

Trag- und Verformungsverhalten genagelter Brettstapelelemente unter Querlast

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR- INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften

der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.- Ing. Volker Krämer

aus Tett nang

Tag der mündlichen Prüfung: 05.02.2003

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. H.J. Blaß

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. H. Kreuzinger

Karlsruhe 2003

Für Karin

Kurzfassung

Brettstapelelemente bestehen aus hochkant nebeneinander gestellten, fortlaufend miteinander vernagelten Massivholzbrettern (Lamellen). Die Lamellen können im Brettstapelelement gestoßen werden, da die Länge der Lamellen üblicherweise nicht mit der Länge der Brettstapelelemente übereinstimmt. Durch dieses Herstellungsprinzip können beliebig lange und beliebig breite, flächige Bauteile hergestellt werden, die diskontinuierliche Steifigkeitseigenschaften sowohl in Spannrichtung der Elemente als auch quer zur Spannrichtung aufweisen. Brettstapelelemente werden seit einigen Jahren vermehrt im Holzhausbau als Wand- oder Deckenelemente verwendet. Derzeit gibt es noch keine anerkannten technischen Regeln für die Bemessung von Brettstapelelementen. Ziel dieser Arbeit war es, Gleichungen zur Bestimmung der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit von Brettstapelelementen unter Plattenbeanspruchung zu bestimmen. Diese Gleichungen wurden über Simulationsergebnisse bestimmt. Bei den Simulationen der Brettstapelelemente wurden die Streuungen der Steifigkeitseigenschaften der Lamellen sowohl innerhalb der Lamellen als auch zwischen den Lamellen berücksichtigt. Die Streuungen der Werte der Parameter zur Beschreibung einer Last-Verschiebungs-Kurve einer zweischnittigen Holz-Holz-Nagelverbindung wurden in realistischen Bereichen sowohl innerhalb einer Last-Verschiebungs-Kurve als auch der Last-Verschiebungs-Kurven untereinander berücksichtigt. Die Simulationsergebnisse wurden durch Versuche bestätigt.

Zu Beginn der Forschungsarbeiten wurde untersucht, ob durch eine verstärkte Stoßnagelung die wirksame Biegesteifigkeit von Brettstapelelementen in Spannrichtung signifikant erhöht werden kann. Durch einen Berechnungsansatz und durch Versuche wurde gezeigt, dass mit einer verstärkten Stoßnagelung die wirksame Biegesteifigkeit in Spannrichtung nicht wesentlich erhöht werden kann. Andere Verstärkungsmaßnahmen der Lamellenstöße waren nicht praxisrelevant und wurden deswegen verworfen.

Die Simulationen wurden unter Berücksichtigung der streuenden Steifigkeitseigenschaften der Lamellen und des streuenden nichtlinearen Last-Verschiebungs-Verhaltens von genagelten Holz-Holz-Verbindungen durchgeführt.

Die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften der Lamellen wurden auf der Grundlage von Untersuchungen von Lamellen für Brettschichtholzträger simuliert. Hierzu wurden die Lamellen mit einer Länge von $\ell = 4,5$ m in 30 Segmente unterteilt und den

Segmenten wurden über Regressionsgleichungen autokorrelierte Materialeigenschaften zugewiesen.

Die Beträge der Parameter zur Beschreibung einer Last-Verschiebungs-Kurve einer genagelten Holz-Holz-Verbindung und deren statistische Verteilungen wurden durch Versuche ermittelt. Die Lamellen der Prüfkörper für die Versuche wurden mit unterschiedlichen Nagelgrößen kraftschlüssig verbunden. Weiterhin wurde nach der Beanspruchungsrichtung der Lamellen durch den Nagel (parallel oder rechtwinklig zur Faser) unterschieden. Die Nagelverbindungen, die parallel zur Faserrichtung beansprucht waren, zeigten signifikant höhere Anfangs-Steifigkeitseigenschaften als die rechtwinklig zur Faser beanspruchten Nagelverbindungen. Das streuende nichtlineare Last-Verschiebungs-Verhalten der Nagelverbindungen wurde in das Simulationsmodell aufgenommen.

Bei den Simulationen wurden die Geometrie der Brettstapelelemente (Breite/Höhe), die Nagelabstände, die Nageldurchmesser, die Stoßanordnungen (ungestoßene, wechselseitig, wandernd und zufällig gestoßene Lamellen) sowie die Belastung durch eine zentrische Einzellast und durch eine gleichförmige Flächenlast variiert.

Aus den Simulationsergebnissen wurden Näherungsgleichungen zur Berechnung der Biegerandspannungen der Lamellen, der elastischen Verformung der Brettstapelelemente und der Beanspruchung der Nägel auf Abscheren abgeleitet.

Um die Simulationen und die daraus abgeleiteten Gleichungen zu bestätigen, wurden 43 Prüfkörper entworfen und geprüft. Hierfür wurden von insgesamt 936 Lamellen die mittleren Elastizitätsmoduln, die mittleren Rohdichten sowie die maximalen Ästigkeiten bestimmt. Der Vergleich der gemessenen mittleren Materialeigenschaften mit simulierten mittleren Materialeigenschaften zeigte, dass die Simulation der Lamellen realitätsnahe Ergebnisse lieferte.

Beim Entwurf der Prüfkörper wurden die o.g. Einflussparameter auf die Beanspruchungen der Brettstapelelemente mitberücksichtigt. Alle Prüfkörper wurden im Vorfeld simuliert, um die Traglasten und die Verformungen abschätzen zu können. Die Versuchsergebnisse, die Ergebnisse der Simulationen und die Ergebnisse der Gleichungen zeigten eine sehr gute Übereinstimmung.

Die aus den Simulationsergebnissen abgeleiteten Gleichungen wurden zu praxisgerechten, vereinfachten Bemessungsgleichungen zusammengefasst, mit denen eine schnelle und einfache Bemessung von Brettstapelelementen unter Plattenbeanspruchung möglich ist.

Abstract

Nail-laminated timber is used as plane structural components made of single, edgewise oriented lamellas. These lamellas are mechanically jointed by nails. Because of the usually different length of the lamellas and the nail-laminated timber elements (NLTE), the lamellas usually are butt jointed. Thus, any required length or width of NLTEs can be produced. The aim of this PhD- thesis was to derive design equations for the bending stiffness and the bending stresses of the lamellas as well as for the action effects of the nails. These design equations should be valid for NLTEs loaded perpendicular to their plane. It would have been quite expensive to obtain the design equations by performing a large number of tests. For this reason the tests were simulated on the computer. The simulations were conducted on the basis of realistic stiffness values of the lamellas and the nailed connections taking into account the variability of the stiffness-values within and between members. The design equations were confirmed by test results.

First, the influence of a reinforced butt joint nailing was studied. Tests and calculations showed no significant improvement of the effective bending stiffness of NLTEs. Further reinforcement measures were of no practical use, thus being abolished.

Simulations considering realistic stiffness values and their statistical distribution provide realistic results. So, thousands of NLTEs can be simulated and the results can be evaluated. The design equations that were derived in this way show a high statistical reliability.

The strength and stiffness properties of the lamellas were simulated on the basis of investigations of lamellas used in glued laminated timber. A virtual lamella ($\ell = 4.5$ m) is subdivided into 30 segments. The values of modulus of elasticity (MOE), the knot-area-ratio (KAR), and the density are assigned to each single segment.

The parameters describing a load-deformation curve of a nailed timber-to-timber joint and their statistical distribution were determined by tests. There were four different test series for four nail diameters. The four test series were subdivided into tests loaded parallel to and perpendicular to the grain, respectively. The test specimens loaded parallel to the grain showed significantly higher stiffness values compared to a load arrangement perpendicular to the grain.

A grid was chosen as the mechanical model of the NLTE. The girders in longitudinal direction represent the lamellas. The transversal direction was simulated by non-linear springs representing the nails. For the simulations, the parameters ℓ/h (span/height of

the element), the nail diameter, the nail spacing, and the type of loading (centric single load and uniformly distributed load) were varied. Four different alternatives of butt joint patterns were simulated (no butt joints, alternating, moving and randomly distributed butt joints). The simulation parameters were taken into account for deriving the design equations for the effective bending stiffness of NLTEs, for the bending stresses of the lamellas, and for the action effects of the nails.

A total of 43 tests was conducted to validate the results of the simulations. Therefore the material properties of 936 lamellas were measured, e.g. modulus of elasticity, the density and the knot-area-ratio. The measured material properties were compared with the simulated material properties and showed good agreement.

The specimens were designed according to the simulation parameters. The tests were simulated beforehand to determine the ultimate loads and the corresponding deformations. The results of the tests conformed the simulation results and the results of the design equations.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand in weiten Teilen im Rahmen des Forschungsvorhabens „Lastverteilung, Tragwirkung und Verformungsverhalten für nachgiebig miteinander verbundene Brettstapelelemente“, das am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe (TH), unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. H.J. Blaß durchgeführt wurde. Als wissenschaftlicher Angestellter am gleichen Lehrstuhl war ich für die Durchführung des o.g. Forschungsvorhabens verantwortlich.

Mein besonderer Dank gilt meinem Hauptreferenten Herrn Professor Blaß, da er mir die Möglichkeit eröffnete, mich im Bereich des Ingenieurholzbaus wissenschaftlich zu betätigen. Seine offene Art, mir bei meinen Forschungen stets freie Hand zu lassen und immer für eine Diskussion bereit zu sein, war mir insbesondere bei den Arbeiten, die über das Forschungsvorhaben hinaus gingen und zu dieser Dissertation führten, eine große Hilfe. Die von ihm mir zugestandene Zeit zu promovieren und die uneingeschränkte Nutzung der Einrichtungen der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau, waren Vorzüge, die nicht jedem Doktoranden zugute kommen.

Für die freundliche Übernahme des Korreferates und für die konstruktiven Hinweise für die Ausarbeitungen danke ich sehr herzlich Herrn Prof. Dr.-Ing. Heinrich Kreuzinger, TU München.

Dem Laborleiter Herr A. Klein und den Labormitarbeitern M. Huber und H. Lafferthon möchte ich herzlich für ihr hohes Engagement und kreative Mitarbeit bei der Durchführung der Versuche danken.

Danken möchte ich auch Frau Dipl.-Ing. J. Denzler, Frau Dipl.-Ing. M. Haberer, Frau Dipl.-Ing. C. Lämmelin, Frau Dipl.-Ing. J. Rösler und Herrn Dipl.-Ing. D. Riemensperger, die im Rahmen von Diplom- und Vertieferarbeiten ihr Teil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Für die Mitarbeit bedanke ich mich bei meiner wissenschaftlichen Hilfskraft, Frau cand.-ing. K. Beck.

Herrn G. Kaufmann danke ich für die Bereitstellung der Gerätschaften der Fa. Kaufmann Massivholz GmbH und die nützlichen praktischen Tipps bei der Herstellung der Prüfkörper.

Volker Krämer

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Brettstapel	4
2.1 Rohstoff Holz	5
2.2 Nadelschnittholz	6
2.3 Derzeitige Bemessungspraxis für Brettstapelelemente	9
2.4 Verstärkungsmaßnahmen im Bereich gestoßener Lamellen	15
2.4.1 Verstärkungsvarianten	15
2.4.2 Vorversuche mit verstärkter Stoßnagelung	19
3. Simulation von Bauteilen	21
3.1 Materialkennwerte der simulierten Lamellen	23
3.1.1 Ästigkeit	24
3.1.2 Rohdichte	26
3.1.3 Elastizitätsmodul	28
3.2 Mechanisches Modell der Brettstapelelemente	31
3.3 Verbindungsmittel	33
3.3.1 Art und Anordnung der Nägel	34
3.3.2 Linear elastische Steifigkeitseigenschaften der Nagelverbindungen	36
3.3.3 Nichtlineare Last-Verschiebungs-Eigenschaften der Nagelverbindungen	39
3.3.3.1 Parameter zur Beschreibung von Last-Verschiebungs- Kurven	39
3.3.3.2 Zugscher- und Druckscherversuche	41
3.3.3.3 Bestimmung der Kurvenparameter	46
3.3.3.4 Simulation der Last-Verschiebungs-Kurven	50
3.3.3.5 Anpassung der Last-Verschiebungs-Kurven in das mechanische Modell	53

3.4	Annahmen für die Simulationen	55
3.4.1	Dimensionen der simulierten Brettstapelelemente	55
3.4.2	Simulationsparameter	57
3.4.2.1	Wechselseitig gestoßene Lamellen	60
3.4.2.2	Wandernd gestoßene Lamellen	61
3.4.2.3	Zufällig gestoßene Lamellen	62
3.4.3	Grundlage der Simulationen	64
3.5	Zusammenstellung der Simulationsparameter	72
4.	Ergebnisse der Simulationen	74
4.1	Simulationen mit linear elastischem Tragverhalten der Nagel- verbindungen	74
4.2	Vorgehensweise zur Auswertung der Simulationsergebnisse	74
4.3	Darstellung der Simulationsergebnisse	76
4.3.1	Biegespannungsverteilung	77
4.3.2	Elastische Verformung der Brettstapelelemente	79
4.3.3	Nagelbeanspruchung auf Abscheren	81
4.4	Ableiten der Näherungsgleichungen zur Berechnung der Bean- spruchungen von Brettstapelelementen	83
4.4.1	Biegerandspannung der Lamellen	84
4.4.1.1	Zentrische Einzellast	84
4.4.1.2	Gleichförmige Flächenlast	87
4.4.2	Berechnung der elastischen Verformung von Brettstapel- elementen	88
4.4.2.1	Zentrische Einzellast	88
4.4.2.2	Gleichförmige Flächenlast	89
4.4.3	Nagelbeanspruchung auf Abscheren	89

4.5	Simulationen mit nichtlinearem Tragverhalten der Nagelverbindungen	90
4.5.1	Grundlagen der Simulationen mit nichtlinearem Tragverhalten der Nagelverbindungen	92
4.5.2	Auswertung der Ergebnisse der Simulationen mit nichtlinearem Tragverhalten der Nagelverbindungen	93
4.5.3	Proportionalitätslasten	94
5.	Näherungsgleichungen zur Berechnung von Beanspruchungen von Brettstapelelementen	102
5.1	Brettstapelelemente unter zentrischen Einzellasten	102
5.1.1	Biegerandspannung	102
5.1.2	Elastische Verformung	104
5.1.3	Nagelbeanspruchung	106
5.1.4	Proportionalitätslast	107
5.2	Brettstapelelemente unter gleichförmiger Flächenlast	108
5.2.1	Biegerandspannung	109
5.2.2	Elastische Verformung	110
5.2.3	Nagelbeanspruchung	111
6.	Versuche	112
6.1	Materialeigenschaften	112
6.1.1	Feuchtegehalt der Lamellen	113
6.1.2	Rohdichte	113
6.1.3	Ästigkeit	115
6.1.4	Elastizitätsmodul	116
6.2	Planung und Herstellung der Prüfkörper	118
6.3	Versuchsdurchführung	124
6.3.1	Zentrische Einzellasten	124
6.3.2	Gleichförmige Flächenlasten	126

6.4	Darstellung der Versuchsergebnisse	129
6.4.1	Zentrische Einzellasten	130
6.4.2	Gleichförmige Flächenlasten	135
7.	Vereinfachungen für die Praxis	141
7.1	Bemessungskonzept	141
7.2	Bemessungsgleichungen	143
7.3	Vereinfachte Bemessungsgleichungen für Brettstapelelemente unter zentrischer Einzellast	144
7.3.1	Biegerandspannung	145
7.3.2	Elastische Verformung	147
7.3.3	Nagelbeanspruchung	149
7.4	Vereinfachte Bemessungsgleichungen für Brettstapelelemente unter gleichförmiger Flächenlast	151
7.4.1	Biegerandspannung	151
7.4.2	Elastische Verformung	152
7.4.3	Nagelbeanspruchung	153
8.	Zusammenfassung	154
9.	Literatur	158

Anhänge

A	Zusammenstellung der Simulationen	A-1 / A-10
B	Ergebnisse der Zug- und Druckscherversuche	B-1 / B-30
C	Vergleich der Bemessungsgleichungen	C-1 / C-8
D	Bilder Brettstapelversuche	D-1 / D-14

Lebenslauf

Bezeichnungen

Kapitel 1

CO ₂	Kohlenstoffdioxid
RAL	Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V.

Kapitel 2

m ³	Kubikmeter
ha	Hektar
O ₂	Kohlendioxid
H ₂ O	Wasser
C ₆ H ₁₂ O ₆	Zucker
t	Tonnen
kg	Kilogramm
ρ _o	Darr- Rohdichte
m _o	Masse, trocken
V _o	Volumen, trocken
Mio	Millionen
T	Dicke eines Brettes
b; h	Breite eines Brettes
Lfm	Laufender Meter
U	Holzfeuchte
m _{Wasser}	Masse des Wassers
m _{Holz, trocken}	Masse des trockenen Holzes
I _{eff}	Wirksames Flächenmoment 2. Grades
I _{Brutto}	Flächenmoment 2. Grades des Gesamtquerschnittes
QS	Quer vorgespannt
E _⊥	Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes
E	Elastizitätsmodul parallel zur Faserrichtung des Holzes

G_{\perp}	Schubmodul des Holzes
S 10	Sortierklasse des Holzes
M	Biegemoment
W_N	Netto- Widerstandsmoment
zul σ_B	Zulässige Biegerandspannung
max l	Maximale Stützweite
Q	Flächenlast
$(EI)_{\ell}$	Biegesteifigkeit in Spannrichtung
max v	Maximale Verformung
q_h	Horizontale Streckenlast
l_s	Scheibenstützweite
h_s	Scheibenhöhe
e	Verbindungsmittelabstand
C	Verschiebungsmodul
b'	Brettbreite
I_e	Effektives Flächenmoment 2. Grades
I_o	Flächenmoment 2. Grades des Gesamtquerschnittes
n	Brettlage, in der sich ein Stoßmuster wiederholt
E_o	Nagelabstand im Nagelbild
N_R	Anzahl der Nagelreihen
Zul N	Zulässige Nagelbelastung
l_e	Einflusslänge
σ_m	Zulässige Biegerandspannung
$E_{0, \text{mean}}$	Mittlerer Biege-Elastizitätsmodul
$k_{\text{Stoß}}$	Abminderungsfaktor
b_m	Mitwirkende Plattenbreite
l_{SP}	Stützweite Brettstapel
A	Querschnittsfläche

F_N	Beanspruchung der Nägel
h_N	Lage der Nägel, bezogen auf die Schwerachse der Lamelle
$f_{m, k}$	Charakteristische Biegefestigkeit
$a_{4, t}$	Randabstand der Nägel vom unbelasteten Rand, rechtwinklig zur Faserrichtung
a_1	Nagelabstand untereinander, parallel zur Faserrichtung

Kapitel 3

KAR	Astflächensumme, bezogen auf den Querschnitt eines Brettabschnittes von 150 mm Länge
x_0	Linksseitiger Grenzwert
μ	Mittelwert
σ	Standardabweichung
E_{Lamelle}	Mittlerer Elastizitätsmodul einer Lamelle
E_i	Segment-Elastizitätsmodul
d_N	Nageldurchmesser
K_{ser}	Verschiebungsmodul eines Verbindungsmittels
ρ_k	Charakteristische Rohdichte
δ_{Modell}	Verformung des Ersatzmodells
δ_{Nagel}	Verformung der Nagelverbindung
I_N	Flächenmoment 2. Grades eines Nagels
σ_h	Lochleibungsspannung
f_h	Lochleibungsfestigkeit
K_0	Parameter zur Beschreibung der Anfangssteifigkeit
K_1	Parameter zur Beschreibung der Steifigkeit des linearen Bereichs
K_2	Achsenabschnitt der Endtangente
K_3	Steigung der Endtangente
F_{max}	Höchstlast
Σ	$n \times n$ Kovarianzmatrix
A	$n \times n$ Dreiecksmatrix

\mathbf{A}^T	Transponierte $n \times n$ Dreiecksmatrix
$\mathbf{X}_n^{(i)}$	n -dimensionaler Vektor, simulierte Werte
μ_n	n -dimensionaler Vektor, Mittelwerte
\mathbf{Z}_n	n -dimensionaler Vektor, Zufallszahlen
ℓ^e	Stoßlage vom Auflager aus
f_u	Gleichverteilte Zufallszahl
F_{Knoten}	Knotenlast

Kapitel 4

S_d	Bemessungswert der Einwirkung
R_d	Bemessungswert des Widerstandes
W_{2L}	Widerstandsmoment zweier Lamellen
$K_{\text{mod}, w}$	Modifikationsfaktor des Widerstandsmomentes
σ_i	Biegerandspannungen der Lamellen
n_{ef}	Wirksame Lamellenanzahl
\hat{W}	Modifiziertes Widerstandsmoment
\hat{I}	Modifiziertes Flächenmoment 2. Grades
F_{ser}	Gebrauchslast
u_{inst}	Elastische Anfangsverschiebung
$F_{(i)}$	Lastschritte
$s_{i,r,y}$	Residual Verformung
F_y	Last bei Proportionalitätsgrenze
κ	Quotient der Steigungen
F_{prop}	Proportionalitätslast

Kapitel 6

ΔF	Kraftdifferenz
Δv	Der Kraftdifferenz entsprechende Verformung
E_{dyn}	Dynamisch ermittelter Elastizitätsmodul
T	Längsschwingungszeit

f	Frequenz
Hz	Herz
F_k	Einzelkolbenlast der Prüfzylinder

Kapitel 7

K_{WF}	Faktor zur Berechnung der Biegerandspannungen, Einzellast
$K_{WF,R}$	Faktor zur Berücksichtigung des ℓ/h - Verhältnisses, Einzellast
$K_{WF,a1}$	Faktor zur Berücksichtigung der Nagelabstände, Einzellast
$K_{WF,S}$	Faktor zur Berücksichtigung der Stoßvarianten, Einzellast
K_{IF}	Faktor zur Berechnung der elastischen Verformung, Einzellast
$K_{IF,R}$	Faktor zur Berücksichtigung des ℓ/h - Verhältnisses, Einzellast
$K_{IF,a1}$	Faktor zur Berücksichtigung der Nagelabstände, Einzellast
$K_{IF,S}$	Faktor zur Berücksichtigung der Stoßvarianten, Einzellast
K_{NF}	Faktor zur Berechnung der Nagelbeanspruchungen, Einzellast
$K_{NF,R}$	Faktor zur Berücksichtigung des ℓ/h - Verhältnisses, Einzellast
$K_{NF,a1}$	Faktor zur Berücksichtigung der Nagelabstände, Einzellast
$K_{NF,S}$	Faktor zur Berücksichtigung der Stoßvarianten, Einzellast
K_{Wq}	Faktor zur Berechnung der Biegerandspannungen, Flächenlast
K_{Iq}	Faktor zur Berechnung der elastischen Verformung, Flächenlast
K_{Nq}	Faktor zur Berechnung der Nagelbeanspruchungen, Flächenlast

1. Einleitung

Brettstapelelemente sind massive, flächige Bauteile, die aus einzelnen, hochkant nebeneinander stehenden Brettlamellen bestehen. Diese Brettlamellen sind entweder durch Nägel oder durch Laubholzdübel nachgiebig miteinander verbunden.



Bild 1- 1 Untersicht einer Brettstapeldecke mit Unterzug

Die Idee einer massiven Holzbauweise ist nicht neu. Die wahrscheinlich ersten massiven Holzbaulemente waren die tragenden Schichten unter den Böden der Pfahlbauten und der zugehörigen Stege, in denen Rundhölzer, gespaltene Rundhölzer, oder grob behauene Planken dicht aneinander gelegt waren [1]. Massive Deckenkonstruktionen finden sich auch in alten Schwarzwaldhäusern, in denen Rundholzstämmen „Mann an Mann“ gelegt wurden [2]. Diese Rundholzstämmen waren nicht mechanisch miteinander verbunden. Aus der Schwarzwälder Bauweise entwickelte sich die sogenannte Dippelbaumdecke. Hierbei handelt es sich um eine massive Holzdecke, bei der grob besäumte Holzstämmen dicht aneinander liegen und mittels Laubholzdübeln verbunden sind. Brettstapelelemente wie wir sie heute kennen, d.h. gesägte Bretter, die durch eine kontinuierliche Vernagelung miteinander verbunden sind, wurden vermutlich zuerst in den USA als sekundäre Tragsysteme für Brückenbauwerke in Verbindung mit Asphalt oder Beton verwendet.

Bei der Rippenbauweise, die in den 30-er Jahren des 20. Jahrhunderts in der Schweiz entwickelt wurde, wurden die Hohlräume zwischen einzelnen Wandstützen durch vertikal stehende Brettstapelelemente ausgefacht [3]. Die Brettlamellen wurden bei der Herstellung der Brettstapelelemente um jeweils 2 cm seitlich versetzt angeordnet und in einem Abstand von ca. 30–40 cm vernagelt. Durch die versetzte Anordnung der Brettlamellen sahen die Brettstapelelemente wie gerippte Platten aus, daher stammt auch der Begriff Rippenbauweise.

