen durch Messung von Longitudinalschwingungen. Universität Karlsruhe (TH), Dissertation
- [9] Blaß, H. J.; Frese, M.; Glos, P.; Denzler, J.; Linsenmann, P.; Ranta-Maunus, A., (2009): Zuverlässigkeit von Fichten-Brettschichtholz mit modifiziertem Aufbau. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe (TH), Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen
- [10] Isaksson T., (1999). Modelling the Variability of Bending Strength in Structural Timber. Lund University, Department of Structural Engineering, Report TVBK-1015