Die Brettstapelbauweise konnte sich nach dem zweiten Weltkrieg in den deutschsprachigen Ländern zunächst nicht durchsetzen. Zum Einen stand der Werkstoff Holz infolge der beiden Weltkriege nur in begrenztem Umfang zur Verfügung. Zum Anderen haftete der Holzbauweise auch das sogenannte „Barackenklima“-Image an. In schlecht gedämmten Häusern bzw. Baracken, die in Holzleichtbauweise gebaut sind, treten jahreszeitlich bedingt große Temperaturänderungen auf. Die Raumluft kühlt nach dem Abschalten der Heizung sehr schnell ab, was von den Bewohnern als sehr unangenehm empfunden wird. Durch eine sorgfältige bauphysikalische Planung der Gebäude und durch den Einbau von Speichermasse, wie z.B. Brettstapelementen, weisen Holzhäuser heute ein sehr angenehmes Raumklima auf, nicht zuletzt durch die hygroscopische Eigenschaft des Holzes.

In den 80-er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde die Brettstapelbauweise in der Schweiz wiederbelebt [4]. Seit dieser Zeit wurden etliche Bauvorhaben in Brettstapelbauweise verwirklicht [5]. Unter den Gesichtspunkten ökologisches Wohnen, CO₂-Speicherung im Holz, Verwendung von Seitenbrettern, die in großen Mengen bei der Produktion von Bauholz anfallen, massive Bauweise ohne Hohlräume, guter Schallschutz, hoher Vorfertigungsgrad der Elemente, kurze Bauzeiten und gute Kombinierbarkeit mit anderen Baustoffen hat sich die Brettstapelbauweise heute im Bereich des Holzhausbaus fest etabliert.

Diese positive Entwicklung führte zu wesentlichen Weiterentwicklungen im Bereich der Herstellungsprozesse von Brettstapelementen. 1996 wurde in Deutschland die erste industrielle Fertigungsanlage für genagelte Brettstapelemente in Betrieb genommen [6]. Die Herstellung von genagelten Brettstapelementen erfolgt im Gegensatz zu dem ursprünglichen Gedanken, dass Bauherren in Eigenleistung Brettstapelemente selbst herstellen, fast ausschließlich über industrielle Fertigungsanlagen. Das oftmals für die Verwendung von Brettstapelementen aufgeführte Argument des hohen Eigenleistungsanteils trifft in aller Regel nicht mehr zu.

Ein Problem der genagelten Brettstapelemente ist der sehr hohe Maschinenverschleiß, wenn Nachbesserungen oder Reparaturen an den Elementen auszuführen sind. Durch die hohe Nageldichte im Brettstapelement kommen die Schneidwerkzeuge der Holzbearbeitungsmaschinen mit den metallischen Verbindungsmitteln in Kontakt, dies kann eine Beschädigung oder eine Zerstörung der Holzbearbeitungsmaschinen zur Folge haben. Neben diesem und auch wirtschaftlichen Gründen gingen einige Hersteller dazu über, die Brettlamellen anstatt mit Nägeln mit Laubholzdübeln zu verbinden. Die erste vollautomatische Brettstapelproduktion mit Laubholzdübeln lief 1998 in der Schweiz an [7]. Zum aktuellen Zeitpunkt liegt der Anteil der Brettstapelemente mit Hartholzdübeln bezogen auf die Gesamtproduktion bei

ca. 50%. Eine weitere Entwicklung von Brettstapelelementen stellte eine Schweizer Firma im Jahr 2000 vor [8]. Bei dieser Art von Brettstapelelementen erhalten die Brettlamellen ein Schwalbenschwanzprofil in Lamellenlängsrichtung und werden ineinander geschoben. Auf diese Weise kann auf mechanische stiftförmige Verbindungsmittel verzichtet werden.

Im Jahr 2001 kam es zur Gründung der RAL-Gütegemeinschaft „Brettstapel- und Dübelholzhersteller“ [9]. Die Satzung der Gütegemeinschaft regelt insbesondere die qualitativen Anforderungen an die von den Mitgliedern hergestellten Brettstapelelemente. Die Anforderungen zielen auf die Holzqualität, die Fertigung, die Maßtoleranzen und die Oberflächenbeschaffenheit der Brettstapelelemente.

Neben den aus der Praxis entstandenen Weiterentwicklungen der Brettstapelelemente und den hohen Qualitätsanforderungen an deren Herstellung durch die RAL-Gütegemeinschaft gab es in den letzten Jahren auch wissenschaftliche Untersuchungen, die sich mit dem Thema Brettstapel beschäftigten. Ein Teil der Arbeiten untersuchte die bauphysikalischen Eigenschaften von Brettstapelelementen, z.B. das Schwind- und Quellverhalten [10] oder das Brandverhalten [11]. Ein anderer Teil der bislang abgeschlossenen Forschungsvorhaben deckt das Trag- und Verformungsverhalten von nachgiebig miteinander verbundenen Brettstapelelementen ab. Natterer stellt Ergebnisse von Versuchen dar und gibt Richtwerte für die Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften von Brettstapelelementen unter Plattenbeanspruchung an [12]. In [13] stellen Blaß/Krämer Bemessungsgleichungen für die Berechnung der Beanspruchungen und Verformungen von genagelten Brettstapelelementen unter Plattenbeanspruchung vor.

Ziel dieser Arbeit ist es, basierend auf dem komplexen Tragverhalten der Elemente und den streuenden Eigenschaften der Komponenten wirklichkeitsnahe Bemessungsgleichungen zum Nachweis der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit für genagelte, Brettstapelelemente unter Plattenbeanspruchung abzuleiten. Weiterhin ist es Intention des Autors, die o.g. Bemessungsgleichungen am Ende der Arbeit in eine praxisgerechte Form zu bringen.

2. Brettstapel

Brettstapelelemente sind massive, flächige Bauteile, die aus einzelnen, hochkant nebeneinander gestellten Brettlamellen hergestellt werden. Die Bretter werden entweder durch eine fortlaufende Nagelung oder durch das Einbringen von Laubholzdübeln in die Brettstapelelemente miteinander verbunden. Um bei den Brettstapelelementen nicht an eine bestimmte Brettlänge gebunden zu sein, können die Bretter entweder an vorgegebenen Stellen oder auch willkürlich versetzt gestoßen sein (vgl. Bild 2- 1). Hierdurch können massive Platten- und Scheibenelemente mit praktisch beliebiger Breite und Länge hergestellt werden.



Bild 2- 1 Brettstapelelement mit regelmäßig gestoßenen Lamellen

Seit einigen Jahren wird die Brettstapelbauweise in zunehmendem Maße für die unterschiedlichsten Konstruktionselemente im Hochbau angewendet. Brettstapelelemente werden als massive Deckenelemente, als massive Wandelemente oder als massive Dachelemente verwendet. Für die Sanierung bzw. Renovierung alter hölzerner Tragkonstruktionen und Dachstühle eignen sich Brettstapelelemente besonders, da hier die tragenden oder aussteifenden Brettstapelelemente Lamelle für Lamelle hergestellt werden können, ohne dass die vorhandene Tragkonstruktion durch Gewicht, Erschütterung oder dem Öffnen der Außenhülle über Gebühr beansprucht wird. Decken aus Brettstapelelementen können sofort nach deren Herstellung begangen werden, was sowohl bei Neubauten als auch bei Sanierungsarbeiten von Vorteil ist.

Eine weitere - hier nicht weiter verfolgte - Einsatzmöglichkeit von Brettstapelelementen ist der Holz-Beton-Verbund. Beim Holz-Beton-Verbund werden die Biegedruckbeanspruchungen des Verbundbauteiles über die vergleichsweise hohe Druckfestigkeit des Betons, die Biegezugbeanspruchungen über die Holzlamellen abgetragen. Die Schubkräfte zwischen Brettstapelelement und Betonplatte können nach Blaß et al. [14] mittels gekreuzten Schrauben, Nagelplatten, Stahlstiften oder bewehrten Betonnocken übertragen werden. Braun et al. veröffentlichten 1998 [15] einen Bemessungsvorschlag für den Verbundwerkstoff „Brettstapel-Betonverbund“.

2.1 Rohstoff Holz

Die Fläche der Bundesrepublik Deutschland ist zu ca. einem Drittel bewaldet [16]. Trotz der dichten Besiedlung nimmt die Waldfläche in den letzten Jahren durchschnittlich um 5400 ha/Jahr zu. Diese positive Waldflächenbilanz ist ein Resultat der nachhaltigen Forstwirtschaft. Das Prinzip der nachhaltigen Forstwirtschaft wurde vor über 200 Jahren in Deutschland eingeführt und bedeutet, dass nicht mehr Holz aus den Wäldern entnommen wird als nachwächst. Mit dem Prinzip der Nachhaltigkeit wird sichergestellt, dass der Wald über Generationen hinweg gleichbleibende Erträge liefert. Durch die konsequente Anwendung des Prinzips der nachhaltigen Forstwirtschaft, die z.B. im Bundesland Baden-Württemberg im Landeswaldgesetz - LWaldG vom 8. Juni 1995 [17] - auch gesetzlich geregelt ist, haben sich die Holzvorräte erhöht und die Waldflächen sind gestiegen.

Die Umtriebszeit, d.h. das Erntealter von Bäumen, liegt in Mitteleuropa je nach Baumart zwischen 80 und 240 Jahren [16]. Holz ist in seinem Lebenszyklus, d.h. vom Pflanzen der Bäume bis zum Verbrennen oder Verrotten der Hölzer, Kohlendioxid (CO₂) neutral. Pflanzen und Bäume erzeugen durch die Photosynthese ihren Eigenbedarf an Zucker selbst [18]. Neben der Eigenversorgung des Baumes mit Zucker hat die Photosynthese einen weiteren ökologischen Vorteil: Kohlendioxid wird der Luft entzogen und Sauerstoff wird an die Atmosphäre abgegeben. Kohlendioxid ist das Treibhausgas, welches für die klimatische Erwärmung und den Rückgang der Ozonschicht verantwortlich gemacht wird [19].

Die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre kann durch Bindung von Kohlendioxid in z.B. Holz und Holzwerkstoffen zumindest vorübergehend verringert werden. In einem Kubikmeter Holz mit einer mittleren Darr-Rohdichte von 0,5 t/m³ ist nach [16] 255 kg Kohlenstoff gebunden, wobei die Darr-Rohdichte nach DIN 52182 [20] definiert ist:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \quad [\text{g/cm}^3]. \quad (2- 1)$$

Hierin bedeuten:

m_0 = Masse der trockenen Probe [g]

V_0 = Volumen der trockenen Probe [cm^3]

Die Masse von 255 kg Kohlenstoff in einem Kubikmeter Holz entspricht einem CO_2 – Äquivalent von 0,935 t. So wird mit jedem Kubikmeter nachwachsendem Holz ca. 0,935 t CO_2 gespeichert.

Durch den Einsatz von Brettstapelelementen, deren Herstellung eine große Menge Nadelholz erfordert, kann der durch die nachhaltige Forstwirtschaft gesicherte Rohstoff Holz sinnvoll und in großen Mengen eingesetzt werden. Zusätzlich ist es ökologisch sinnvoll, Bauholz einzusetzen, da hierdurch große Mengen an CO_2 gespeichert werden und somit die Umwelt nicht belasten.

2.2 Nadelschnittholz

Brettstapelelemente bestehen aus Nadelschnitthölzern nach DIN 4074-1 [21]. Abhängig von der Art der Verbindung der Nadelschnitthölzer untereinander - Nagelung oder Dübelung - werden Brettstapelelemente aus Brettern oder Bohlen hergestellt.

Ein Grundgedanke für die Anwendung der Brettstapelbauweise war die sinnvolle Verwendung von Brettern, der sog. Seitenware, die in großen Mengen bei der Herstellung von Schnittholz anfallen. Als Schnittholz bezeichnet man Holzzeugnisse, die durch Sägen von Rundholz parallel zur Stammachse hergestellt werden [23], wie z.B. Latten, Bretter, Bohlen oder Kanthölzer. Die Länge der Schnitthölzer ist infolge des Baumwachses und ihrer Herstellungsart immer wesentlich größer als die Querschnittsmaße, es handelt sich i.d.R. um stabförmige Bauteile mit quadratischem oder rechteckigem Querschnitt. Das Hauptprodukt des Schnittholzes stellt das Kantholz dar. Die anfallenden Restquerschnitte des Rundholzes (vgl. Bild 2- 2) werden zu Seitenbrettern oder Latten verarbeitet.

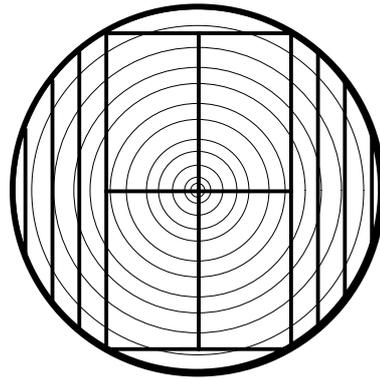


Bild 2- 2 Schnittbild eines Rundholzes

Aus einem Festmeter Rundholz werden im Mittel ca. $0,5 \text{ m}^3$ Kanthölzer gesägt, die restlichen $0,5 \text{ m}^3$ des Rundholzvolumens ergeben Seitenbretter, Latten, Schwarten oder Sägemehl. Die prozentualen Anteile der einzelnen Arten des Schnittholzes aus einem Festmeter Rundholz können nicht angegeben werden, da sie von der Größe und Anzahl der Kanthölzer, den Querschnittsmaßen des Rundholzes und der Abholzigkeit des Stammes abhängig sind. Ein Nadelholzstamm hat die idealisierte Form eines Kegelstumpfes, wobei die Abholzigkeit als Abnahme des Stammdurchmessers bezogen auf 1,0 m Stammlänge definiert ist [24]. Beträgt die Abnahme des Durchmessers mehr als 1,0 cm pro laufenden Meter (lfm), wird der Baumstamm als abholzig bezeichnet. Beträgt die Abnahme weniger als 1,0 cm pro lfm wird der Baumstamm vollholzig genannt.

Seitenbretter werden durch liegende Jahrringe, bezogen auf die Seiten (breite Fläche des Schnittholzes) der Bretter, charakterisiert. Sie weisen im Vergleich zu Brettern, die aus dem mittleren Bereich des Stammes gesägt wurden, deutlich größere Astquerschnitte auf. Während des Wachstums bildet der Baum Jahrringe, die den Ast umhüllen, dadurch wird ein kegelförmiger Bereich von Astholz gebildet. Die Festigkeitseigenschaften von Nadelholz werden nach Niemz [25] von der Astgröße, bezogen auf die Querschnittsfläche der Bretter, zum Teil signifikant beeinflusst. Mit zunehmender Astgröße sinkt demnach die Zug-, Druck- und Biegefestigkeit von Nadelholz. Neben den größer werdenden Ästen wird auch die Rohdichte der fehlerfreien Brettabschnitte in Richtung der Rinde größer, da die Jahrringbreite in dieser Richtung abnimmt. Die Festigkeitseigenschaften von Nadelholz sind eng mit der Rohdichte korreliert, so dass die Festigkeitseigenschaften von fehlerfreiem Seitenholz höher als die von entsprechendem fehlerfreiem Herzholz sind. Die interferierenden Holzeigenschaften - d.h. die größer werdenden Äste und die Zunahme der Rohdichte zur Rinde hin - können die daraus resultierenden Materialeigenschaften im Mittel ausgleichen.

Neben den quasi gleichen mechanischen Eigenschaften zeigen Seitenbretter im Vergleich zu Brettern aus der Stammmitte ein unterschiedliches Schwind- und Quellverhalten. Als Schwinden oder Quellen bezeichnet man die Formänderung des Holzes infolge Wasserabgabe oder Wasseraufnahme. Die feuchtebedingten Formänderungen des Holzes unterscheiden sich signifikant in den Hauptrichtungen longitudinal, radial und tangential (vgl. Bild 2- 3). Diese Unterschiede werden durch den Aufbau und die Anordnung der Holzzellen verursacht.

Die mittleren Schwind- und Quellmaße je 1% Holzfeuchteänderung betragen nach Niemz [25] für Fichtenholz in longitudinaler Richtung 0,01%, in radialer Richtung 0,19% und in tangentialer Richtung 0,36%. Infolge des deutlich anisotropen Schwindverhaltens von Holz neigt es zur Rissbildung während des Trocknens, um die durch die Formänderung entstandenen inneren Spannungen abzubauen. Außerdem wird der Querschnitt eines Seitenbrettes durch das Schwinden in Richtung der Baumaußenseite hin gekrümmt [26]. Neben der Rissbildung und den konstruktiven Problemen, die durch das Schwinden von Seitenbrettern entstehen, können stark verformte Seitenbretter den ästhetischen Ansprüchen der Nutzer nicht mehr genügen.

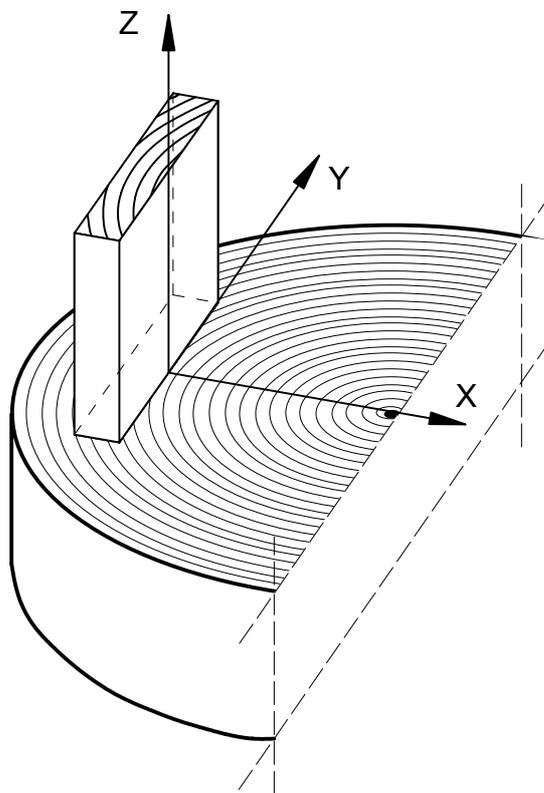


Bild 2- 3 Hauptachsen eines Seitenbrettes

Seitenbretter werden aus den oben angeführten Gründen oft für untergeordnete Zwecke wie Dachschalungen, Paletten oder einfache Bodenbeläge verwendet. In der Brettstapelbauweise werden die in großer Menge anfallenden Seitenbretter zu einem hochwertigen massiven Holzbauprodukt veredelt.

2.3 Derzeitige Bemessungspraxis für Brettstapelelemente

Die Bemessung biegebeanspruchter Brettstapelelemente erfolgt zum Teil auf sehr konservativen und wenig abgesicherten Annahmen. Das gängigste Bemessungsverfahren für Brettstapelelemente mit gestoßenen Lamellen unter gleichförmiger Flächenlast ist der Ansatz von abgeminderten Querschnittswerten. Braun schlägt 1994 [27] vor, für die Bemessung von Brettstapelelementen mit gestoßenen Lamellen nur die Hälfte der Lamellen anzusetzen. Diese Bemessung über die Halbierung der Querschnittswerte wird heute noch oft für die Nachweise der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit angewendet. Für den Nachweis von Brettstapeldecken mit gestoßenen Lamellen schlagen Gerold et al. [28] eine Anordnung vor, in der sich die Stöße, die eine Übergreifungslänge von mindestens 1,20 m haben sollen, in jeder fünften Lamellenlage wiederholen. Aus Rationalisierungsgründen sollen bei der Herstellung von Brettstapelelementen jeweils zwei Lamellen miteinander vernagelt werden, der Nagelabstand parallel zur Faserrichtung des Holzes soll 30 cm betragen. Zusätzlich wird eine verstärkte Stoßnagelung gefordert. Unter diesen Annahmen kann ein Netto-Widerstandsmoment von 80 % des Brutto-Widerstandsmomentes für die Biegebemessung der Brettstapeldecken angesetzt werden. Die verstärkte Stoßnagelung, d. h. eine höhere Nageldichte rechts und links von einem Lamellenstoß, hat sich aufgrund des hohen Zeitaufwandes bei der Herstellung der Brettstapelelemente nicht durchgesetzt. Mit den oben gezeigten Voraussetzungen können nach Gerold et al. Durchbiegungen mit einem wirksamen Flächenmoment 2. Grades

$$I_{\text{eff}} = 0,9 \cdot I_{\text{Brutto}} \quad (2-2)$$

berechnet werden.

Anfang 1998 veröffentlichte Werner [29] eine Schrift zum Thema Brettstapelbauweise. Neben Hinweisen für die Ausführung von Brettstapelkonstruktionen finden sich hier Materialkennwerte für Brettstapelelemente, Bemessungsgleichungen und Bemessungstabellen. Für die Bemessung von Einfeldträgern mit ungestoßenen Lamellen wird der Elastizitätsmodul für Brettstapelelemente parallel zur Faser zu 11000 N/mm^2 angenommen. In Anlehnung an die Bemessung von quer vorgespannten Holzplatten (QS-Holzplattenbrücken) gibt Werner den Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Lamellenrichtung und den Schubmodul mit

$$E_{\perp} = 0,013 \cdot E_{\parallel} \quad (2-3)$$

$$G_{\perp} = 0,030 \cdot E_{\parallel} \quad (2-4)$$

an. Der Nachweis der Biegerandspannungen der Lamellen wird auf der Grundlage der technischen Biegelehre nach dem Konzept der zulässigen Spannungen geführt. Die Breite des Brettstapelelementes wird mit 1,0 m angenommen. Unter der Annahme einer Sortierklasse S 10 nach DIN 4074- 1 [26] der Lamellen und einer gleichförmigen Flächenlast lautet der Biegespannungsnachweis:

$$\frac{M}{W_N \cdot \text{zul}\sigma_B} \leq 1,0 \quad (2-5)$$

Nach Einsetzen der entsprechenden Werte und nach Umformen der Gleichung (2- 5) folgt:

$$\max \ell = 1,155 \cdot \frac{h}{\sqrt{q}} \quad (2-6)$$

Hierin bedeuten:

M	Biegemoment
W_N	Widerstandsmoment des Nettoquerschnittes
$\text{zul}\sigma_B$	zulässige Biegespannung nach DIN 1052- 1 [30]
$\max \ell$	maximale Stützweite
h	Brettstapelhöhe
q	Flächenlast

Unter den gleichen Voraussetzungen wie für die Biegebemessung schlägt Werner für den Nachweis der Verformungen folgende Gleichung vor:

$$\max \ell = 0,0635 \cdot \sqrt[3]{\frac{(EI)_{\ell}}{q}} \quad (2-7)$$

Aufgelöst, mit den entsprechenden Werten folgt:

$$\max \ell = 0,6165 \cdot \frac{h}{\sqrt[3]{q}} \quad (2-8)$$

Hierin bedeutet:

$(EI)_{\ell}$	Biegesteifigkeit in Nmm^2/m in Spannrichtung
---------------	--

Für die Bemessung von Brettstapelelementen mit gestoßenen Lamellen gibt Werner Hinweise auf die Notwendigkeit der Nachweise der Nageltragfähigkeit und der Verformungen. Diese sollen mit Hilfe von Stabwerks- oder Finite-Elemente-Programmen erfolgen. Brettstapelelemente mit gestoßenen Lamellen sollen als Durchlaufträger wie Koppelpfetten bemessen werden. Hierzu finden sich Tabellen zur Bestimmung der Feldmomente und der Überkopplungslängen, welche die Lage der Stöße kennzeichnen. Die aus Tabellen bestimmten Kopplungskräfte werden über die Verbindungsmittel aufgenommen.

Der Nachweis von Brettstapelelementen als aussteifende Scheibenelemente nach Werner wird mit Gleichung (2- 9) geführt:

$$\max v = \frac{q_h \cdot l_s^2}{8 \cdot h_s} \cdot \frac{e}{C \cdot b'} \quad (2- 9)$$

Hierin bedeuten:

q_h	horizontale Streckenlast
l_s	Scheibenstützweite
h_s	Scheibenhöhe
e	Verbindungsmittelabstand
C	Verschiebungsmodul nach DIN 1052- 2
b'	Brettbreite (t)

Gleichung (2- 9) gilt für die Beanspruchungen durch eine gleichförmige Streckenlast sowohl rechtwinklig als auch parallel zur Lamellenrichtung.

Ebenfalls 1998 veröffentlichten Becker et al. eine Schrift zur Brettstapelbauweise [31], in der sich Hinweise auf die Bemessung von Brettstapelelementen finden. Für die Begrenzung der Biegerandspannung der Lamellen gibt Becker Gleichung (2- 10) an:

$$\frac{M \cdot h}{2 \cdot I_e \cdot \text{zul} \sigma_B} \leq 1,0. \quad (2- 10)$$

Hierin bedeuten:

M	maximales Biegemoment
h	Dicke des Brettstapels
I_e	wirksames Flächenmoment 2. Grades
$\text{zul} \sigma_B$	zulässige Biegespannung nach DIN 1052-1

Bei der Bestimmung des wirksamen Flächenmomentes 2. Grades I_e werden die sich regelmäßig wiederholenden Lamellenstöße berücksichtigt. Das Brutto-Flächenmoment 2. Grades des Brettstapelelementes I_o wird abhängig von den Brettlagen, in denen sich die Lamellenstöße wiederholen, abgemindert (Gleichung (2- 11)).

$$I_e = \left(1 - \frac{1}{n}\right) \cdot I_o. \quad (2- 11)$$

Hierin bedeuten:

- n Anzahl der Brettlagen, bis sich das Stoßmuster wiederholt
 I_o Flächenmoment 2. Grades des Gesamtquerschnitts

Die Grenzwerte der Verformungen von Brettstapelelementen liegen bei $\ell/300$ für den Nachweis von gleichförmigen Flächenlasten, für den Nachweis von konzentrierten Einzellasten werden pauschal 1,5 mm vorgeschlagen. Die Verformungen werden mit dem wirksamen Flächenmoment 2. Grades I_e berechnet. Becker schlägt für den Nachweis von Punktlasten P Gleichung (2- 12) vor:

$$\max P = \frac{2 \cdot \ell_e \cdot n_R}{e_o} \cdot \text{zul N}. \quad (2- 12)$$

- e_o Nagelabstand im Nagelbild
 n_R Anzahl der Nagelreihen
zul N zulässige Nagelbelastung
 ℓ_e Einfluslänge

Der Betrag der Einfluslänge ℓ_e soll mit Hilfe des Modells eines unendlich langen, elastisch gebetteten Balkens abgeschätzt werden. Die Bemessung von Brettstapelelementen als Durchlaufträger wird analog zu Werner [29] mittels der Koppelpfettenanalogie vorgeschlagen. Auf Nachweise von Brettstapelelementen als aussteifende Scheiben wird textlich eingegangen, es finden sich aber keine Bemessungsvorschläge für diese Beanspruchungssituation.

In [22] finden sich Bemessungstabellen für Brettstapelelemente mit ungestoßenen Lamellen unter gleichförmiger Flächenlast. Mit Hilfe dieser Tabellen können die erforderlichen Elementhöhen in Abhängigkeit der Belastung und der Stützweite überschlägig bestimmt werden.

Das Tragverhalten von Brettstapelelementen mit gestoßenen und ungestoßenen Lamellen wurde experimentell von Haller [32] untersucht. Bei den Prüfkörpern handelte es sich um genagelte Brettstapelelemente mit ungestoßenen Lamellen sowie um Brettstapelelemente mit regelmäßig und unregelmäßig verteilten Stößen. Untersucht wurde das Tragverhalten der Brettstapelelemente unter Linienlasten in den Drittelpunkten und in Elementmitte und unter Einzellasten in Elementmitte. Die 4-Punkt-Biegeversuche (zwei Linienlasten in den Drittelpunkten) mit ungestoßenen Lamellen zeigten unerwartet große Vertikalverformungen. Der mittlere Elastizitätsmodul der Lamellen wurde mit Hilfe von Ultraschallmessungen (SYLVATEST) zu 9950 N/mm^2 ermittelt. Bei der Rückrechnung eines mittleren Elastizitätsmoduls der Brettstapelelemente mit ungestoßenen Lamellen ergab sich ein Wert von 8996 N/mm^2 . Der Steifigkeitsunterschied von ca. 10 % zwischen Messung und Rechnung wurde auf das Nagelbild zurückgeführt. Die Versuche zeigten weiterhin, dass Brettstapelelemente mit gestoßenen Lamellen eine geringere Tragfähigkeit besitzen und sich deutlich mehr verformen. Bei den Versuchen mit Einzellasten wurden neben der reinen Brettstapeldecke auch Brettstapeldecken mit verschiedenen Fußbodenaufbauten geprüft. Der Versuch mit einem Brettstapelelement ohne Fußbodenaufbau zeigte die größten vertikalen Verformungen unter der Einzellast, der Brettstapel-Beton-Verbund-Prüfkörper verformte sich quer zur Lamellenlängsrichtung nahezu gleichmäßig. Bemessungsvorschläge für Brettstapelelemente finden sich nicht.

Natterer et al. veröffentlichten 1999 einen Forschungsbericht [12] zum Tragverhalten von Konstruktionselementen in Brettstapelbauweise. Ziel des Forschungsvorhabens war die Untersuchung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens von Elementen in lamellierter Massivholzbauweise (Brettstapelbauweise). Die Ziele des Forschungsvorhabens sollten durch Versuche erreicht werden. Insgesamt wurden 28 Prüfkörper hergestellt, bei denen die Art und die Lage der Stöße variiert wurden. Die Steifigkeitseigenschaften der Lamellen wurden vorab ermittelt, so dass die Prüfkörper aus Lamellen mit ähnlichen Materialeigenschaften hergestellt werden konnten. Die wirksame Breite zur Lastabtragung von Einzellasten von Brettstapelelementen wird auf der Grundlage der Verwendung glattschaftiger Nägel ($2,8 \times 90 \text{ mm}$) mit einem Abstand von 27 cm und einer Brettstärke von 30 mm mit 54 cm in Elementmitte und mit 24 cm am Rand des Elementes angegeben. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass die Stöße der Lamellen einen deutlichen Einfluss auf die Biegesteifigkeit der Brettstapelelemente ausüben. Die Stoßausbildung (verdichtete Nagelung, Nagelpressleimung) hat einen eher geringen Einfluss. Als Rechenwerte für die Bemessung von Brettstapelelementen ohne Stoß werden folgende Werte vorgeschlagen:

zulässige Biegespannung $\sigma_m = 11,0 \text{ N/mm}^2$

Biege-Elastizitätsmodul: $E_{0,\text{mean}} = 11500 \text{ N/mm}^2$

Für Brettstapelelemente mit gestoßenen Lamellen wird ein Abminderungsfaktor für die Verformungsberechnung von $k_{\text{Stoß}} = 0,8$ vorgeschlagen. Die zulässige Biegespannung der Brettstapelelemente mit gestoßenen Lamellen wird zu $10,0 \text{ N/mm}^2$ vorgeschlagen, dies müsste jedoch noch durch weitere Versuchsreihen bestätigt werden. Vorschläge, wie die Biegespannungen zu berechnen sind, werden nicht gemacht.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens zur „Entwicklung leistungsfähiger und wirtschaftlicher Bauelemente zur Erhöhung der Wertschöpfung von minderwertigem Schnittholz“ wurden von Schickhofer an der TU Graz Belastungsversuche an genagelten Brettstapelelementen durchgeführt [80]. Die Lasten wurden punkt- oder linienförmig als Platten- und Scheibenbeanspruchung, d.h. in Plattenebene und rechtwinklig zur Plattenebene, in die Prüfkörper eingeleitet. Als Verbindungsmittel wurden glattschaftige Nägel $3,4 \times 80$ [mm] verwendet. Für die Versuche mit zentrischen Einzellasten (Plattenbeanspruchung) wurde aus den Verformungsmessungen eine mitwirkende Plattenbreite mit Gleichung (2- 13) berechnet:

$$b_m = \left(\frac{F \cdot \ell_{\text{SP}}^3}{48 \cdot E \cdot \frac{h^3}{12}} + \frac{F \cdot \ell_{\text{SP}}}{4 \cdot G \cdot h} \right) \cdot \frac{1}{W_{\text{ges}}} \quad (2- 13)$$

Hierin bedeuten:

F	zentrische Einzellast
ℓ_{SP}	Stützweite des Brettstapels
h	Dicke des Brettstapels
E	mittlerer Elastizitätsmodul der Lamellen = 12700 N/mm^2
G	Schubmodul der Lamellen = 500 N/mm^2
W_{ges}	vertikale Verformung aus Versuch

Die mitwirkende Plattenbreite wird für jeden Versuch für drei Verformungsstufen ($\ell/300$, $\ell/200$ und $\ell/150$) angegeben. Für einen Nagelabstand untereinander von 25 cm ergibt sich auf der Grundlage von zwei Versuchen eine mittlere mitwirkende Plattenbreite von 33,8 cm und bei einem doppelt so großen Nagelabstand von 50 cm eine mittlere mitwirkende Plattenbreite von 29,1 cm.

Im Jahr 2001 veröffentlichten Blaß/Krämer einen Forschungsbericht [13] über Lastverteilung, Tragwirkung und Verformungsverhalten von Brettstapelelementen. Dieser Forschungsbericht bildet eine wesentliche Grundlage dieser Arbeit.

2.4 Verstärkungsmaßnahmen im Bereich gestoßener Lamellen

Brettstapelelemente mit gestoßenen Lamellen besitzen signifikant geringere Steifigkeitswerte als Brettstapelelemente mit ungestoßenen Lamellen. Um den Steifigkeitsverlust infolge gestoßener Lamellen zu verringern, wurden von verschiedener Seite Verstärkungsmaßnahmen vorgeschlagen.

Als Lamellenstrang werden diejenigen Lamellen definiert, die in Längsrichtung hintereinander liegen und deren addierte Länge derjenigen des Brettstapelelementes entspricht. Läuft eine Lamelle über die gesamte Länge des Brettstapelelementes, so sind die Begriffe Lamellenstrang und Lamelle identisch. Lamellenstränge kommen nur in Brettstapelelementen mit gestoßenen Lamellen vor.

2.4.1. Verstärkungsvarianten

Die wirksamste Verstärkungsmaßnahme ist die Vermeidung von Stößen, die durch die Verwendung keilgezinkter Lamellen erreicht werden könnte. Keilgezinkte Lamellen müssen künstlich getrocknet und nach dem Keilzinken gehobelt oder wenigstens egalisiert werden. Dies führt zu deutlich höheren Materialkosten im Vergleich zur ungehobelten Rohware. Wegen der höheren Materialkosten werden keilgezinkte Lamellen praktisch nicht für die Brettstapelbauweise verwendet, einzige Ausnahme bilden Brettstapelelemente mit Sichtqualität.

Eine wirksame Variante der Stoßverstärkung ist das lokale Verkleben der Lamellen-seitenflächen. Hierbei werden die Lamellen im Stoßbereich auf einer Länge von ca. 50 cm miteinander verklebt, so dass eine starre Kopplung in Längsrichtung erreicht wird und Biegemomente im Stoß übertragen werden können. Das Verkleben der Lamellen hat den großen Nachteil, dass der Hersteller mindestens die Leimgenehmigung C nach DIN 1052 [30] besitzen muss, um solche Bauteile verkleben zu dürfen. Weiterhin müssten Brettstapelelemente mit im Stoßbereich verklebten Lamellen in klimatisierten Räumen verpresst werden, wodurch die Herstellung solcher Brettstapelelemente infolge des zeitlichen und technischen Mehraufwandes wesentlich verteuert werden würde.

Der häufigste Vorschlag für eine Verstärkungsmaßnahme ist die verstärkte Stoßnagelung, bei der im Bereich des Stoßes die Nagelabstände verringert werden [29], [31]. Alle anderen Verstärkungsmaßnahmen von Stoßbereichen, wie z.B. das Einpressen von Nagelplatten oder das Einbringen von Buchen- oder Aluminiumdübeln in das Hirnholz der Lamellen ist so arbeits- und kostenintensiv, dass sie weder in der Praxis noch in dieser Arbeit weiter in Betracht gezogen werden. In den Veröffentlichungen [29] und [31] finden sich Gleichungen zur Bestimmung der maximalen Beanspruchung der Nägel auf Abscheren im Stoßbereich. Diese Gleichungen sind allerdings nur schwer anwendbar, da die Nagelbeanspruchung über die Momenten- und Querkraftbeanspruchung der einzelnen Lamellen berechnet wird und diese insbesondere bei Brettstapelelementen mit gestoßenen Lamellen als nicht bekannt vorausgesetzt werden muss.

Die Erhöhung der wirksamen Biegesteifigkeit von Brettstapelelementen mit gestoßenen Lamellen und einer verstärkten Stoßnagelung ist im Vergleich zu Brettstapelelementen mit gestoßenen Lamellen ohne verstärkte Stoßnagelung gering. Die Nägel in einem Brettstapelelement dienen zur Übertragung von Schubkräften in den Scherfugen zwischen den Lamellen. Werden die Nägel zur Übertragung von Biegemomenten herangezogen, wirken die Nägel rechts und links vom Stoß mechanisch wie eine Drehfeder. Der Schwerpunkt der Drehfeder liegt im geometrischen Schwerpunkt des Nagelbildes. Über den Ansatz der Drehfedern kann eine wirksame Biegesteifigkeit für Lamellenstränge mit gestoßenen Lamellen berechnet werden. Die wirksame Biegesteifigkeit von Lamellensträngen mit gestoßenen Lamellen hängt signifikant von der Drehfedersteifigkeit ab. Die Drehfedersteifigkeit einer Verbindung mit stiftförmigen Verbindungsmitteln kann mit Gleichung (2- 14) berechnet werden.

$$C_D = C \cdot I_P = C \cdot \sum_{i=1}^n r_i^2 \quad (2- 14)$$

Hierin bedeuten:

C_D	Drehfedersteifigkeit [Nmm]
I_P	Polares Flächenmoment 2. Grades der Verbindungsmittel [mm^2]
C	Verschiebungsmodul der Verbindungsmittel [N/mm]
r	Abstand der Verbindungsmittel zum Schwerpunkt des Verbindungsmittelbildes [mm]

In Bild 2- 4 ist die Lage des Schwerpunktes eines Nagelbildes einer gestoßenen Lamelle mit und ohne verstärkte Stoßnagelung dargestellt. Infolge der verdichteten Nagelung im Stoßbereich wandert der Schwerpunkt des Nagelbildes zum Stoß hin. Dieses mechanische Modell gilt nur für die vereinfachte Annahme, dass die Verbindungsmittel jeweils zweiwertig unverschieblich gelagert sind.

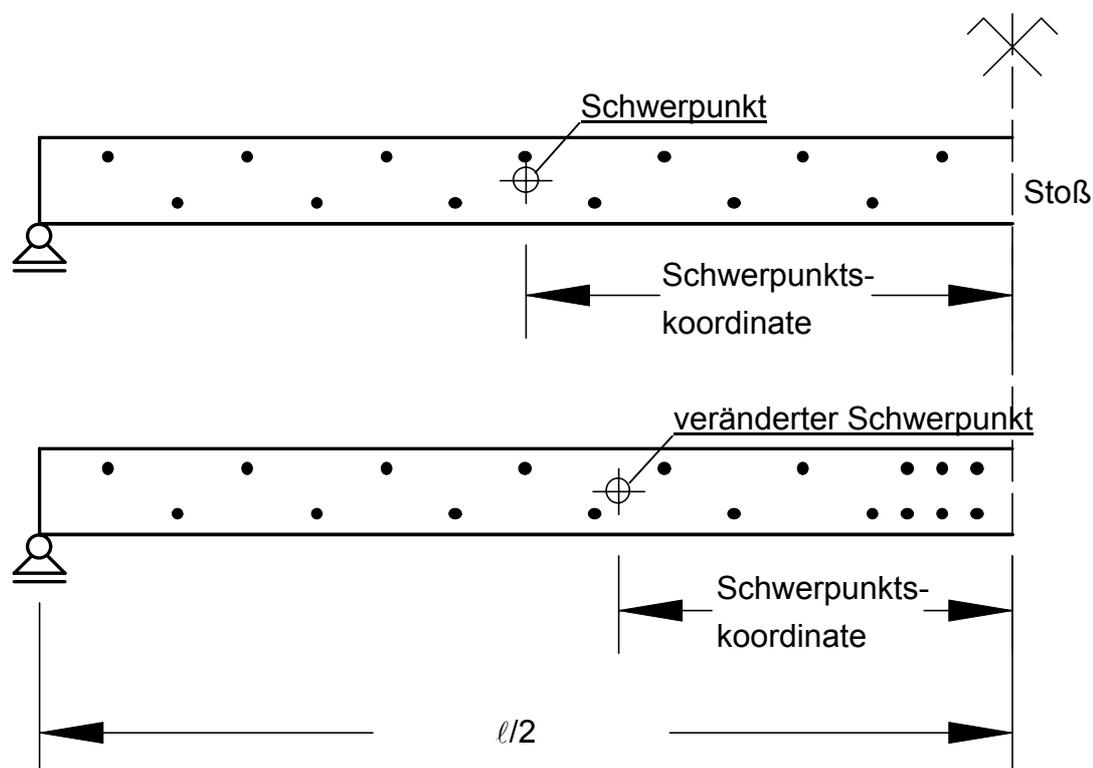


Bild 2- 4 Lamellenstrang mit und ohne verstärkter Stoßnagelung

Durch die größere Anzahl der Nägel und durch die veränderte Lage des Schwerpunktes des Verbindungsmittelbildes erhöht sich die Drehfedersteifigkeit des Lamellenstranges mit verstärkter Stoßnagelung.

Die Steifigkeitsunterschiede der Drehfedern mit und ohne verstärkter Stoßnagelung hängen von der Anzahl und Anordnung der Nägel ab. Für einen zentrisch gestoßenen Lamellenstrang mit der Länge $\ell = 4,20$ m und einem Nagelabstand von $0,15$ m beträgt das polare Flächenmoment 2. Grades des Verbindungsmittelbildes (keine verstärkte Stoßnagelung)

$$\sum_{i=1}^n r_i^2 = 4,13 \times 10^6 \text{ mm}^2 .$$

Werden im Stoßbereich z.B. die Nagelabstände halbiert (vgl. Bild 2- 4) beträgt das polare Flächenmoment 2. Grades des Verbindungsmittelbildes

$$\sum_{i=1}^n r_i^2 = 7,18 \times 10^6 \text{ mm}^2 .$$

Die Gesamt-Drehfedersteifigkeit des Lamellenstranges kann in Anlehnung an eine in Reihe geschaltete Feder durch eine Ersatzdrehfedersteifigkeit C_D^* angegeben werden:

$$C_D^* = \frac{C_{D,li} \cdot C_{D,re}}{C_{D,li} + C_{D,re}} \text{ [Nmm]} \quad (2- 15)$$

Hierin bedeuten:

$C_{D, li}$ Drehfedersteifigkeit links vom Stoß [Nmm]

$C_{D, re}$ Drehfedersteifigkeit rechts vom Stoß [Nmm]

Die wirksame Biegesteifigkeit EI_{ef} eines Lamellenstranges mit gestoßenen Lamellen kann mit Hilfe des Prinzips der virtuellen Kräfte berechnet werden. Für einen durch eine zentrische Einzellast beanspruchten gestoßenen Lamellenstrang berechnet sich die wirksame Biegesteifigkeit EI_{ef} zu

$$EI_{ef} = \frac{\ell}{\frac{\ell}{EI} + \frac{3}{C_D^*}} \quad (2- 16)$$

Hierin bedeuten:

ℓ Stützweite des Lamellenstranges [mm]

EI Biegesteifigkeit der Lamelle [Nmm²]

C_D^* Ersatzdrehfedersteifigkeit [Nmm]

Für einen Lamellenstrang mit den Querschnittsmaßen $t/h = 35/160$ mm, einem mittleren Elastizitätsmodul von 12500 N/mm^2 und den oben getroffenen Annahmen berechnet sich die wirksame Biegesteifigkeit EI_{ef} ohne verstärkte Stoßnagelung zu

$$EI_{ef, \text{ nicht verstärkt}} = 2,84 \times 10^9 \text{ Nmm}^2 .$$

Für den gleichen Lamellenstrang wie oben angeführt berechnet sich die wirksame Biegesteifigkeit EI_{ef} mit verstärkter Stoßnagelung zu

$$EI_{ef, \text{ verstärkt}} = 4,86 \times 10^9 \text{ Nmm}^2 .$$

Eine Lamelle mit den obigen Querschnittsmaßen und dem gleichen mittleren Elastizitätsmodul weist eine Biegesteifigkeit von $EI = 1,49 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2$ auf.

Brettstapelelemente sind hochgradig statisch überbestimmte Systeme. In statisch überbestimmten Systemen ziehen steife Tragelemente Lasten an, weiche Tragelemente werden durch die steiferen Tragelemente unterstützt. Durch diesen Effekt wird in einem Brettstapelelement mit gestoßenen und ungestoßenen Lamellen ein Großteil der Biegemomente durch die sehr steifen ungestoßenen Lamellen abgetragen, die benachbarten weichen gestoßenen Lamellenstränge beteiligen sich nur unwesentlich an der Abtragung der Biegemomente. Bezogen auf die Biegesteifigkeit einer ungestoßenen Lamelle sind die wirksamen Biegesteifigkeiten der Lamellenstränge mit und ohne verstärkte Stoßnagelung sehr gering. Die Biegemomente eines Brettstapelelementes werden primär von den ungestoßenen Lamellen abgetragen.

Dieser Sachverhalt wird auch durch Versuchsergebnisse bestätigt [13].

2.4.2. Vorversuche mit verstärkter Stoßnagelung

Um den Einfluss einer verstärkten Stoßnagelung auf das Tragverhalten von Brettstapelelementen praktisch zu untersuchen, wurden Versuche durchgeführt. Die Prüfkörper bestanden aus einer durchlaufenden Mittellamelle und jeweils mittig gestoßenen Seitenlamellen, wobei im Stoßbereich ein 3 cm weiter Spalt angeordnet wurde. Der Nagelabstand a_1 betrug einheitlich 15 cm. Als Verbindungsmittel wurden glattschaftige beharzte Nägel (3,8 x 121 [mm]) verwendet. Für folgende Stoßvarianten wurden jeweils fünf Versuche durchgeführt:

- a) kontinuierliche Nagelung; keine Stoßverstärkung (kV)
- b) 4 Nägel mit einem Abstand untereinander von 15 cm
- c) 8 Nägel mit einem Abstand untereinander von 15 cm
- d) 8 Nägel mit einem Abstand untereinander von 7,5 cm

Die einzelnen Stoßvarianten sind in Bild 2- 5 dargestellt.

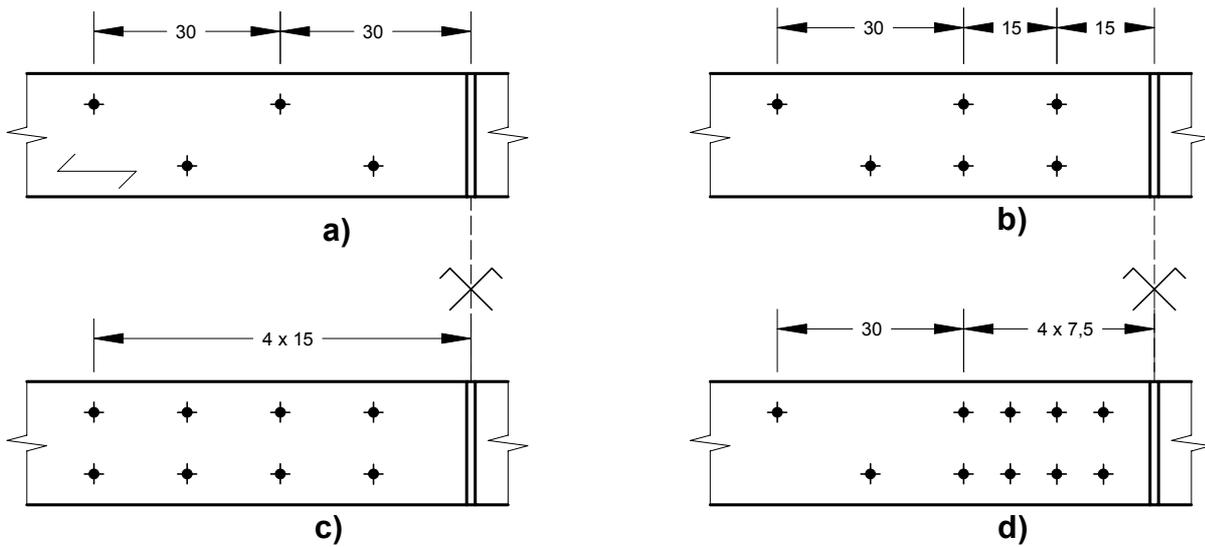


Bild 2- 5 Stoßvarianten der Vorversuche

In Bild 2- 6 sind die vertikalen Verformungen der Prüfkörper der vier Versuchsreihen unter einem Biegemoment von 2,4 kNm über die mittlere Rohdichte der Lamellen abgetragen. Die Prüfkörper der vier Versuchsreihen zeigten keine signifikant unterschiedlichen wirksamen Biegesteifigkeiten. Der Einfluss von verstärkten Stoßnagelungen auf die wirksame Biegesteifigkeit von Brettstapelelementen ist als vernachlässigbar klein anzusehen und wird daher im Weiteren nicht mehr betrachtet.

Die Herstellung, Durchführung und Auswertung der Versuche ist in [13] ausführlich beschrieben.

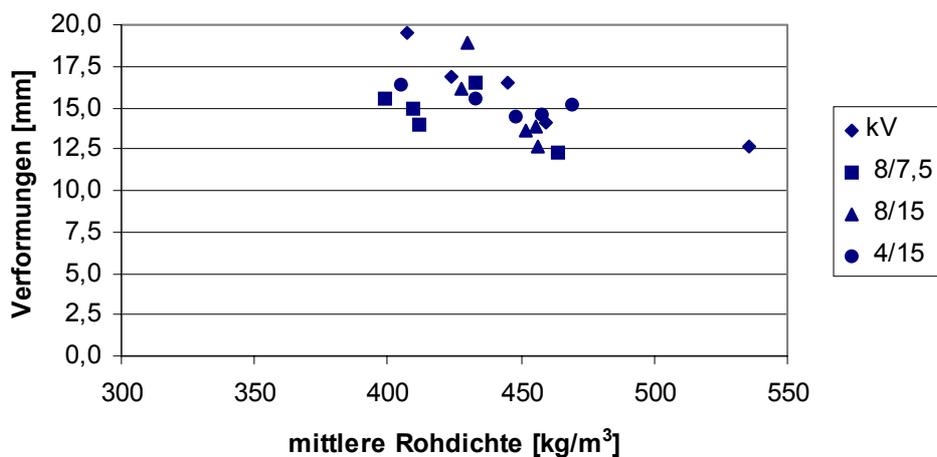


Bild 2- 6 Vertikale Verformungen, Stoßvarianten

3. Simulation von Bauteilen

Beanspruchungen und Verformungen von stabförmigen oder plattenförmigen Bauteilen können grundsätzlich auf zwei unterschiedliche Arten ermittelt werden.

Beanspruchungen und Verformungen von Bauteilen können analytisch bestimmt werden. Die Schnittgrößen in Bauteilen, wie z.B. Normalkräfte, Querkräfte und Biegemomente werden mit Hilfe der Statik bestimmt [33]. Um die Schnittgrößen und die daraus resultierenden Beanspruchungen bestimmen zu können, bedarf es bei statisch überbestimmten Systemen einem weiteren Teil der Physik, der Elastostatik [34]. Eine analytische Herleitung von Bemessungsgleichungen für Brettstapelelemente als plattenförmige Bauteile ist jedoch kaum möglich. Durch den Aufbau der Brettstapelelemente - hochkant nebeneinander stehende, fortlaufend miteinander vernagelte Lamellen - ist die Biegesteifigkeit quer zur Spannrichtung kaum zu bestimmen. Wolf/Schäfer [35] geben eine wirksame Biegesteifigkeit quer zur Spannrichtung von Brettstapelelementen an. Diese hängt im Wesentlichen vom Auszieh Widerstand der Verbindungsmittel und deren Abständen untereinander ab. Aus Kostengründen finden bei der Herstellung von genagelten Brettstapelelementen meist glattschaftige Nägel nach DIN 1143 [36] Verwendung. Glattschaftige Nägel weisen nur einen geringen Widerstand gegen Herausziehen auf, so dass die wirksame Biegesteifigkeit quer zur Lamellenhaupttrichtung vernachlässigbar ist. Aus diesem Grund werden Brettstapelelemente oft als einachsig gespannte Platten angesehen.

Bei Brettstapelelementen mit gestoßenen Lamellen wird die wirksame Biegesteifigkeit in Längsrichtung von der Anzahl der Stöße, der Lage der Stöße und der Verbindungsmittel beeinflusst. Die Verformungen und Beanspruchungen von Brettstapelelementen mit gestoßenen Lamellen hängen somit auch von der Art der Verbindungsmittel, vom Last-Verschiebungs-Verhalten der Verbindungen, vom Verbindungsmittelabstand untereinander und von den Materialeigenschaften der Lamellen ab.

Da Brettstapelelemente in Querrichtung keine nennenswerte Biegesteifigkeit aufweisen und die wirksame Biegesteifigkeit in Längsrichtung (diskontinuierliches System) von vielen Randbedingungen abhängig ist, ist für Brettstapelelemente unter plattenförmiger Beanspruchung eine analytische Vorgehensweise zur Bestimmung der Beanspruchungen und Verformungen kaum möglich.

Eine weitere Möglichkeit, Bemessungsgleichungen für Bauteile abzuleiten, ist, diese am Computer zu simulieren. Der Begriff „Simulation“ wird nach der VDI-Richtlinie 3633 wie folgt definiert [79]:

„Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“

Simulationen werden im Bereich des konstruktiven Ingenieurbaus üblicherweise mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt. Die FEM-Simulation eignet sich zum Nachbilden der physikalischen Eigenschaften der Baustoffe und der mechanischen Bindungen der Bauteile untereinander. So können Belastungen am Computer simuliert und die hieraus resultierenden Beanspruchungen der Bauteile bestimmt werden. Bei den Simulationen können die geometrischen und physikalischen Eigenschaften der Bauteile in realistischen Bereichen variiert werden. Auf diese Weise können in vergleichbar kurzer Zeit sehr viele Tragsysteme berechnet und ausgewertet werden, um daraus statistisch fundierte Bemessungsgleichungen abzuleiten.

Bei der Brettstapelbauweise wird der natürlich gewachsene Baustoff Holz verwendet, der stark streuende Materialeigenschaften aufweist. Die Kenntnis der Verteilungsfunktionen der Materialeigenschaften und der zugehörigen Zahlenwerte innerhalb der Lamellen und zwischen unterschiedlichen Lamellen ist für die realistische Simulation von Brettstapelelementen notwendig. Neben den streuenden Materialeigenschaften der Lamellen stellen die geometrischen Größen der Lamellen/Brettstapelelemente, die Art und die Anordnung der Verbindungsmittel und die Anordnung der Stöße innerhalb der Brettstapelelemente signifikante Einflussparameter dar. Die Parameter, mit denen das Last-Verformungs-Verhalten einer Holz-Holz-Nagelverbindung beschrieben werden kann, unterliegen ähnlich großen Streuungen wie die Materialeigenschaften der Lamellen. Für eine realistische Simulation der Brettstapelelemente müssen daher auch die Verteilungsfunktionen der Parameter zur Beschreibung des Tragverhaltens einer Holz-Holz-Nagelverbindung ermittelt und in die Simulationen einbezogen werden.

Für eine wirklichkeitsnahe Simulation werden die o.g. Einflussparameter unter Berücksichtigung ihrer Autokorrelation in realistischen Grenzen den statistischen Verteilungsfunktionen zufällig entnommen und den Komponenten eines mechanischen Modells zugewiesen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens [13] wurden die Simulationsrechnungen auf der Annahme eines linear elastischen Last-Verformungs-Verhaltens der Nagelverbindungen und einem linear elastischen Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Lamellen durchgeführt. Die linear elastischen Steifigkeitseigenschaften der Nagelverbindungen wurden der E DIN 1052 [46] für nicht vorgebohrte Nagelverbindungen entnommen (vgl. Abschnitt 3.3.2). Die Simulation von Brettstapelelementen mit linear elastischem Last-Verformungs-Verhalten der Nagelverbindungen liefert nur bedingt realitätsnahe Rechenergebnisse, da die Verschiebungsmoduln von Nagelverbindungen [46] nur Mittelwerte von Sekanten an Last-Verschiebungs-Kurven von Nagelverbindungen darstellen. Für Brettstapelelemente, die durch Einzellasten beansprucht werden, wurden von Krämer Simulationen mit nichtlinearem Last-Verformungs-Verhalten der Nagelverbindungen durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.3.3). Dies erschien sinnvoll, da insbesondere bei Brettstapelelementen mit gestoßenen Lamellen unter zentrischen Einzellasten die Nageltragfähigkeit ein Versagenskriterium darstellen kann. Mit Hilfe der Simulationen mit dem nichtlinearem Last-Verformungs-Verhalten der Nagelverbindungen konnte das Trag- und Verformungs-Verhalten von Brettstapelelementen unter zentrischen Einzellasten im Bereich der Lasteinleitung realitätsnah abgebildet und ausgewertet werden. Neben der genaueren Untersuchung des Trag-Verformungs-Verhaltens von Brettstapelelementen unter zentrischer Einzellast mit Hilfe der Simulationen mit dem nichtlinearen Last-Verformungs-Verhalten der Nagelverbindungen, konnten auch Näherungsgleichungen zur Berechnung von Proportionalitätslasten hergeleitet werden. Die Proportionalitätslast stellt eine Grenzlast (zentrische Eintellast) auf ein Brettstapelelement dar. Nach Überschreiten der Proportionalitätslast stellen sich im Brettstapelelement nichtlineare Effekte ein, so dass die im Abschnitt 7 dargestellten Bemessungsgleichungen für Brettstapelelemente keine Gültigkeit mehr haben.

3.1 Materialkennwerte der simulierten Lamellen

Die Simulation der Lamellen beruht auf den Arbeiten von Görlacher [37] und Colling [38]. In [37] und [38] werden Programme zur Simulation von Brettschichtholzlamellen unter Berücksichtigung relevanter Einflussparameter angegeben. Bei der virtuellen Nachbildung der Lamellen wird die Autokorrelation der Holzeigenschaften, die aus den Wuchsunregelmäßigkeiten der Bäume resultiert, sowohl innerhalb der Lamellen als auch zwischen unterschiedlichen Lamellen berücksichtigt. Es wird vereinfachend angenommen, dass die Eigenschaften der Lamellen innerhalb eines Bereichs von 150 mm konstant sind. Die simulierten Lamellen werden deshalb in je 150 mm lange

Segmente unterteilt, denen Holzeigenschaften, wie z.B. die Ästigkeit oder der Elastizitätsmodul in Faserrichtung zugewiesen werden. Die Lamellen werden mit einer Einheitslänge von 4,5 m simuliert; dies entspricht einer Standardlänge bei der Herstellung von Brettschichtholz [39]. Messungen an 936 Lamellen, die mindestens der Sortierklasse S 10 nach DIN 4074-1 entsprachen, zeigten, dass die Simulationen realistische Ergebnisse lieferten [13] (siehe Abschnitt 3.1.3).

3.1.1. Ästigkeit

Die signifikanteste Einflussgröße auf die Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften eines Lamellensegmentes ist die Ästigkeit. Als Eingangsgröße für die Simulation ist die Ästigkeit als Verhältnis der projizierten Astflächensumme zum Lamellenquerschnitt definiert. Zur Berechnung des KAR-Wertes (Knot-Area-Ratio) [40] werden alle Äste innerhalb eines 150 mm langen Lamellensegmentes herangezogen (vgl. Bild 3- 1).

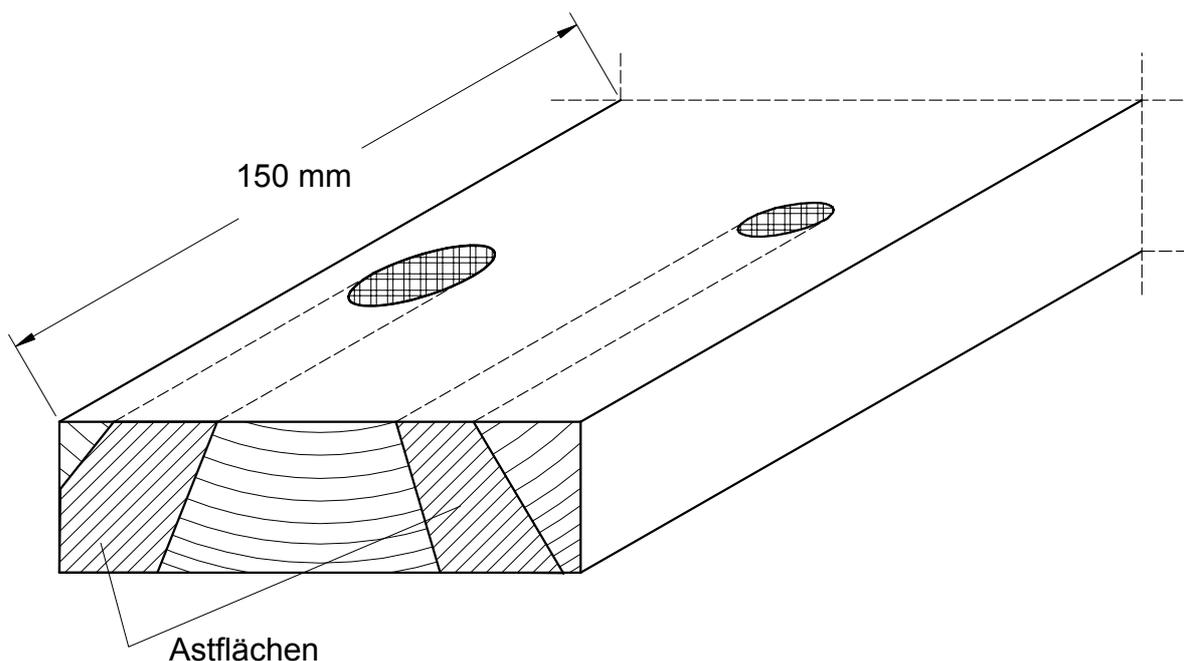


Bild 3- 1 Definition des KAR- Wertes

Umfangreiche Untersuchungen über die Ästigkeit von Lamellen für Brettschichtholzträger wurden von Colling und Dinort [41] veröffentlicht. In diesen Untersuchungen wurde der Einfluss der Lamellenbreite, des Wuchsgebietes und der Sortierklassen auf die Ästigkeit der Lamellen untersucht. Es wurde festgestellt, dass die Lamellenbreite und das Wuchsgebiet des Holzes keinen signifikanten Einfluss auf die Ästig-

keit der Lamellen hat. Die Sortierklassen S 10 und S 13 unterscheiden sich nur geringfügig in der für die Lamelle charakteristischen Astgröße.

Als Eingangsgröße für das Simulationsprogramm für die Lamellen dient der maximale KAR-Wert der Lamelle. Über die maximalen KAR-Werte und deren Auftretenshäufigkeit liegen repräsentative Untersuchungen von Görlacher und Colling [42] vor. Insgesamt wurden in den Untersuchungen von 1434 Lamellen die maximalen KAR-Werte und deren Häufigkeitsverteilungen ermittelt. Der Mittelwert der maximalen KAR-Werte der Lamellen ergab sich zu 0,275 [/], die Standardabweichung zu 0,10 [/] und der Größtwert ergab 0,683 [/]. Diese statistischen Werte stimmen gut mit den Untersuchungen von Blaß/Krämer [13] überein, in denen die Materialeigenschaften und die maximale Ästigkeit von 936 Lamellen bestimmt wurde. Es ergab sich ein Mittelwert des KAR-Wertes von 0,234 [/] mit einer Standardabweichung von 0,113 [/] und ein Größtwert von 0,627 [/]. In beiden Fällen wurden Lamellen untersucht, die nach visueller Sortierung mindestens in die Sortierklasse S 10 nach DIN 4074 eingestuft werden konnten.

Bei der Generierung einer virtuellen Lamelle wird aus der Verteilung der maximalen KAR-Werte ein Wert zufällig bestimmt. Ausgehend vom maximalen KAR-Wert(i) der Lamelle wird der nächst kleinere KAR-Wert(i+1) als Produkt des KAR-Wertes(i) mit einem Faktor K_i berechnet. Der Faktor K_i kann beliebige Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Die Häufigkeitsverteilung der K_i -Werte wurde von Görlacher aus 456 Lamellen ermittelt [37]. Die nächst kleineren KAR-Werte werden analog mit dem zuvor berechneten KAR-Wert berechnet, bis die Grenze von $KAR < 0,05$ erreicht ist. Nachdem alle KAR-Werte der Segmente der virtuellen Lamelle berechnet sind, werden diese den Segmenten zufällig zugewiesen.

In Bild 3- 2 ist die Häufigkeitsverteilung der KAR-Werte von insgesamt 9000 simulierten Lamellenabschnitten und eine angepasste Dichtefunktion dargestellt. Zur Anpassung der Häufigkeitsverteilung der KAR-Werte wurde eine dreiparametrische Log-Normalverteilung mit folgenden Parametern bestimmt:

x_0	linksseitiger Grenzwert	= -0,0125 [/]
μ	Mittelwert	= -3,45 [/]
σ	Standardabweichung	= 1,23 [/]

Die Dichtefunktion einer Log-Normalverteilung kann nach [61] angegeben werden zu:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot (x - x_0) \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln(x - x_0) - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (3-1)$$

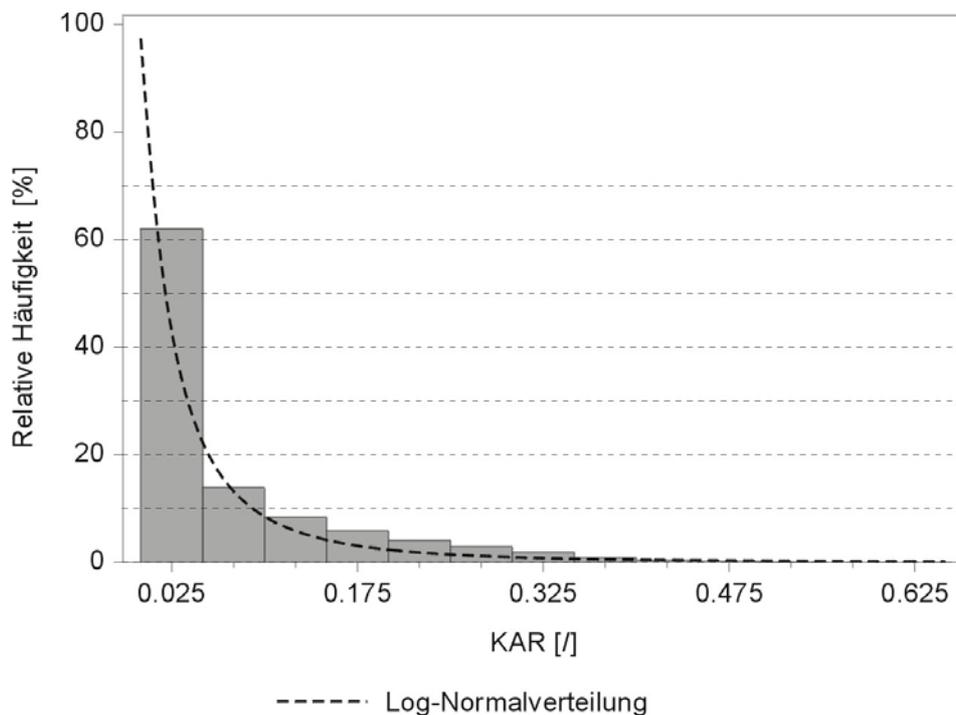


Bild 3- 2 Häufigkeitsverteilung der KAR-Werte von 9000 simulierten Lamellenabschnitten.

3.1.2. Rohdichte

Die Verteilung der Rohdichte von Lamellen für die Brettschichtholzherstellung wurde von Glos untersucht und veröffentlicht [43]. Der Mittelwert der Darr-Rohdichte der Lamellen lag bei 430 kg/m^3 mit einer Standardabweichung von 50 kg/m^3 . Diese Werte wurden von Görlacher und Colling bestätigt und dienten als Grundlage für die Simulation. Aus dieser Verteilung wird für jede Lamelle eine beliebige Darr-Rohdichte ermittelt und der Lamelle zugewiesen. Die Darr-Rohdichte wird über die ganze Lamelle als konstant angenommen. Diese Vereinfachung erscheint gerechtfertigt, da bei den Simulationsrechnungen der Einfluss der Streuungen der Elastizitätsmoduln innerhalb der Lamelle den Einfluss der Streuungen der Rohdichte deutlich überragt.

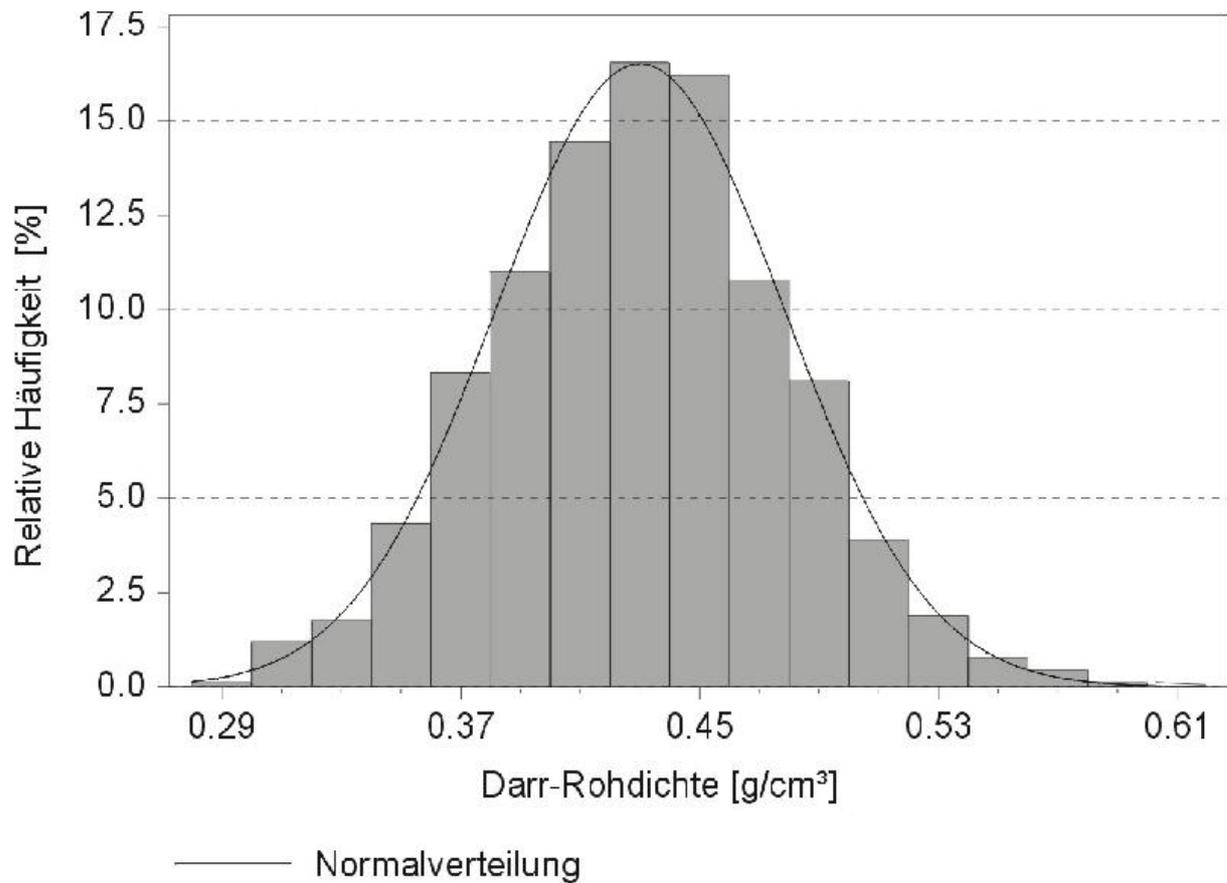


Bild 3- 3 Häufigkeitsverteilung der mittleren Darr-Rohdichten von 900 simulierten Lamellen

Für die Anpassung der Häufigkeitsverteilung der mittleren Darr-Rohdichten wurde die Normalverteilung angewandt. Die Normalverteilung kann entsprechend Gleichung (3- 2) angegeben werden mit [67]

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad (3- 2)$$

Normalverteilung:

μ	Mittelwert	= 0,430 g/cm ³
σ	Standardabweichung	= 0,0483 g/cm ³

Die mittleren Darr-Rohdichten der simulierten Lamellen werden mit Gleichung (3- 3) näherungsweise in Rohdichten mit entsprechender Holzfeuchte umgerechnet [20].

$$\rho_u = \rho_0 \cdot \frac{100 + u}{100 + 0,85 \cdot \rho_0 \cdot u} \quad (3- 3)$$

Hierin bedeuten:

ρ_0	Darr-Rohdichte in [g/cm ³]
u	Holzfeuchtegehalt in [%]
ρ_u	Rohdichte bei der Holzfeuchte u in [g/cm ³]

3.1.3. Elastizitätsmodul

Nachdem für jedes 150 mm lange Segment der Lamelle die Ästigkeit und die Darrrohndichte bekannt sind, werden aus diesen Werten über Regressionsgleichungen nach [37] und [38] die Elastizitätsmoduln parallel zur Faserrichtung des Holzes berechnet und den Segmenten zugewiesen. Da bei Segmenten mit gleicher Ästigkeit und gleicher Darrrohndichte unterschiedliche Steifigkeitswerte auftreten können, wird bei der Zuweisung der Segment-Elastizitätsmoduln eine verbleibende Reststreuung berücksichtigt. Der mittlere Elastizitätsmodul E_{Lamelle} einer aus 30 Segmenten bestehenden simulierten Lamelle mit variierenden Steifigkeitseigenschaften kann in Anlehnung an eine in Reihe geschaltete Feder mit Gleichung (3- 4) berechnet werden [38] :

$$E_{\text{Lamelle}} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{E_i}} \quad (3- 4)$$

Hierin bedeuten:

E_i	Segment-Elastizitätsmodul
N	Anzahl der Segmente

Über die mittleren Elastizitätsmoduln von Lamellen und deren Auftretenshäufigkeit liegen repräsentative Untersuchungen von Görlacher und Colling [42] vor. Auf der Grundlage einer Datenbasis von 2760 Lamellen ergab sich ein Mittelwert von 12800 N/mm^2 mit einer Standardabweichung von 2380 N/mm^2 . Glos und Burger geben in [44] den Mittelwert der Biege-Elastizitätsmoduln von 198 untersuchten Lamellen der Sortierklasse S 10 mit 13110 N/mm^2 an, wobei die Lamellen hochkant geprüft wurden. In einer früheren Veröffentlichung [45] geben Glos und Henrici den Mittelwert der Biege-Elastizitätsmoduln von 22 hochkant untersuchten Lamellen der Sortierklasse S 10 mit 11620 N/mm^2 bzw. mit 12950 N/mm^2 (Bestimmung des Elastizitätsmoduls nach ISO-Standard) an.

In Bild 3- 4 ist die Häufigkeitsverteilung der Elastizitätsmoduln von insgesamt 9000 simulierten Lamellenabschnitten zusammen mit der angepassten Dichtefunktion (Normalverteilung) dargestellt.

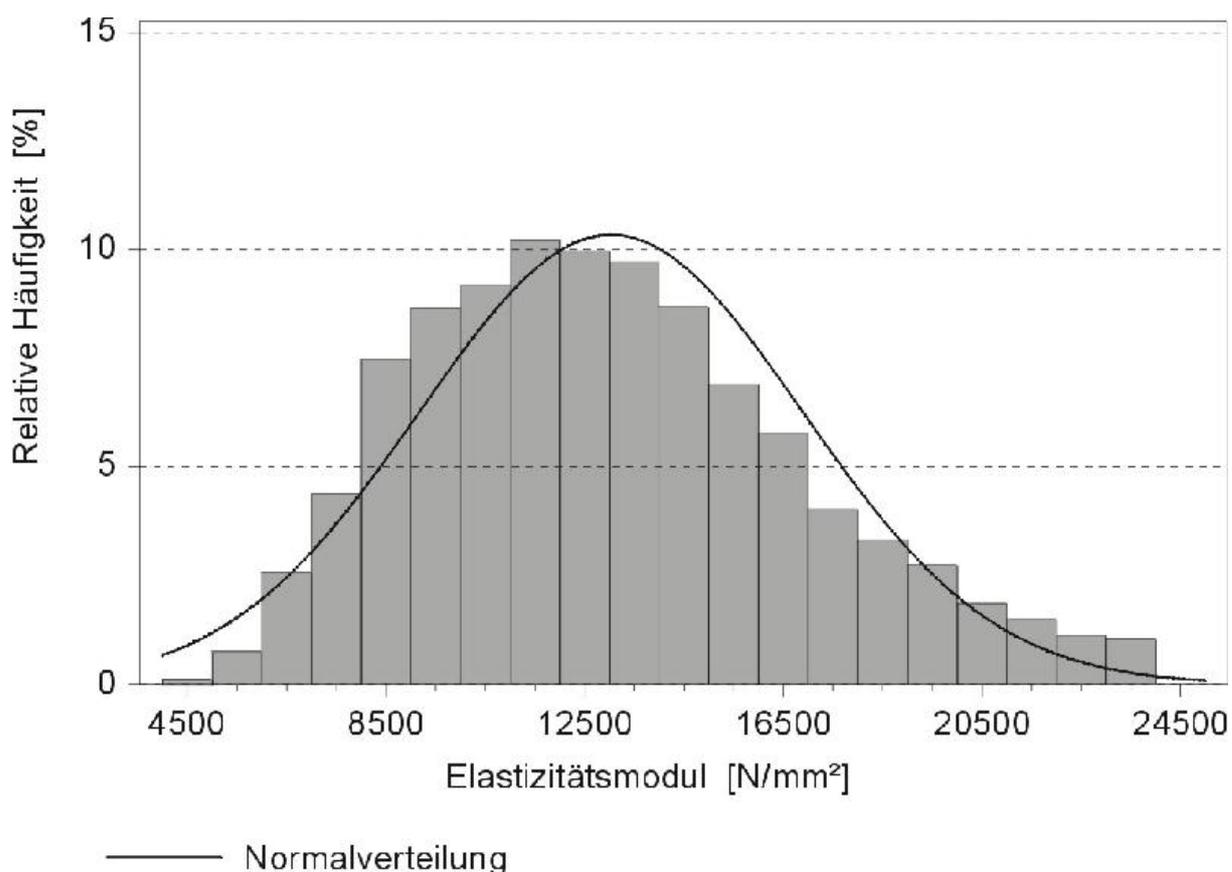


Bild 3- 4 Häufigkeitsverteilung der Elastizitätsmoduln von 9000 simulierten Lamellenabschnitten.

Bei der Anpassung der Häufigkeitsverteilung der 9000 simulierten Lamellenabschnitte ergaben sich folgende Parameter:

Normalverteilung:

- μ Mittelwert = 13034 N/mm²
- σ Standardabweichung = 3857 N/mm²

Bild 3- 5 zeigt zwei Simulationsbeispiele von Lamellen. Die vordere Säulenreihe bildet die Ästigkeit [I] der jeweils 30 Lamellensegmente, die hintere Säulenreihe bildet die entsprechenden Elastizitätsmoduln [N/mm²x10⁻⁵] ab. Für die erste Lamelle resultiert ein mittlerer Elastizitätsmodul von 10050 N/mm², für die zweite Lamelle ein mittlerer Elastizitätsmodul von 16900 N/mm².

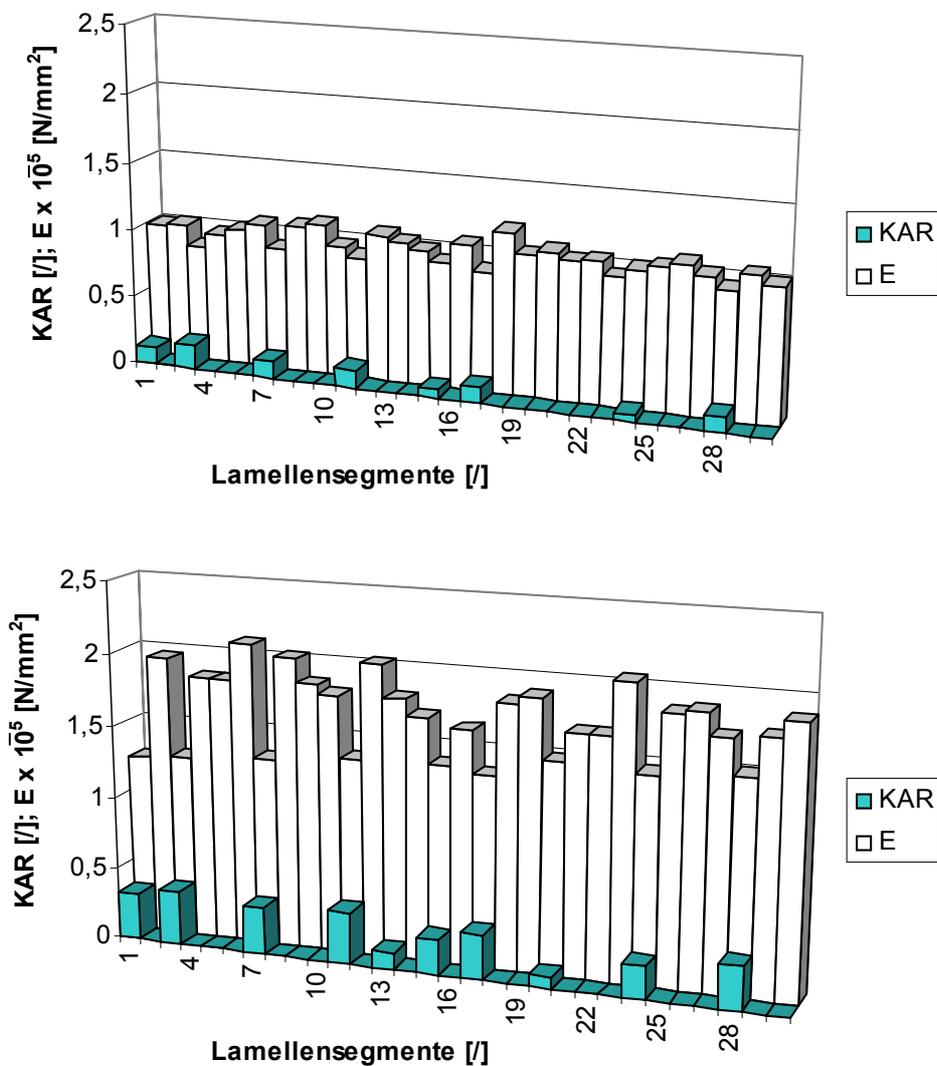


Bild 3- 5 Simulationsbeispiele von Lamellen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens [13] bestimmte Krämer die mittleren Elastizitätsmoduln von 936 Lamellen mittels Laufzeitmessungen von Längsschwingungen. Die Messungen ergaben einen Mittelwert des Elastizitätsmoduls von 12600 N/mm^2 und eine Standardabweichung von 2730 N/mm^2 . Um die Qualität der Simulationsprogramme und deren Ergebnisse zu überprüfen, wurden 936 Lamellen simuliert und deren mittlere Elastizitätsmoduln mit den Messergebnissen verglichen. Die Simulation von 936 Lamellen führte zu einem Mittelwert der mittleren Elastizitätsmoduln von 13300 N/mm^2 mit einer Standardabweichung von 3300 N/mm^2 .

In Bild 3- 6 ist zum Vergleich der mittlere Elastizitätsmodul über der mittlere Rohdichte der gemessenen und der simulierten Lamellen dargestellt (jeweils 936 Werte).

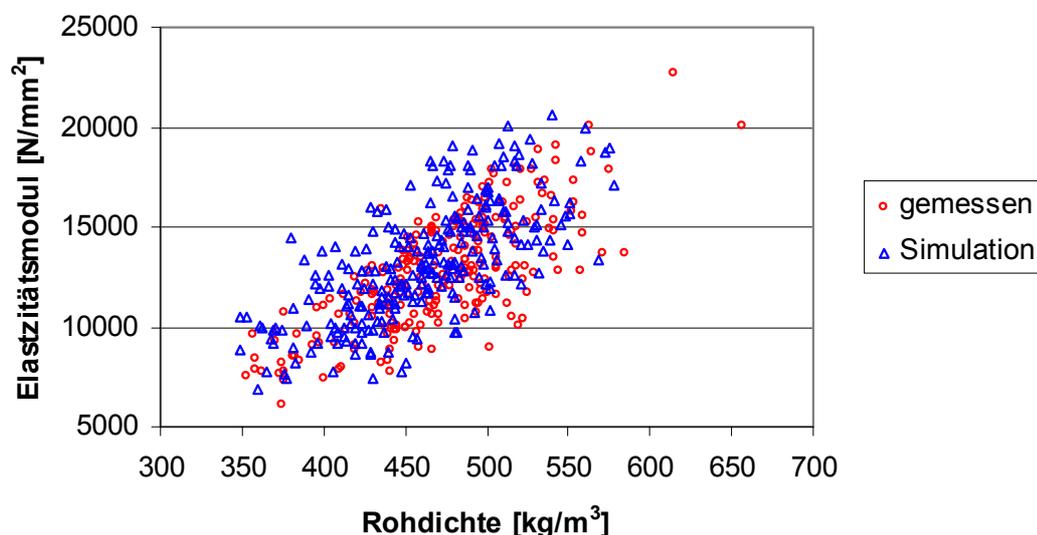


Bild 3- 6 Vergleich der gemessenen und der simulierten Materialeigenschaften von 936 Lamellen

3.2 Mechanisches Modell der Brettstapelelemente

Als mechanisches Modell für Brettstapelelemente wurde ein Trägerrost gewählt (vgl. Bild 3- 7). Die Träger in x-Richtung repräsentieren die Lamellen. Die Träger in y-Richtung sind biegesteif an die Lamellen angeschlossen und ihnen werden die Steifigkeitswerte der Verbindungsmittel zugewiesen. Alle Träger liegen in der X-Y-Ebene, d. h. die Höhenlage der Verbindungsmittel in der Lamelle wird nicht berücksichtigt. Dies scheint gerechtfertigt, da bei Voruntersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens [13] modifizierte Trägerrostmodelle untersucht wurden, bei denen die

Höhenlage (Z-Koordinate) der Nägel innerhalb der Lamelle berücksichtigt wurde. Vergleichsrechnungen zeigten, dass die Höhenlage der Verbindungsmittel keinen signifikanten Einfluss auf das Trag- und Verformungsverhalten von Brettstapelelementen ausübt.

Da in Nadelholz eingebettete, glattschaftige Nägel keine Torsionsmomente übertragen, wurden die Querträger des Trägerrostes torsionsweich generiert. Die mechanische Verbindung der Haupt- und Nebenträger des Trägerrostes fand planmäßig im Schwerpunkt der Hauptträger statt, so dass auch die Hauptträger keine Torsionsbeanspruchung erhalten. Vergleichsrechnungen mit und ohne Berücksichtigung der Torsionsträgheitsmomente für die Bauteile des Trägerrostes haben keine Unterschiede in den Berechnungsergebnissen gezeigt, deshalb wurden keine Torsionsträgheitsmomente bei den Simulationen verwendet.

Der seitliche Abstand der Lamellen untereinander entspricht der Lamellendicke t_{Lam} . Für die Simulationen der Brettstapelelemente wurden die Lamellen an einem Ende in X-, Y- und Z-Richtung unverschieblich gehalten. Am anderen Ende des Brettstapelelementes wurden die Lamellen nur in Y- und Z-Richtung gehalten, so dass eine Translation der Lamellen in X-Richtung möglich war.

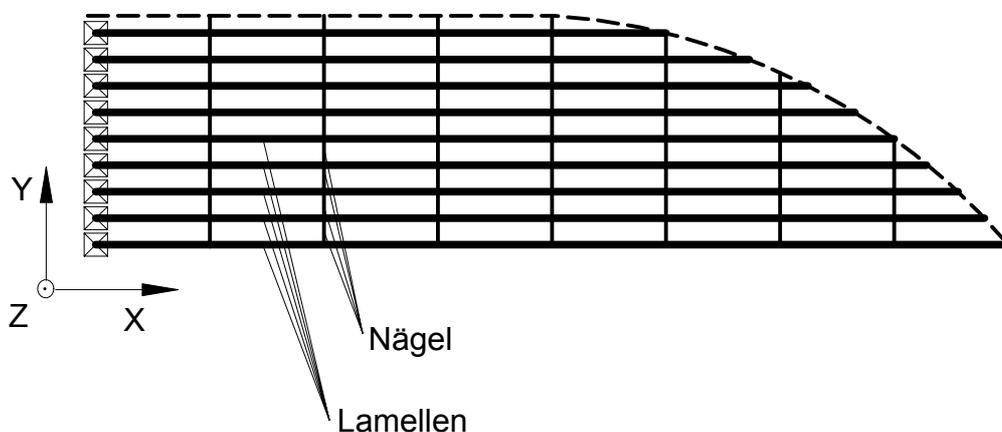


Bild 3- 7 Trägerrostmodell, Draufsicht

In Tabelle 3- 1 sind die Querschnitts- und die Materialwerte für die Längs- und Querträger des Trägerrostmodells zusammengestellt.

Tabelle 3- 1 Steifigkeitswerte der Bauteile des Trägerrostmodells

Längsträger (Lamellen, Rechteckquerschnitt)			
Elastizitätsmodul	Schubmodul	Flächenmoment 2. Grades	Querschnittsfläche
Abschnittsweise variabel (*)	Elastizitätsmodul / 16	$I = \frac{t \cdot h^3}{12}$	$A = t \cdot h$
Querträger (Nägel, Kreisquerschnitt)			
Elastizitätsmodul	Schubmodul	Flächenmoment 2. Grades	Querschnittsfläche
Berechnet nach Gleichung 3- 8	Elastizitätsmodul · 1000	$I = \frac{\pi \cdot d^3}{64}$	$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$

(*) siehe Abschnitt 3.1.3

In Tabelle 3- 1 bedeuten:

t / h Dicke / Höhe der Lamellen in [mm]

d Nageldurchmesser in [mm]

Die Verformungen der Nagelverbindungen wurden über die linear elastischen Steifigkeitseigenschaften von genagelten Holz-Holzverbindungen (Anfangsverschiebungsmodul) unter Verwendung eines wirksamen Elastizitätsmoduls berechnet (vgl. Abschnitt 3.3.2). Deshalb wurde der Einfluss der Schubverformung der Nägel auf die Gesamtverformung der Nagelverbindungen vernachlässigt, indem ein vergleichsweise hoher Schubmodul angesetzt wurde.

Für die Berechnung der Dehnsteifigkeit der Querträger (Nägel) wurde vereinfachend ein Elastizitätsmodul von $E = 210000 \text{ N/mm}^2$ angesetzt.

3.3 Verbindungsmittel

Im Rahmen des Forschungsvorhabens [13] wurden die Simulationen der Brettstapel-elemente mit einem linear elastischen Last-Verschiebungs-Verhalten der Nagelverbindungen durchgeführt. Den Querträgern des Trägerrostes, welche die Verbindungsmittel im Brettstapелеlement darstellen, wurden die Steifigkeitseigenschaften nach E DIN 1052 [46] für Nägel in nicht vorgebohrten Hölzern zugewiesen. Weiter-

führend wurden von Krämer im Rahmen von Forschungsarbeiten Brettstapelelemente nichtlinear simuliert, indem das wirklichkeitsnahe Trag- und Verformungsverhalten von genagelten Holz-Holz-Verbindungen in das Simulationsmodell aufgenommen wurde. Hierfür wurde das Trag- und Verformungsverhalten dieser Nagelverbindungen experimentell untersucht und die Ergebnisse in die Simulationen von Brettstapelelementen implementiert. Das Trag- und Verformungsverhalten der Lamellen wurde weiterhin linear elastisch angenommen.

3.3.1. Art und Anordnung der Nägel

Für die Simulation von Brettstapelelementen und für den Entwurf von Prüfkörpern wurden ausschließlich glattschaftige Nägel nach DIN 1143 [36] verwendet. Dies ist darin begründet, dass die Hersteller von genagelten Brettstapelelementen aus Kostengründen meist glattschaftige Nägel verwenden. Anfängliche Überlegungen, die Tragfähigkeit von Brettstapelelementen durch die Verwendung von Rillen- oder Schraubnägeln zu erhöhen, haben sich nicht durchgesetzt. Widmann und Meierhofer veröffentlichten in [47] Untersuchungen mit geschraubten Brettstapelelementen, die im Brückenbau Verwendung finden sollen. Die Lamellen wurden mittels hochfesten Schrauben verbunden die parallel zur Plattenebene und unter 45° zur Plattenebene eingedreht wurden. Die unter 45° eingedrehten Schrauben übertragen die Schubkräfte in den Scherfugen (Radlasten), die in zwei Ebenen horizontal eingedrehten Schrauben bewirken eine wirksame Biegesteifigkeit quer zur Lamellenlängsrichtung. Bisher wurden in der Schweiz zwei solcher Brücken mit Spannweiten von 3,5 m und 5,0 m gebaut.

Brettstapelelemente werden heute mittels Brettstapelnagelmaschinen hergestellt. Bei den Brettstapelnagelmaschinen erfolgt die Vernagelung der Lamellen mittels handelsüblichen Pressluftnaglern, die auf horizontalen Gleitschlitten montiert sind und sich parallel zur Lamelle bewegen. Infolge dieser Herstellungsweise hat sich das sogenannte Zick-Zack-Nagelbild durchgesetzt. Hierbei werden die Nägel höhen- und längenversetzt in die Lamellen eingeschossen, so dass ein Zick-Zack-Muster entsteht. Bei der darauffolgenden Lamelle wird das Nagelmuster höhenversetzt wiederholt. Das sich somit ergebende Nagelbild ist in Bild 3- 8 dargestellt. Sind die Nägel länger als die zweifache Lamellendicke, müssen die Nägel leicht schräg zur Flächennormalen eingeschossen werden, damit der darunter liegende durch eine Lamelle verdeckte Nagel nicht getroffen wird.

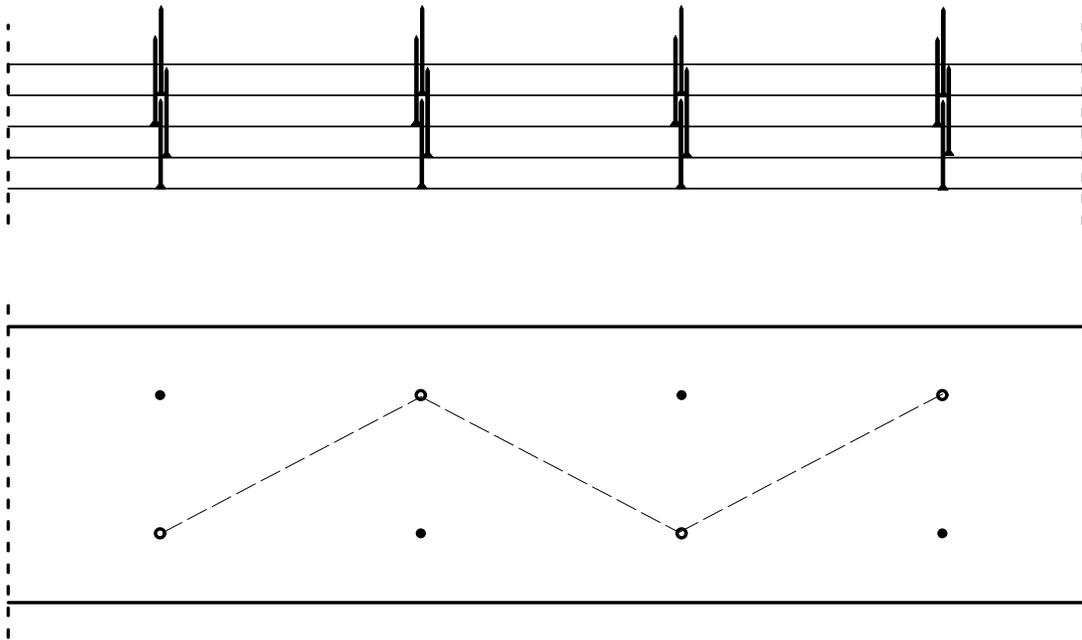


Bild 3- 8 Nagelbild im Brettstapel (Zick-Zack-Muster)

Für die Ausführung der Vernagelung der Lamellen untereinander gibt es keine einheitliche Regelung. Nach der Aussage von Brettstapelherstellern wird die Vernagelung der Lamellen üblicherweise als zweischnittige Nagelverbindung ausgeführt. Um eine zweischnittige Holz-Holz-Nagelverbindung herzustellen, muss eine Mindesteinschlagtiefe des Nagels in das dritte, der Nagelspitze zugewandte Holz eingehalten werden. Die Mindesteinschlagtiefe für eine kraftschlüssige Nagelverbindung wird nach E DIN 1052 [46] mit $8 d_N$ (d_N = Nageldurchmesser) angenommen.

Für die Simulationen wurden folgende Annahmen für die Verbindungsmittel getroffen:

- Verwendung von glattschaftigen Nägeln
- Nägel werden nach dem Zick-Zack-Muster eingeschossen
- Bei der Vernagelung der Lamellen handelt es sich um eine zweischnittige Nagelverbindung unter Einhaltung der Mindesteinschlagtiefen nach E DIN 1052

Mit den oben getroffenen Annahmen für die Simulation der Verbindungsmittel besteht eine Abhängigkeit des Nageldurchmessers d_N von der Lamellendicke t_{Lam} , da nach DIN 1143 [36] den Nageldurchmessern jeweils eine bzw. zwei Nagellängen zugeordnet sind. Bei einer Lamellendicke von $t_{Lam} = 30$ mm sollte z.B. die Nagelgröße 3,4 x 90 mm verwendet werden, da sich mit diesem Nagel eine Einschlagtiefe in der dritten Lamelle zu $30 \text{ mm} / 3,4 \text{ mm} = 8,8 d_N$ ergibt.

Im Rahmen von Versuchen zum Trag- und Verformungsverhalten von Brettstapелеlementen [13] wurde ein Prüfkörper mit leicht über die dritte Lamelle hinausstehenden Nägeln hergestellt. Ein weiterer Prüfkörper wurde mit Nägeln hergestellt, deren Länge geringfügig kleiner als die dreifache Lamellendicke war. Beide Prüfkörper zeigten keine signifikanten Steifigkeitsunterschiede im Vergleich zu den Prüfkörpern, die unter den o.a. Bedingungen ($\ell_{Na} = 3 t_{Lam}$) hergestellt wurden. Hierdurch konnte festgestellt werden, dass Nägel im Grenzbereich einer zweiseitigen Verbindung, d.h. geringfügig weniger als $8 d_N$ Einschlagtiefe in der dritten Lamelle oder einen leichten Überstand des Nagels über die dritte Lamelle hinaus, ohne Einbußen oder Erhöhung der Steifigkeit der Brettstapелеlemente verwendet werden können. Für obige Lamelle von $t_{Lam} = 30$ mm könnte somit auch ein Nagel der Größe 3,1 x 80 mm Verwendung finden, wenn auch die nach E DIN 1052 geforderte Mindesteinschlagtiefe von $8 d_N$ nicht vollständig erreicht wird.

3.3.2. Linear elastische Steifigkeitseigenschaften der Nagelverbindungen

Im Trägerrostmodell wurden die Nägel über elastische Balkenelemente abgebildet. Die Länge der Balkenelemente entsprach der Lamellendicke, der Durchmesser des Kreisquerschnittes der Balkenelemente entsprach dem Durchmesser des simulierten Nagels. Mit diesen Annahmen und einem Federmodell für die Balkenelemente wurde über die Steifigkeitseigenschaften von Nagelverbindungen nach E DIN 1052 [46] ein wirksamer Elastizitätsmodul für die Balkenelemente bestimmt.

Die linear elastischen Steifigkeitseigenschaften der Nagelverbindungen im Trägerrostmodell wurden über die Verschiebungsmoduln nach E DIN 1052 [46] simuliert. Für Nägel in nicht vorgebohrten Nagellöchern ist in [46] der Verschiebungsmodul K_{ser} pro Nagel und Scherfuge gegeben mit

$$K_{ser} = \frac{\rho_k^{1,5} \cdot d_N^{0,8}}{25} \left[\frac{N}{mm} \right] . \quad (3- 5)$$

Hierin bedeuten:

ρ_k = charakteristische Rohdichte des Holzes = $380 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ für NH S 10

d_N = Nageldurchmesser [mm].

Berechnungen der charakteristischen Tragfähigkeit von zweischnittigen Holz-Holz-Nagelverbindungen mit den oben angeführten Annahmen haben gezeigt, dass sich meist der Versagensmechanismus 3 nach der Theorie von Johansen [48] einstellt, d.h. es bilden sich vier Fließgelenke im Verbindungsmittel aus (vgl. Bild 3- 9).

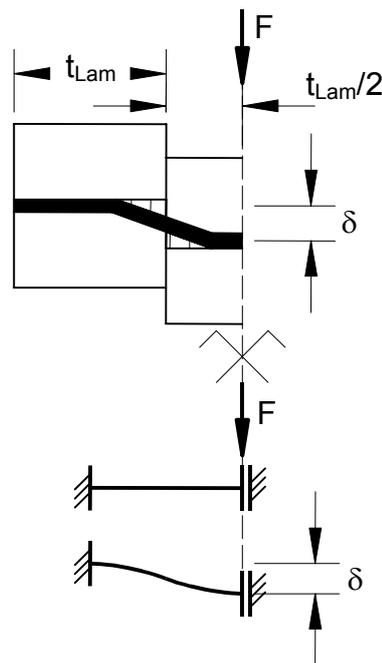


Bild 3- 9 Versagensmechanismus 3 und abgeleitetes mechanisches Modell

Über die Annahme, dass sich pro Scherfuge und Verbindungsmittel zwei Fließmomente ausbilden, wurde als mechanisches Modell der Nagelverbindung ein beidseitig eingespannter und einseitig vertikal verschieblicher Einfeldträger mit der Länge t_{Lam} gewählt. Die Verformung δ des mechanischen Modells infolge einer Einheitslast $\bar{1}$ kann mit Hilfe des Kraftgrößenverfahrens bestimmt werden:

$$\delta_{\text{Modell}} = \frac{\bar{1} \cdot t_{Lam}^3}{12 \cdot E \cdot I} \quad (3- 6)$$

Die aus Gleichung (3- 6) berechnete Verformung kann der Verformung einer zweischnittigen Holz-Holz-Nagelverbindung infolge einer Einheitslast $\bar{1}$ gleichgesetzt werden, um so einen wirksamen Elastizitätsmodul der Querträger im Trägerrostmodell zurück zu rechnen. Für die Berechnung des wirksamen Elastizitätsmoduls der

Querträger im Trägerrostmodell wurde die zweifache Nagelsteifigkeit angesetzt, da sich mit den Annahmen über die Art und die Anordnung der Nägel aus Abschnitt 3.3.1 jeweils zwei Nägel pro Scherfuge (vertikale Projektion) an der Lastabtragung beteiligen.

$$\delta_{\text{Modell}} \stackrel{!}{=} \delta_{\text{Nagel}} \Rightarrow \frac{\bar{1} \cdot t_{\text{Lam}}^3}{12 \cdot E_{\text{ef}} \cdot I_{\text{N}}} \stackrel{!}{=} \frac{\bar{1} \cdot 25}{2 \cdot \rho_k^{1,5} \cdot d_{\text{N}}^{0,8}} \quad (3-7)$$

Hierin bedeuten:

ρ_k = charakteristische Rohdichte des Holzes = $380 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ für NH S 10

d_{N} = Nageldurchmesser [mm].

t_{Lam} = Lamellendicke [mm]

$I_{\text{N}} = \frac{d_{\text{N}}^4 \cdot \pi}{64}$ [mm⁴] Flächenmoment 2. Grades, Kreisquerschnitt

Der wirksame Elastizitätsmodul der Querträger für die Simulationen mit linear elastischem Tragverhalten der Nagelverbindungen im Trägerrostmodell wird mit Gleichung (3- 8) berechnet:

$$E_{\text{ef}} = \frac{64}{150} \cdot \frac{t_{\text{Lam}}^3 \cdot \rho_k^{1,5} \cdot d_{\text{N}}^{0,8}}{d_{\text{N}}^4 \cdot \pi} \quad (3-8)$$

In Bild 3- 10 sind die deformierten Nägel eines Prüfkörpers dargestellt. Die ausgeprägten Fließmomente der Verbindungsmittel bestätigen die oben getroffene Annahme, dass sich i.d.R der Versagensmechanismus 3 nach der Theorie von Johansen in den Verbindungsmitteln einstellt.

Das in Abschnitt 3.2 dargestellte mechanische Modell der Brettstapelelemente in Verbindung mit dem wirksamen Elastizitätsmodul der Querträger fußen auf der vereinfachenden Annahme, dass keine Biegemomente in Querrichtung des Brettstapelelementes abgetragen werden. Eine wirksame Biegesteifigkeit in Querrichtung der Brettstapelelemente hängt im Wesentlichen vom Auszieh Widerstand der Verbindungsmittel im Biegezugbereich ab [35]. Infolge der Vernagelung der Brettstapelelemente mit glattschaftigen Nägeln, die einen nur sehr geringen Auszieh Widerstand besitzen, kann der Druckkontakt der Lamellen und die daraus resultierende geringfügige Biegesteifigkeit in Querrichtung vernachlässigt werden.



Bild 3- 10 Geöffneter Prüfkörper, verformte Nägel

3.3.3. Nichtlineare Last-Verschiebungs-Eigenschaften der Nagelverbindungen

Die mechanischen Eigenschaften der Nagelverbindungen beeinflussen das Trag- und Verformungsverhalten der Brettstapelelemente in ganz erheblichem Maße. Deshalb wurde das Trag- und Verformungsverhalten von zweischnittigen Holz-Holz-Nagelverbindungen durch Versuche bestimmt und die Ergebnisse in das Trägerrostmodell implementiert. Für insgesamt vier Nagelgrößen, 3,1x80 mm, 3,4x90 mm, 3,8x100 mm und 4,2x120 mm, wurden jeweils 20 Prüfkörper für Druckscher- und Zugscherversuche hergestellt und diese in Anlehnung an DIN 26891 [49] geprüft. Ziel der Untersuchungen war es, die Verteilungsfunktionen derjenigen Parameter zu ermitteln, mit denen eine Last-Verschiebungs-Kurve beschrieben werden kann. Auf der Grundlage der Versuchsdaten wurde das Last-Verschiebungs-Verhalten von Nagelverbindungen mit streuenden Einflussparametern virtuell nachgebildet und in das Simulationsmodell eingearbeitet.

3.3.3.1. Parameter zur Beschreibung von Last-Verschiebungs-Kurven

Es bestehen viele unterschiedliche Ansätze, Last-Verschiebungs-Kurven von Holzverbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln durch Gleichungen zu beschreiben. Ehlbeck stellte in seinem Buch „Nailed Joints in Wood Structures“ [50] eine Zusammenfassung der relevanten Theorien zum Last-Verschiebungs-Verhalten von

Nagelverbindungen zusammen. Larsen veröffentlichte 1975 eine Zusammenstellung der Ergebnisse über die Formulierung des Last-Verschiebungs-Verhaltens von Bolzen- und Nagelverbindungen verschiedener Autoren [51].

Neben Teichmann und Borkmann [52] veröffentlichte Foschi [53] Gleichungen zur Beschreibung von Last-Verschiebungs-Kurven. Blaß [54] erweiterte die von Foschi vorgeschlagene Gleichung zur Beschreibung von Last-Verschiebungs-Kurven und verwendete anstelle der Lochleibungsspannung die in der Verbindung übertragene Last. Gleichung (3- 9) stellt die von Blaß vorgeschlagene Gleichung zur Beschreibung der Last-Verformungs-Kurven dar, die auch im Weiteren verwendet wurde, um die Zug- und Druckscherversuche auszuwerten.

$$f_{(x)} = (K_2 + K_3 \cdot x) \cdot \left(1 - e^{-\frac{K_1}{K_2} \cdot x} \right) \leq F_{\max} \quad (3- 9)$$

Hierin bedeuten:

- $f_{(x)}$ = Last bei einer Verschiebung x [N]
- x = Verschiebung [mm]
- K_1 = Steigung der Tangente im Ursprung [N/mm]
- K_2 = Achsenabschnitt der Endtangente [N]
- K_3 = Steigung der Endtangente [N/mm]
- F_{\max} = Höchstlast [N]

In Bild 3- 11 ist die Last-Verschiebungs-Kurve nach Blaß dargestellt.

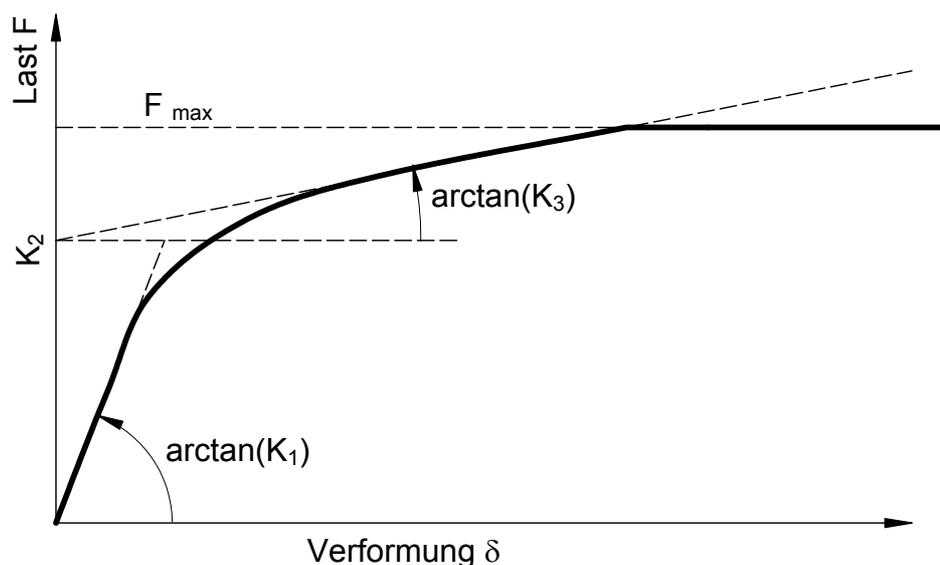


Bild 3- 11 Last-Verformungs-Beziehung nach Blaß

Die Kurvenparameter K_1 , K_2 , K_3 und F_{\max} sowie deren statistische Verteilungen wurden für die Untersuchungen für die vorliegende Dissertation durch Zugscher- und Druckscherversuche ermittelt.

3.3.3.2. Zugscher- und Druckscherversuche

Zur Ermittlung der Kurvenparameter K_1 , K_2 , K_3 und F_{\max} sowie ihrer statistischen Kenngrößen wurden für die Nagelgrößen 3,1x80 mm, 3,4x90 mm, 3,8x100 mm und 4,2x120 mm jeweils 20 Druckscher- und 20 Zugscherversuche durchgeführt. Die Prüfkörper wurden als zweiseitige Holz-Holz-Nagelverbindung hergestellt, wobei alle drei Hölzer die gleiche Dicke - jeweils ein Drittel der Nagellänge - aufwiesen und nach visueller Sortierung mindestens der Sortierklasse S 10 entsprachen. Um den Einfluss der Reibung zwischen den gehobelten Hölzern möglichst gering zu halten, wurden zwischen die Seiten- und Mittelhölzer jeweils zwei 0,4 mm dicke PE-Folien eingelegt. Die Unterteilung der Versuche nach den Beanspruchungsrichtungen war notwendig, da infolge der Plattenbeanspruchung der Brettstapelelemente die Nägel primär rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes auf Abscheren beansprucht werden und das Last-Verformungs-Verhalten von Holz-Holz-Nagelverbindungen signifikant von der Beanspruchungsrichtung abhängt.

Die in den Prüfkörpern der Zugscher- und Druckscherversuche vorhandenen mechanischen Beanspruchungen der Verbindungsmittel spiegeln die realistischen Verhältnisse im Brettstapelelement nur bedingt wieder. Wird ein Brettstapelelement durch eine zentrische Einzellast beansprucht, kann sich die in Bild 3- 12 b dargestellte Verformungsfigur eines Nagels einstellen. Bei den Nägeln der Prüfkörper der Zugscher- und Druckscherversuche stellt sich qualitativ die in Bild 3- 12 a dargestellte Verformungsfigur ein.

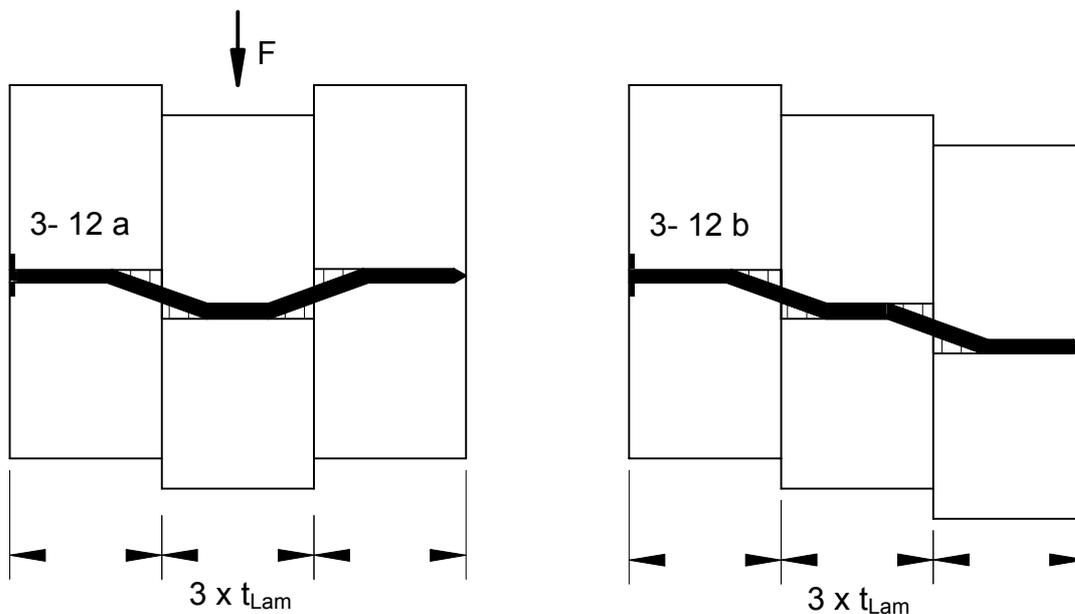


Bild 3- 12 Verformungsfiguren der Verbindungsmittel

Mit den in Abschnitt 3.3.1 dargestellten Annahmen, dass die Länge der Nägel der dreifachen Dicke einer Lamelle entsprechen und den in Deutschland gebräuchlichen glattschaftigen Nägeln nach DIN 1143 [36] stellt sich bei den Zugscher- und Druckscherversuchen aller geprüften Nageldurchmesser Versagensmechanismus 3 nach der Theorie von Johansen [48] ein. Im Versagensmechanismus 3 bilden sich zwei Fließgelenke pro Verbindungsmittel und Scherfuge aus, d.h. das Last-Verschiebungs-Verhalten einer solchen genagelten Holz-Holz-Verbindung wird durch die Lochleibungsfestigkeit der Hölzer und dem Biege widerstand der Nägel beeinflusst. Da sich pro Scherfuge und Verbindungsmittel zwei Fließgelenke ausbilden, konnten die Ergebnisse aus den Zugscher- und Druckscherversuchen direkt für die Simulationen von Brettstapelelementen unter zentrischen Einzellasten verwendet werden.

Diese Annahme wird durch Versuche an Brettstapelelementen unter Scheibenbeanspruchung unterstützt. Krämer führte an drei Brettstapelelementen Versuche durch, die parallel zur Lamellenrichtung durch eine mittige Einzellast beansprucht waren (vgl. Bild 3- 13).

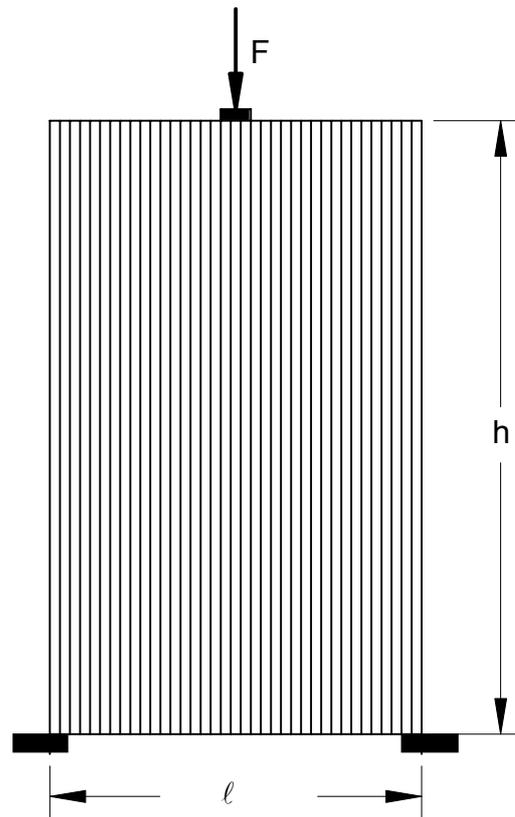


Bild 3- 13 Prüfkörper Brettstapelelemente, scheibenförmige Beanspruchung

Die Prüfkörper bestanden aus 35 Lamellen der Sortierklasse S 10 mit den Querschnittsmaßen $t \times b = 26 \times 140$ mm, die Höhe h des Prüfkörpers betrug 1600 mm. Die Vernagelung der Lamellen (zweischnittig) erfolgte mit Nägeln der Größe $3,1 \times 80$ mm und einem Abstand untereinander von 150 mm. In Anlehnung an Werner [29] kann die Verformung eines Brettstapelelementes (Scheibenbeanspruchung) nach Gleichung 3-10 näherungsweise berechnet werden:

$$v = \frac{F \cdot \ell}{4 \cdot h} \cdot \frac{e}{C \cdot t} \quad (3- 10)$$

Hierin bedeuten:

- v = mittige Verformung [mm]
- F = zugehöriger Betrag der Einzellast [N]
- ℓ / h = Stützweite / Höhe Brettstapelelement [mm]
- e = Nagelabstand in Faserrichtung [mm]
- C = Verschiebungsmodul [N/mm]
- t = Dicke der Lamellen [mm]

Über die Versuchsergebnisse und Gleichung 3- 11 können Mittelwerte der Verschiebungsmoduln von genagelten Holz-Holz-Verbindungen berechnet werden.

$$C = \frac{F}{v} \cdot \frac{\ell \cdot e}{4 \cdot h \cdot t} \quad (3- 11)$$

Für die drei durchgeführten Versuche ergaben sich unter einer Last von $F = 5,0$ kN folgende mittlere Verschiebungsmoduln (zwei Nägel pro Scherfuge):

Tabelle 3- 2 Mittlere Verschiebungsmoduln

C_1	C_2	C_3
3440 N/mm	4570 N/mm	3360 N/mm

Die über die Versuchsergebnisse bestimmten mittleren Verschiebungsmoduln können näherungsweise mit den Mittelwerten der Beträge der Faktoren K_1 der Zugscherversuche verglichen werden. Ein Vergleich der beiden Werte ist nur bedingt aussagekräftig, da der Verschiebungsmodul eine Sekante und der Faktor K_1 eine Tangente an eine Last-Verschiebungs-Kurve darstellt. Der Betrag des Verschiebungsmoduls einer genagelten Verbindung ist meist geringer als der Betrag des Faktors K_1 der gleichen genagelten Verbindung.

Bei den Zugscherversuchen mit der Nagelgröße 3,1x80 mm ergab sich ein Mittelwert des Faktors K_1 zu 5070 N/mm (vgl. Tab 3- 3). Der Vergleich der Versuchsergebnisse deutet darauf hin, dass die aus den Zugscher- und Druckscherversuchen gewonnenen Beträge der Parameter zur Beschreibung einer Last-Verschiebungs-Kurve für die Simulationen verwendet werden können. Der Einfluss der gleichförmigen oder gegenläufigen Verformung eines Nagels in einem Brettstapelelement kann unter den in dieser Arbeit getroffenen Annahmen als vernachlässigbar klein angesehen werden.

Mit den Zugscherversuchen wurden die Kurvenparameter von Holz-Holz-Nagelverbindungen bestimmt, die parallel zur Faserrichtung beansprucht werden. Der Versuchsaufbau der Zugscherversuche ist in Bild 3- 14 dargestellt. Die Zugscherversuche wurden mit einer Universalprüfmaschine durchgeführt, wobei die Last in die Prüfkörper mittels Stabdübeln ($\varnothing 24$ mm) eingeleitet wurde. Die relative Verschiebung zwischen den Seitenhölzern und dem Mittelholz wurde mit zwei induktiven Wegaufnehmern (W20) symmetrisch zum Mittelholz gemessen.

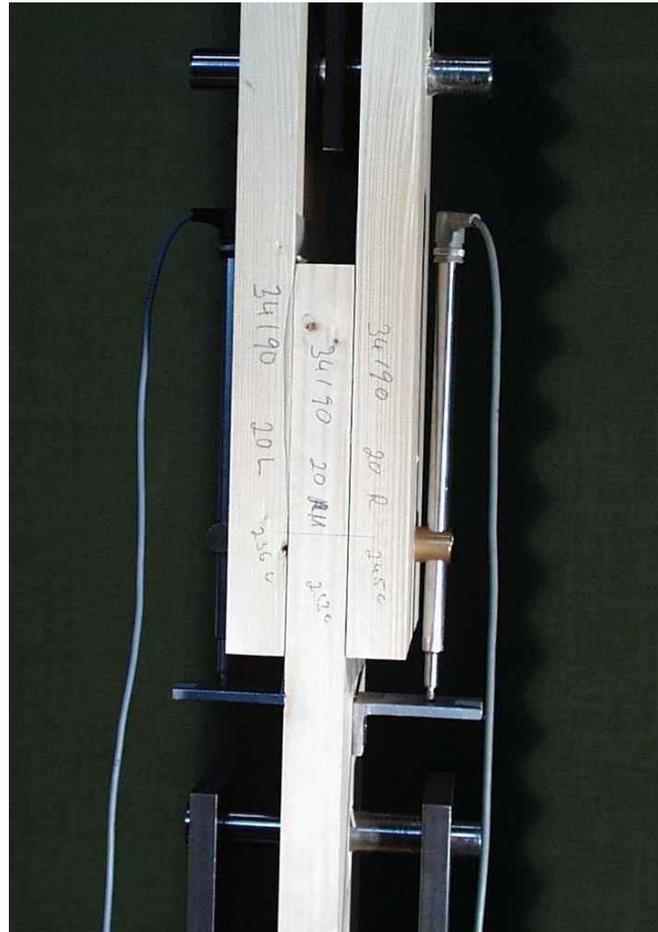


Bild 3- 14 Versuchsaufbau der Zugscherversuche

Mit den Druckscherversuchen wurden die Kurvenparameter von Holz-Holz-Nagelverbindungen bestimmt, die rechtwinklig zur Faserrichtung beansprucht werden.

Bei den Druckscherversuchen erfolgte die Lasteinleitung in das Mittelholz über einen Stahlquader, der quasi auf der ganzen Schmalseite der Mittellamelle auflag. Die Seitenhölzer waren ganzflächig auf Stahlquadern gelagert, so dass weder im Mittelholz noch in den Seitenhölzern sich Eindrückungen infolge der Prüflast einstellen konnten. Analog zu den Zugscherversuchen wurden die relativen Verschiebungen zwischen den Seitenhölzern und dem Mittelholz mit zwei induktiven Wegaufnehmern (W20) jeweils am Hirnholz gemessen.

Der Versuchsaufbau der Druckscherversuche ist in Bild 3- 15 dargestellt.

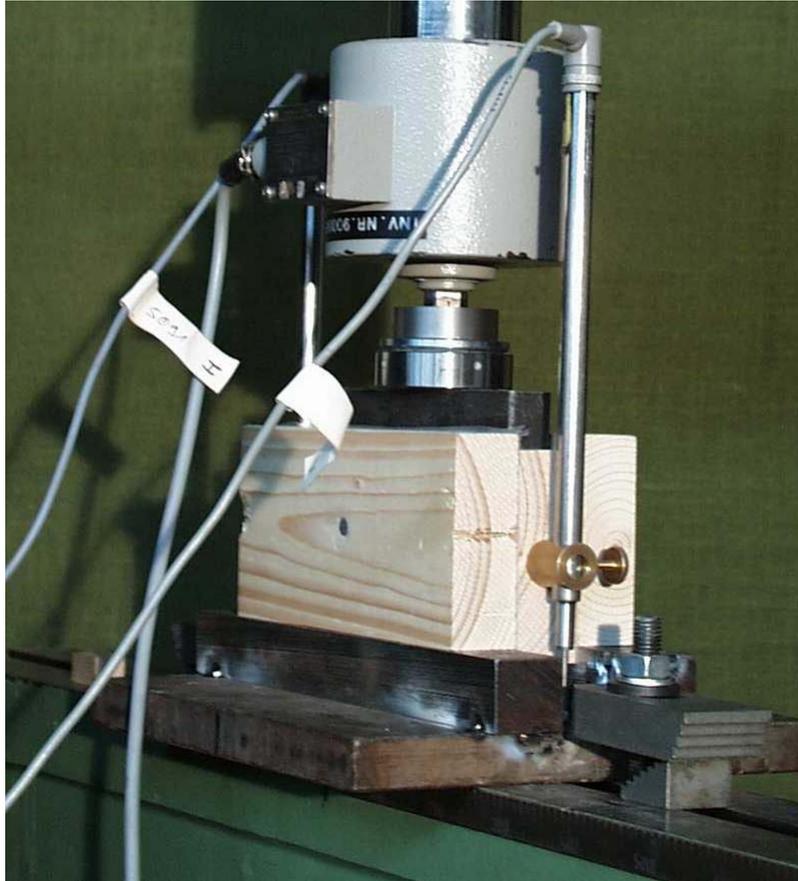


Bild 3- 15 Versuchsaufbau der Druckscherversuche

3.3.3.3. Bestimmung der Kurvenparameter

Von jedem Zugscher- und Druckscherversuch wurden die Verformungen aufgezeichnet. Für jede der aus den Versuchen ermittelten Last-Verschiebungs-Kurve (zwei je Versuch, da zwei Wegaufnehmer) wurden die Parameter K_1 , K_2 , K_3 und F_{\max} der Gleichung (3- 9) zur Beschreibung einer Last-Verschiebungs-Kurve ermittelt. Somit lagen für jede Versuchsserie mit unterschiedlichen Nageldurchmessern und unterschiedlicher Beanspruchungsrichtung jeweils 40 Werte der entsprechenden Parameter vor.

Die Parameter K_1 , K_2 , K_3 und F_{\max} wurden für jede Last-Verschiebungs-Kurve mit dem Statistikprogramm SAS bestimmt. Die Anpassung der Last-Verschiebungs-Kurven erfolgte auf der Grundlage der Methode der kleinsten Abstandsquadrate nach Gauß-Newton.

In Bild 3- 16 und Bild 3- 17 sind exemplarisch die durch Versuche ermittelten Last-Verschiebungs-Kurven und deren angepasste Funktionen dargestellt. Beide Prüfkörper wurden aus den gleichen Lamellenabschnitten hergestellt und weisen somit sehr ähnliche Materialeigenschaften auf.

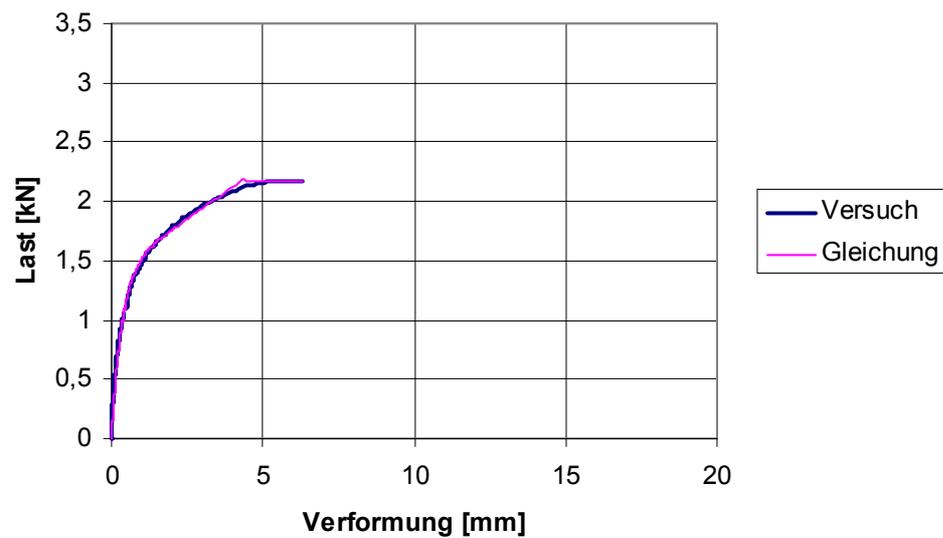


Bild 3- 16 Last-Verschiebungs-Kurve und angepasste Funktion; Na 3,4x90 mm, Beanspruchung parallel zur Faserrichtung (Zug)

Für den im Bild 3- 16 dargestellten Zugscherversuch ergaben sich folgende Parameter zur Beschreibung der Last-Verschiebungs-Kurve:

$$K_1 = 4,33 \text{ kN/mm}$$

$$K_2 = 1,40 \text{ kN}$$

$$K_3 = 0,180 \text{ kN/mm}$$

$$F_{\max} = 2,17 \text{ kN}$$

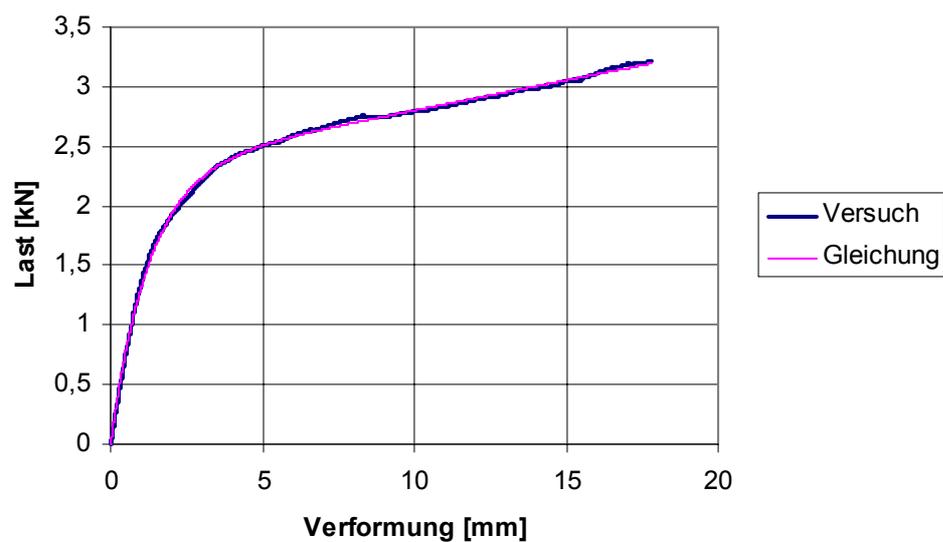


Bild 3- 17 Last-Verschiebungs-Kurve und angepasste Funktion; Na 3,4x90 mm, Beanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung (Druck)

Für den im Bild 3- 17 dargestellten Druckscherversuch ergaben sich folgende Parameter zur Beschreibung der Last-Verschiebungs-Kurve:

$$K_1 = 1,86 \text{ kN/mm}$$

$$K_2 = 2,29 \text{ kN}$$

$$K_3 = 0,0504 \text{ kN/mm}$$

$$F_{\max} = 3,23 \text{ kN}$$

In den Tabellen 3- 3 und 3- 4 sind die Versuchsergebnisse der Druck- und Zugscherversuche dargestellt.

Tabelle 3- 3 Ergebnisse der Zugscherversuche

Nagel 3,1x80 mm; n = 20 Versuche				
	F_{\max} [kN]	K_1 [kN/mm]	K_2 [kN]	K_3 [kN/mm]
Min	1,43	2,03	0,497	0,120
Max	3,13	8,40	1,53	0,242
Mittelwert	2,47	5,07	1,17	0,187
S	0,335	1,54	0,214	0,0347
Nagel 3,4x90 mm; n = 20 Versuche				
Min	1,67	2,15	1,09	0,0400
Max	3,46	11,1	2,15	0,223
Mittelwert	2,22	4,93	1,49	0,101
S	0,411	2,32	0,248	0,0406
Nagel 3,8x100 mm; n = 20 Versuche				
Min	2,15	1,89	1,22	0,0733
Max	4,18	10,9	2,33	0,243
Mittelwert	2,83	5,67	1,73	0,149
S	0,459	2,45	0,268	0,0439
Nagel 4,2x120 mm; n = 20 Versuche				
Min	3,31	1,52	2,19	0,0665
Max	6,14	11,4	3,44	0,229
Mittelwert	4,38	4,36	2,65	0,127
S	0,659	2,64	0,338	0,0440

S = Standardabweichung

Tabelle 3- 4 Ergebnisse der Druckscherversuche

Nagel 3,1x80 mm; n = 20 Versuche				
	F_{\max} [kN]	K_1 [kN/mm]	K_2 [kN]	K_3 [kN/mm]
Min	2,87	1,30	1,66	0,055
Max	4,38	4,54	3,09	0,262
Mittelwert	3,58	2,22	2,25	0,119
S	0,393	0,638	0,400	0,0457
Nagel 3,4x90 mm; n = 20 Versuche				
Min	2,34	1,53	1,62	0,036
Max	3,76	4,18	2,52	0,120
Mittelwert	3,00	2,18	2,04	0,0669
S	0,424	0,515	0,251	0,0209
Nagel 3,8x100 mm; n = 20 Versuche				
Min	2,93	1,82	1,56	0,040
Max	5,84	3,32	3,60	0,552
Mittelwert	3,69	2,39	2,55	0,0904
S	0,657	0,413	0,440	0,0768
Nagel 4,2x120 mm; n = 20 Versuche				
Min	4,59	1,53	2,51	0,073
Max	7,01	4,37	3,94	0,153
Mittelwert	5,50	2,48	3,37	0,107
S	0,591	0,473	0,374	0,0202

S = Standardabweichung

3.3.3.4. Simulation der Last-Verschiebungs-Kurven

Die Parameter der Last-Verschiebungs-Kurven von Nagelverbindungen sind nicht unabhängig voneinander. Zur Simulation der korrelierten Parameter K_1 , K_2 , K_3 und F_{\max} wurde ein von Taylor und Bender vorgeschlagenes Verfahren [55] verwendet, welches auf der Transformation der multivariaten Normalverteilung beruht. Dieses Verfahren bietet den Vorteil, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der jeweiligen Parameter beibehalten werden und dass die Korrelationsstruktur der einzelnen Parameter untereinander sehr gut angenähert wird.

Für die Simulation wird für jeden Parameter die Wahrscheinlichkeitsverteilung bestimmt und die Kovarianzmatrix berechnet. Mit der Kovarianzmatrix wird eine gewählte Anzahl von Vektoren mit korrelierten Zufallszahlen aus der multivariaten Normalverteilung generiert. Law und Kelton geben eine Vorgehensweise zur Bestimmung von Vektoren aus der multivariaten Normalverteilung an [56]. Die Kovarianzmatrix der Parameter kann mittels Gleichung (3- 12) formuliert werden, da sie symmetrisch und positiv definit ist:

$$\Sigma = \mathbf{A} \mathbf{A}^T \quad (3- 12)$$

Hierin bedeuten:

Σ $n \times n$ Kovarianzmatrix

\mathbf{A} $n \times n$ Dreiecksmatrix

Die Dreiecksmatrix \mathbf{A} kann z.B. mit Hilfe der Choleski-Zerlegung berechnet werden. Mittels eines Zufallsgenerators werden im nächsten Schritt beliebig viele Vektoren ($\mathbf{Z}^{(i)}_n$) mit normalverteilten Zufallszahlen zwischen 0 und 1 generiert. Mit Gleichung (3- 13) können Vektoren $\mathbf{X}^{(i)}_n$ mit den Parametern berechnet werden, die der Korrelationsstruktur der Eingangs ermittelten Parametern entsprechen.

$$\mathbf{X}^{(i)}_n = \boldsymbol{\mu}_n + \mathbf{A} \mathbf{Z}^{(i)}_n \quad (3- 13)$$

Hierin bedeuten:

$\mathbf{X}^{(i)}_n$ n - dimensionaler Vektor der simulierten Parameter

\mathbf{A} $n \times n$ Dreiecksmatrix

$\boldsymbol{\mu}_n$ n - dimensionaler Vektor der Mittelwerte der Parameter

$\mathbf{Z}^{(i)}_n$ n - dimensionaler Vektor mit Zufallszahlen

Das oben angegebene Verfahren zur Simulation von mehrfach korrelierten Parametern wurde mittels SAS-Makro-Programmierung umgesetzt [57]. Um die Qualität der Simulationsergebnisse zu überprüfen, wurden von Blaß veröffentlichte Versuchsergebnisse über Zugscherversuche von Nagelverbindungen [58] erneut simuliert. Blaß führte in Kanada insgesamt 1088 Zugscherversuche mit Nägeln mit einem Nenndurchmesser von 3,66 mm durch und bestimmte die Last-Verschiebungs-Parameter K_1 , K_2 , K_3 und F_{\max} sowie deren statistische Verteilungen. In Tabelle 3- 5 ist die Korrelationsmatrix der von Blaß ermittelten Last-Verschiebungs-Parameter in der oberen Zeile den simulierten Parametern in der unteren Zeile (*kursiv*) gegenübergestellt.

Tabelle 3- 5 Vergleich der Korrelationsmatrix der Kurvenparameter

	F_{\max}	K_1	K_2	K_3
F_{\max}	1,00 <i>1,00</i>	0,30 <i>0,289</i>	0,66 <i>0,650</i>	0,79 <i>0,786</i>
K_1	0,30 <i>0,289</i>	1,00 <i>1,00</i>	0,11 <i>0,112</i>	0,42 <i>0,397</i>
K_2	0,66 <i>0,650</i>	0,11 <i>0,112</i>	1,00 <i>1,00</i>	0,21 <i>0,194</i>
K_3	0,79 <i>0,786</i>	0,42 <i>0,397</i>	0,21 <i>0,194</i>	1,00 <i>1,00</i>

Die Bilder Bild 3- 18 und Bild 3- 19 zeigen exemplarisch die Histogramme und die angepassten Normalverteilungen von 2000 simulierten Traglasten F_{\max} und der Anfangssteigungen K_1 für glattschaftige Nägel mit einem Nenndurchmesser von 3,8 mm. Die Simulationen wurden mit den in den Zug- und Druckscherversuchen ermittelten Werten der Parameter durchgeführt.

Die Ergebnisse der Zugscher- und Druckscherversuche sowie die Ergebnisse der Simulationen der Parameter zur Beschreibung einer Last-Verschiebungs-Kurve sind in Anlage B dargestellt.

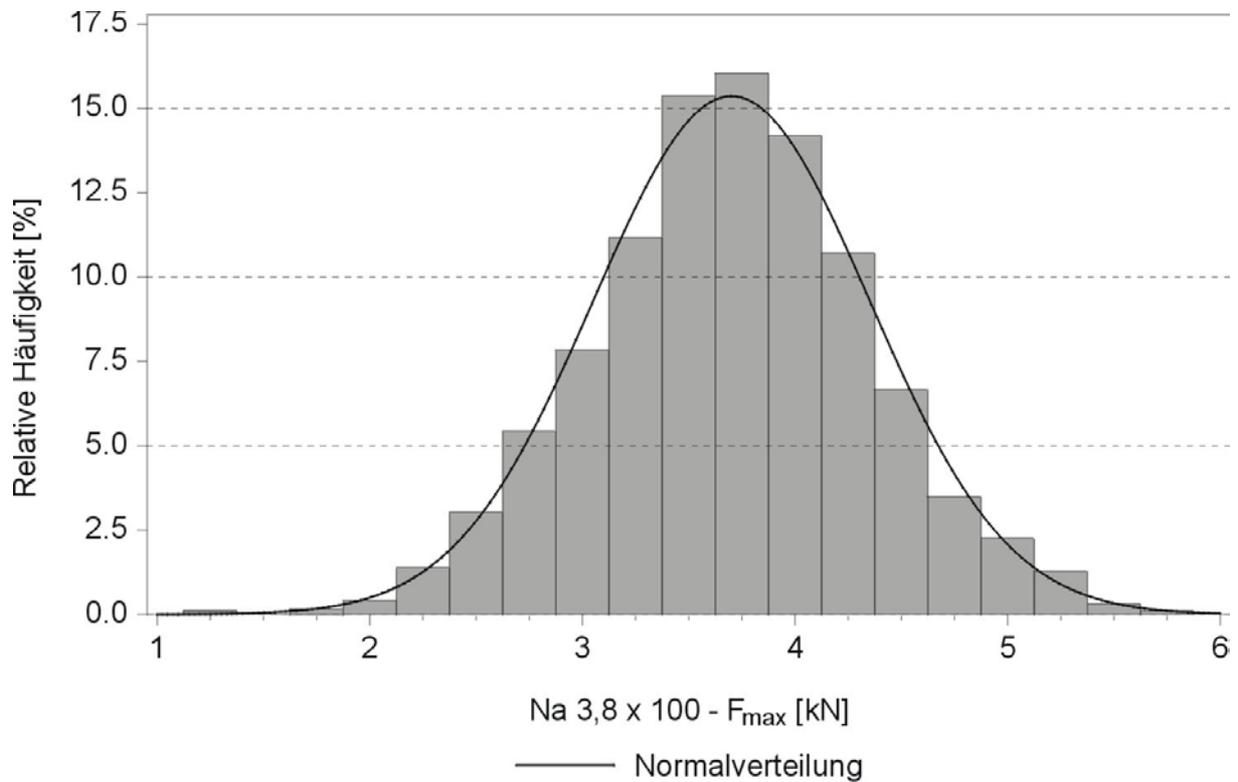


Bild 3- 18 Häufigkeitsverteilung der simulierten Traglast, Na 3,8x100 mm

Die Parameter zur Beschreibung der Normalverteilung (vgl. Gleichung (3- 2)) der simulierten Traglasten F_{\max} sind:

μ	Mittelwert	= 3,70 kN
σ	Standardabweichung	= 0,649 kN

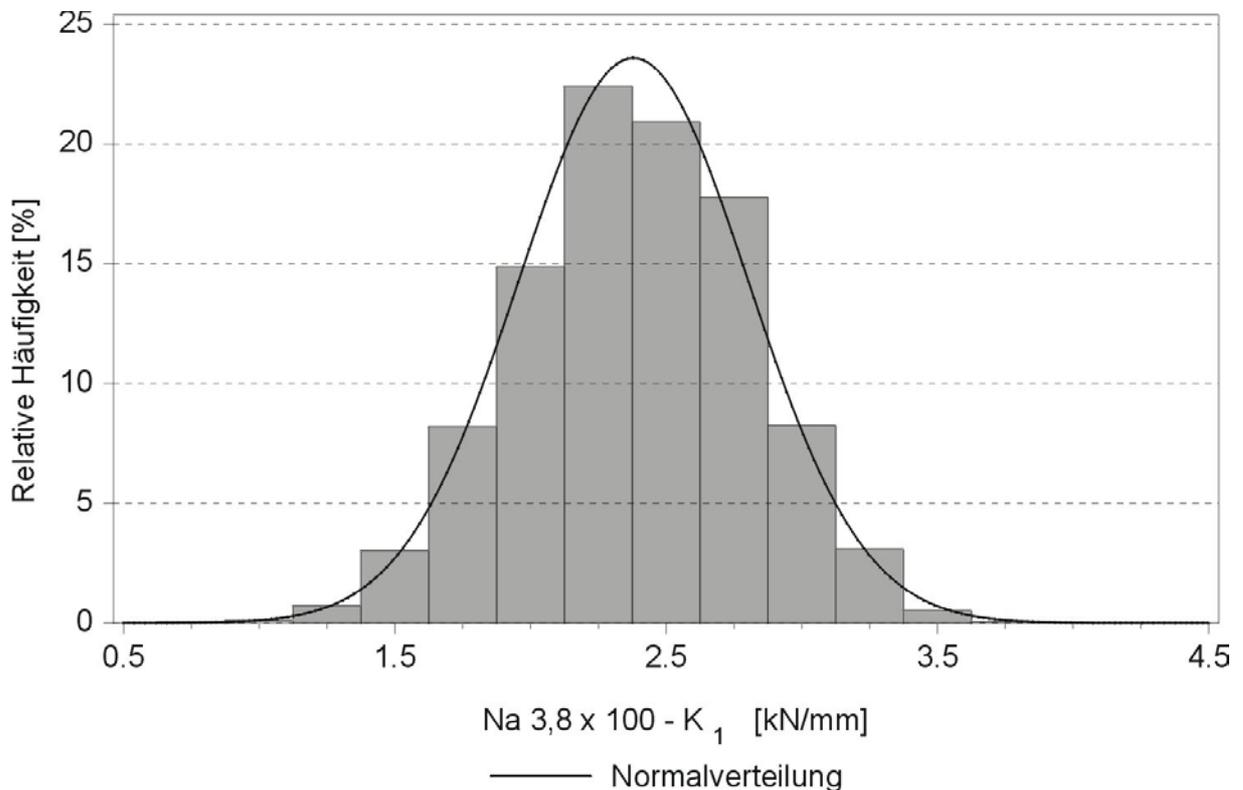


Bild 3- 19 Häufigkeitsverteilung des simulierten Kurvenparameters K_1 , Na 3,8x100 mm

Die Parameter zur Beschreibung der Normalverteilung (vgl. Gleichung (3- 2)) der simulierten Anfangssteigungen K_1 betragen:

μ	Mittelwert	= 2,38 kN/mm
σ	Standardabweichung	= 0,423 kN/mm

3.3.3.5. Anpassung der Last-Verschiebungs-Kurven in das mechanische Modell

Mit Hilfe der simulierten Parameter K_1 , K_2 , K_3 und F_{\max} und Gleichung (3- 9) wird die Last-Verschiebungs-Kurve vollständig beschrieben. Um die Last-Verschiebungs-Kurven in das Trägerrostmodell einbauen zu können, wurde der Verlauf der Gleichung (3- 9) über einen Polygonzug angenähert. Das zur Nachbildung des nichtlinearen Last-Verschiebungs-Verhaltens von Nagelverbindungen verwendete

FE- Element kann über maximal 20 Wertepaare (x/y), z.B. (Weg/Last), diese Last-Verschiebungs-Kurven über Polygonzüge abbilden.

Die Stützstellen der Polygonzüge können nicht über ein festes Raster bestimmt werden, da sich die Last-Verschiebungs-Kurven sehr stark voneinander unterscheiden. Somit wurden für jede Last-Verschiebungs-Kurve individuelle Stützstellen für den Polygonzug berechnet und den Finiten Elementen zugewiesen. Die Last-Verschiebungs-Kurve und der angenäherte Polygonzug mit den Stützstellen ist in Bild 3- 20 exemplarisch dargestellt.

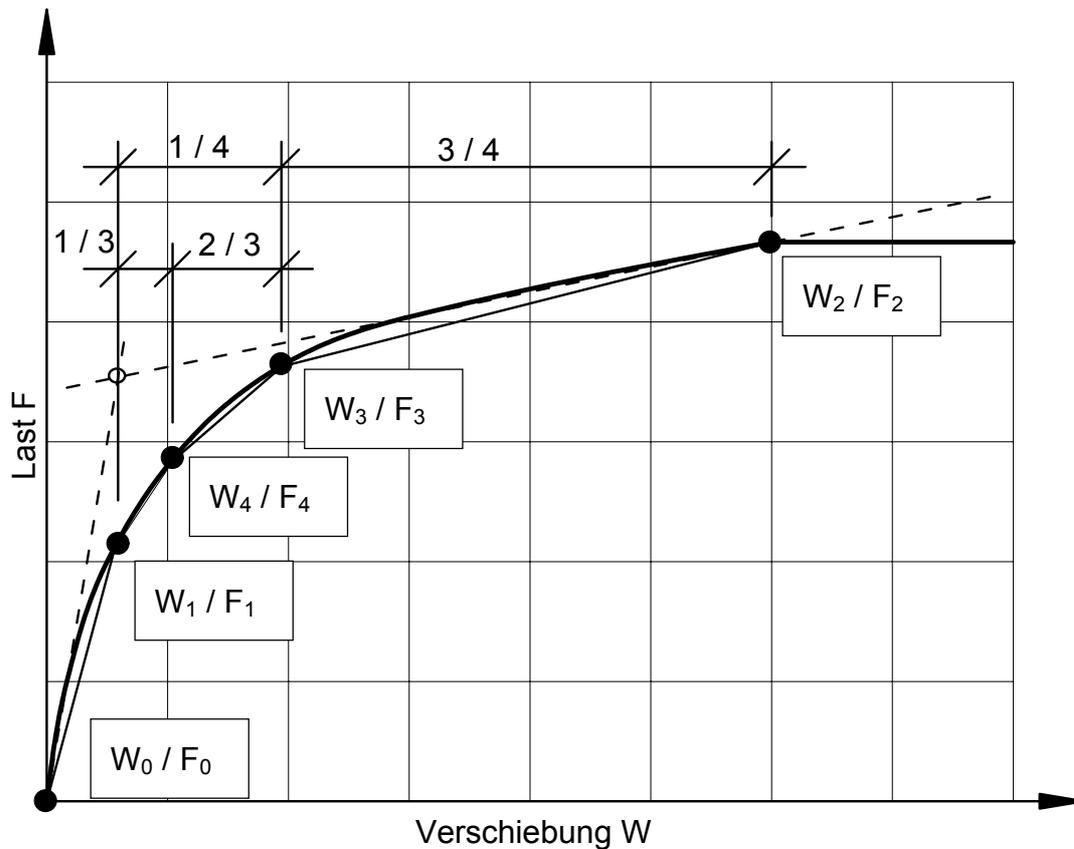


Bild 3- 20 Last-Verschiebungs-Kurve mit angenähertem Polygonzug

Als erste Stützstelle wurde der Koordinatenursprung gewählt (W_0/F_0). Die erste berechnete Wegkoordinate W_1 stellt der Schnittpunkt der beiden Tangenten, die sich mit den Kurvenparametern K_1 , K_2 und K_3 bestimmen lassen, an die Last-Verschiebungs-Kurve dar. Die zweite Wegkoordinate W_2 wird über den Schnittpunkt der flachen Geraden (K_2 und K_3) und der horizontalen Geraden, die F_{\max} repräsentiert, bestimmt. Die Wegkoordinaten W_3 und W_4 werden durch Bruchteile der Strecke $W_2 - W_1$ bestimmt. Nachfolgend sind die Gleichungen zur Berechnung der Stützstellen aufgezeigt.

$$W_1 = \frac{K_2}{K_1 - K_3} \quad (3-14)$$

$$W_2 = \frac{F_{\max} - K_2}{K_3} \quad (3-15)$$

$$W_3 = \frac{3}{4} W_1 + \frac{1}{4} W_2 \quad (3-16)$$

$$W_4 = \frac{11}{12} W_1 + \frac{1}{12} W_2 \quad (3-17)$$

Die zugehörigen Y-Werte, d.h. die zugehörigen Lasten, wurden für jede Wegkoordinate über Gleichung (3-9) berechnet. Ein letzter Stützpunkt des Polygonzuges wurde aus programmtechnischen Gründen bei $W = 500 \text{ mm}$ und $F(W) = 1,01 \cdot F_{\max}$ gesetzt. Somit wurden für jede Last-Verschiebungs-Kurve insgesamt sechs Stützstellen berechnet.

Die Annäherung von Last-Verschiebungs-Kurven über Polygonzüge wurde von Riemensperger in einer ähnlichen Weise vorgeschlagen [59]. In dieser Arbeit wurden Untersuchungen zur nichtlinearen Berechnung von Nagelverbindungen in Brettstapelelementen durchgeführt.

3.4 Annahmen für die Simulationen

Für die Simulationen der Brettstapelelemente mussten Annahmen über die Dimensionen der Brettstapelelemente, Art der Belastung oder die Stoßausführung der Lamellen getroffen werden, da aus den Simulationsergebnissen Bemessungsgleichungen abgeleitet werden sollten. Demzufolge war es notwendig, die Simulationsparameter so zu wählen, dass die in der Praxis vorkommenden Verhältnisse möglichst realistisch abgebildet wurden.

3.4.1 Dimensionen der simulierten Brettstapelelemente

Die Brettstapelelemente wurden als Einfeldträger wie einachsig gespannte Träger simuliert, wobei die Brettstapelelemente an den Schmalseiten aufgelagert waren. Die Stützweiten und Höhen der Brettstapelelemente wurden Bemessungstabellen eines Brettstapelherstellers entnommen [22], die näherungsweise mit den Werten aus Bemessungstabellen anderer Veröffentlichungen übereinstimmen ([29] und [31]). Durch den zum Teil sehr großen Zeit- und Rechenaufwand für die Simulationen und infolge

der begrenzten Rechnerkapazitäten wurde die Stützweite ℓ der Brettstapelelemente konstant bei 3,60 m gehalten. Die Höhe h der Lamellen wurde in den Bereichen 14 cm, 16 cm und 18 cm variiert. Somit ergaben sich praxisnahe ℓ/h -Verhältnisse von 25,7; 22,5 und 20.

Die Dicke t_{Lam} der Lamellen wurde in Anlehnung an Abschnitt 3.3.1 zu etwa einem Drittel der Nennlänge eines Nagels ($t_{\text{Lam}} \cong \ell_{\text{N}} / 3$) gewählt, so dass die geometrischen Bedingungen für eine kraftschlüssige zweischnittige Holz-Holz-Nagelverbindung gegeben waren. Aus den Nagelgrößen 3,4x90 mm, 3,8x100 mm und 4,2x120 mm resultierten Lamellendicken von 30 mm, 35 mm und 40 mm. Die Anzahl der Lamellen war bei jeder Simulation gleich, so dass die Breite der Brettstapelelemente variabel war. Die Anzahl der Lamellen innerhalb eines Brettstapelelementes hing von der Art der Belastung ab. Brettstapelelemente, die durch Einzellasten belastet wurden, bestanden aus mindestens 30 Lamellensträngen, damit die Lastausbreitung innerhalb der Brettstapelelemente untersucht werden konnte. Vergleichsrechnungen mit Brettstapelelementen mit unterschiedlicher Lamellenanzahl haben gezeigt, dass sich die Verformungen und die Spannungsspitzen der Biegegrandspannungen der Lamellen ab etwa 30 Lamellen pro Brettstapelelement nur noch in sehr geringem Maße ändern. Brettstapelelemente, die durch Flächenlasten belastet wurden, bestanden i.d.R. aus 15 Lamellensträngen, da hier keine Lastausbreitung untersucht werden musste. Die Anzahl der 15 Lamellenstränge bei Brettstapelelementen unter Flächenlasten resultierte aus der Vorgabe, dass sich regelmäßige Stoßmuster der Lamellen, wie z.B. wandernde Stöße, mindestens dreimal im Element wiederholen sollten.

Durch diese Vorgehensweise bei der Simulation der Brettstapelelemente, die Wahl einer konstanten Elementlänge bei gleicher Anzahl von Lamellensträngen in den einzelnen Simulationschargen, wurde die Anzahl der Finiten Elemente der Lamellen im Trägerrostmodell konstant gehalten. Dadurch konnte die Auswertung und der Vergleich der Simulationsergebnisse wesentlich vereinfacht werden. Die Dimensionen und Bezeichnungen der Brettstapelelemente sind in Bild 3- 21 für ein Brettstapelelement unter einer zentrischen Einzellast exemplarisch dargestellt.

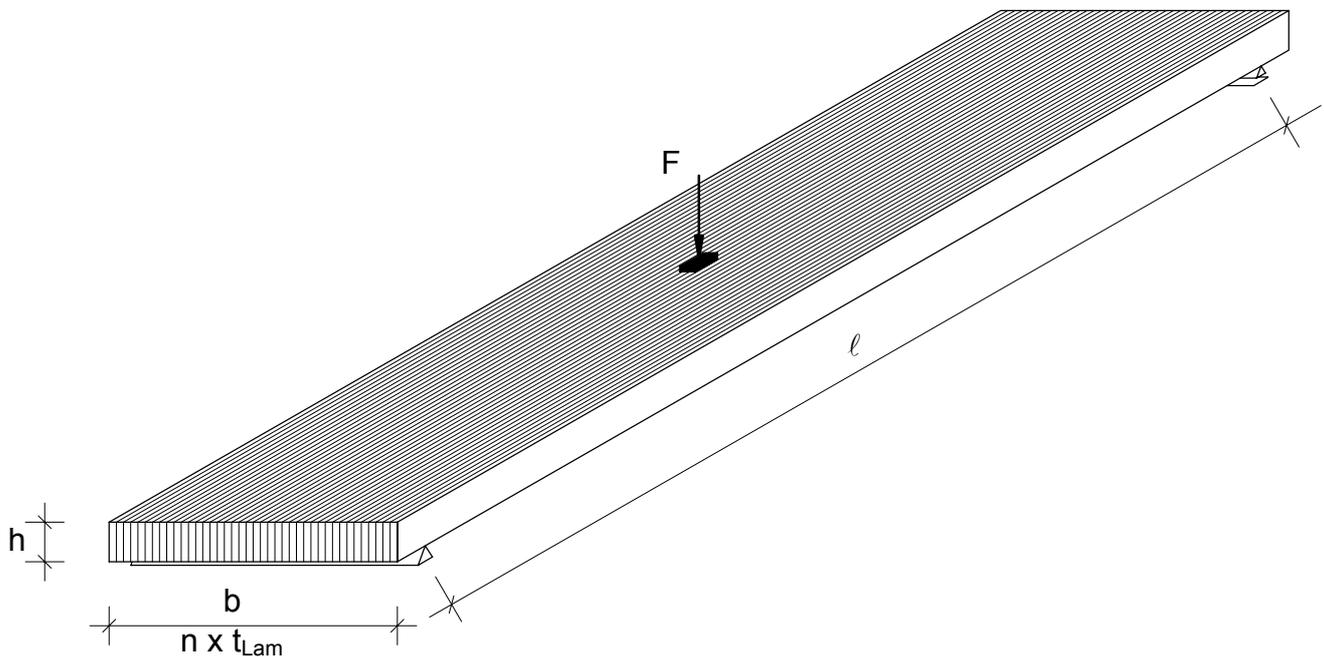


Bild 3- 21 Dimensionen und Bezeichnungen von Brettstapelementen

3.4.2. Simulationsparameter

Grundsätzlich wurden die Simulationen der Brettstapelsysteme bezüglich der Belastung rechtwinklig zur Plattenebene in zwei Bereiche unterteilt:

- Belastung durch zentrische Einzellast
- Belastung durch eine gleichförmige Flächenlast

Einzellasten auf Brettstapelelementen werden z.B. durch Stützen verursacht. Der Ansatz von Einzellasten auf Decken aus Brettstapelelementen wird auch in DIN V ENV 1991 (Eurocode 1, Einwirkungen auf Tragwerke) [60] und in der zukünftigen DIN 1055 (Lastannahmen für Bauten) gefordert. Hiernach müssen Deckenbauteile für eine Einzellast Q_k , die an einer beliebigen Stelle einwirken kann, bemessen werden. Der Betrag der charakteristischen Einzellast Q_k richtet sich nach der Kategorie von Gebäudeflächen (z.B. Wohn- oder Büroflächen) und darf auf einer quadratischen Aufstandsfläche mit einer Seitenlänge von 50 mm angesetzt werden. Beim Nachweis von Einzellasten auf Brettstapelelementen tritt das Problem der Lastverteilung rechtwinklig zur Spannrichtung auf. Ein wesentlicher Teil der Simulationen zielte darauf, die Lastverteilung unter Einzellasten innerhalb der Brettstapelelemente zu untersuchen und die Ergebnisse in Form von Bemessungsgleichungen darzustellen.

Die Simulation der Brettstapelelemente unter einer gleichförmigen Flächenlast entspricht der bisher üblichen Bemessungssituation von Bauteilen.

Brettstapelelemente mit ungestoßenen Lamellen wurden nur mit einer Belastung durch eine zentrische Einzellast simuliert, um das Phänomen der Lastausbreitung zu untersuchen. Die ungestoßenen Lamellen von Brettstapelelementen unter einer gleichförmigen Flächenlast weisen infolge der mechanischen Verbindung durch die Nägel eine quasi gleiche Biegelinie auf. Die Lamellen dieser Brettstapelelemente können als parallel geschaltete Federn betrachtet werden. Die Verformung und die Biegerandspannung der Elemente können mit Hilfe der technischen Biegelehre ([33] und [34]) bestimmt werden. Die Beanspruchung der Nägel auf Abscheren ist in diesen Fällen vernachlässigbar gering.

Weiterhin wurden Brettstapelelemente mit gestoßenen Lamellen unter Einzellasten und Flächenlasten simuliert. Für die Simulationen wurden folgende Stoßvarianten der Lamellen innerhalb eines Brettstapelelementes gewählt:

- wechselseitig gestoßene Lamellen
- wandernd gestoßene Lamellen
- zufällig gestoßene Lamellen

Die Stoßvarianten der Lamellen in den Brettstapelelementen sind in Bild 3- 22 dargestellt.

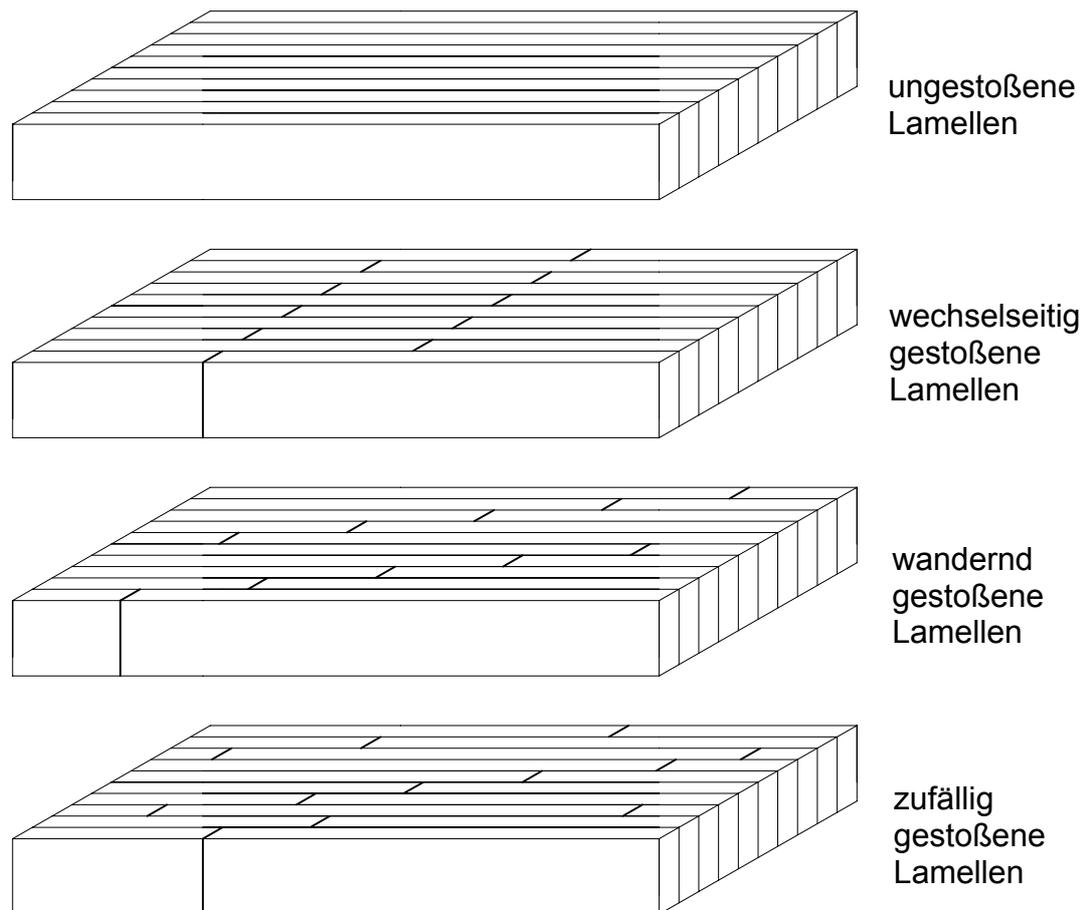


Bild 3- 22 Stoßvarianten der Lamellen in Brettstapelelementen

Die regelmäßigen Stoßvarianten wurden so gewählt, dass jeder Lamellenstrang einen Stoß erhält. Bei den zufällig verteilten Stößen können durchlaufende Lamellen und maximal zwei Stöße pro Lamellenstrang vorhanden sein. In einigen Veröffentlichungen zum Thema Brettstapelbauweise werden andere Stoßmuster vorgeschlagen [2]. So wird z.B. nur jede zweite Lamelle mittig gestoßen, jeder Lamellenstrang mit zwei Stößen (wandernd) versehen oder das Stoßmuster einfach mittig- zweifach im Drittelpunkt aufgezeigt. Da es unmöglich war, die sehr große Anzahl von möglichen Stoßmustern der Lamellen in Brettstapelelementen zu untersuchen, mussten die Simulationen auf wenige, praktikable Stoßmuster reduziert werden. Die Lamellen werden gestoßen, um die Brettstapelelemente praktisch ohne Verschnitt herstellen zu können, da in der Regel die Länge der Rohware (Seitenbretter) nicht mit der Länge der Brettstapelelemente übereinstimmt. Ist die Rohware länger als das herzustellen Brettstapelelement, kann die überstehende Lamelle am Anfang des nächsten Lamellenstranges verwendet werden, so dass auch in diesem Fall Brettstapelelemente mit gestoßenen Lamellen entstehen. Somit wurden bei der Wahl der

Stoßmuster diejenigen nicht berücksichtigt, die durchgehende Lamellen aufwiesen. Bei regelmäßigen Stoßmustern erschien es sinnvoll, nicht mehr als einen Stoß pro Lamellenstrang zuzulassen, da die Brettstapelelemente infolge der verdichteten Stoßanordnung eine deutlich geringere Biegesteifigkeit aufweisen und dieser negative Effekt nicht durch eine entsprechende Holzersparnis zu rechtfertigen ist.

3.4.2.1. Wechselseitig gestoßene Lamellen

Bei der wechselseitigen Anordnung der Stöße wurden die Lamellen in jedem Lamellenstrang gestoßen. Die Lage der Lamellenstöße wurde anhand praxisnaher Überlegungen gewählt. Einerseits sollten die Stöße nicht zu nah am Auflagerbereich liegen, da sonst Probleme mit der Vernagelung und somit dem kraftschlüssigen Verbund der Lamellen infolge der geringen Nagelanzahl auftreten würden. Andererseits sollten die Stöße nicht zu weit in Feldmitte angeordnet werden, damit sich in der Mitte des Brettstapelelementes keine Schwachstelle in Form einer sehr weichen Drehfeder ausbildet und das System kinematisch wird. Unter diesen Gesichtspunkten wurden die Stöße bei wechselseitig gestoßenen Lamellen in den Bereichen $l/3$, $l/4$ und $l/5$ angeordnet. Die Lage der Stöße vom Auflager aus ist mit l' bezeichnet und wurde als Simulationsparameter eingeführt. Ferner wurde angenommen, dass die Stöße immer symmetrisch zu Mittelachse angeordnet sind. Die geometrische Größe l' in Brettstapelelementen mit wechselseitig gestoßenen Lamellen ist in Bild 3- 23 dargestellt.

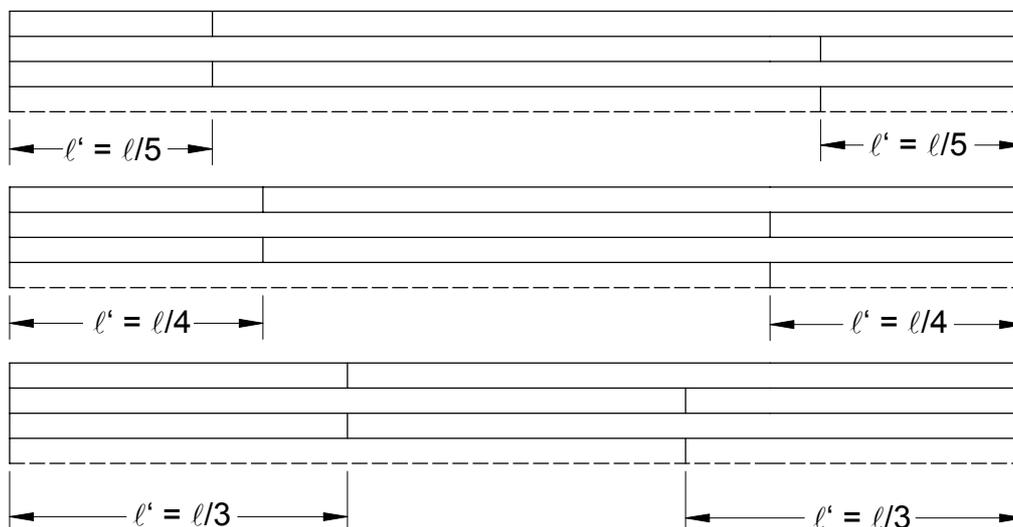


Bild 3- 23 Stoßanordnung bei wechselseitig gestoßenen Lamellen, Draufsicht

Für die Simulation von Brettstapelelementen mit wechselseitig gestoßenen Lamellen wurden für jeden Lamellenstrang die mechanischen Eigenschaften von zwei unabhängigen Lamellen verwendet, d.h. es mussten für jeden Lamellenstrang zwei Lamellen generiert werden.

3.4.2.2. Wandernd gestoßene Lamellen

Die Annahmen, die bei den wechselseitig gestoßenen Lamellen getroffen wurden, treffen zum Teil auch bei den Brettstapelelementen mit wandernd gestoßenen Lamellen zu. So werden die Lamellen in jedem Lamellenstrang gestoßen. Die Übergreifungslänge der Lamellen wurde unter den gleichen Gesichtspunkten wie bei den wechselseitig gestoßenen Lamellen bestimmt. Die Stöße sollten nicht zu dicht aufeinander folgen, damit eine kraftschlüssige Vernagelung der Lamellen möglich ist. Werden die Übergreifungslängen zu groß gewählt, erhält man unter der Annahme, dass die Übergreifungslängen gleichmäßig im Brettstapelelement verteilt sind, ein Brettstapelelement mit wechselseitig gestoßenen Lamellen. Als Maß für die Übergreifungslänge der Lamellen wurden $l/4$ und $l/6$ gewählt, was als Simulationsparameter $l_{\bar{u}}$ aufgenommen wurde. Die Brettstapelelemente wurden so generiert, dass das Reststück einer Lamelle als Anfangsstück des nächsten Lamellenstranges verwendet wurde. Diese Aufbauvariante ist sinnvoll, wenn die Rohware (Seitenbretter) mindestens um die Übergreifungslänge $l_{\bar{u}}$ länger als das Brettstapelelement ist, damit der Verschnitt der Rohware minimiert werden kann. In Bild 3- 24 sind Brettstapelelemente mit wandernd gestoßenen Lamellen, die Definitionen der Übergreifungslängen und die Anordnung der Lamellen dargestellt.

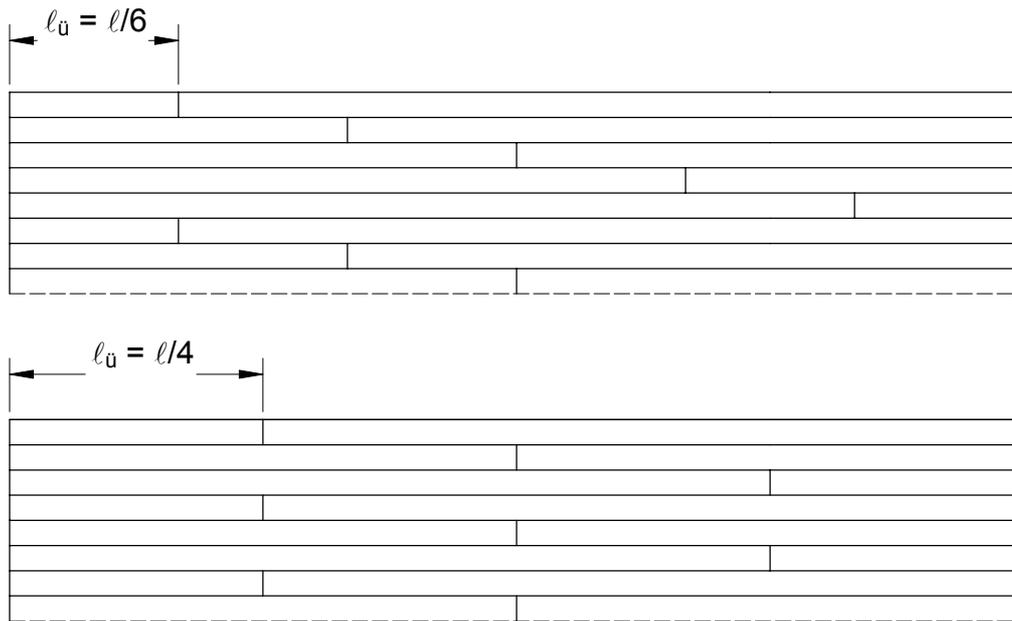


Bild 3- 24 Brettstapelelemente mit wandernd gestoßenen Lamellen, Draufsicht

3.4.2.3. Zufällig gestoßene Lamellen

Die Simulation von Brettstapelelementen mit zufällig verteilten Stößen wurde aus zweierlei Gründen durchgeführt: Einerseits ist dies die Herstellungsvariante, bei der praktisch kein Verschnitt der Rohware anfällt und somit die wohl preisgünstigsten, nicht sichtbaren Brettstapelelemente hergestellt werden können. Andererseits zeigen Brettstapelelemente mit zufällig gestoßenen Lamellen oft die schlechtesten Trag- und Verformungseigenschaften. Brettstapelelemente mit zufällig gestoßenen Lamellen stellen daher die untere Grenze der Vielfalt möglicher Aufbauten dar.

Über die statistische Verteilung der Längen von Seitenbrettern gibt es keine Untersuchungen. Die Länge der Seitenbretter hängt z.B. von dem Durchmesser, der Länge und der Abholzigkeit des Baumstammes ab, so dass es auch regionale Unterschiede geben kann. In modernen Sägewerken werden die Seitenbretter optisch erfasst, vermessen und in Rastern von 50 cm automatisch gekappt. Seitenbretter, die kürzer als 2,5 m sind, werden für Palettenholz oder zum Zerspanen für die Herstellung von Hackschnitzeln verwendet. In kleineren Sägewerken erfolgt die Auslese der Seitenbretter oft visuell, unterliegt aber grundsätzlich den gleichen Gesetzmäßigkeiten wie bei den großen, automatisierten Sägewerken. Nach mündlicher Aussage dreier unabhängiger Sägewerker gibt es keine signifikanten Mengenunterschiede der einzelnen Längenfraktionen von Seitenbrettern.

Aufgrund dieser Aussagen wurden die Längen der Seitenbretter als gleichverteilt angenommen. Diese Annahme der gleichverteilten Längen wird unterstützt durch Plate [61], der schreibt: „Die Gleichverteilung wird häufig verwendet, wenn eine nach beiden Seiten begrenzte, aber ansonsten unbekannte Verteilungsfunktion vorausgesetzt wird.“

Als untere Grenze der Lamellenlängen wurde 2,50 m angenommen, die obere Grenze lag bei 4,50 m (vgl. Abschnitt 3.1). Für jede Simulation wurden die Lamellenlängen mit Gleichung (3- 18) neu generiert.

$$l_{(f_u)} = 2,0 \cdot f_u + 2,50 \quad (3- 18)$$

Hierin bedeuten:

- f_u gleichverteilte Zufallszahl, die zwischen 0 und 1 liegt
- 2,0 variable Länge der Lamellen [m]
- 2,5 Grundlänge der Lamellen [m]

In Anlehnung an die Herstellungspraxis wurde der erste Lamellenstrang des Brettstapelelementes ungestoßen ausgeführt, weiterhin wurden maximal zwei Stöße pro Lamellenstrang zugelassen. Wie schon bei den wandernd gestoßenen Lamellen wurden auch bei den zufällig gestoßenen Lamellen immer die Reststücke der Lamellen als Anfangsstücke des folgenden Lamellenstrangs verwendet. Die Lage der Stöße innerhalb der Brettstapelelemente wurde nicht nachträglich manipuliert, so dass auch Stöße in zwei Lamellensträngen nebeneinander liegen oder sich Bereiche mit verdichteter Stoßanordnung ausbilden konnten.

In Bild 3- 25 sind zwei Brettstapelelemente mit zufällig gestoßenen Lamellen dargestellt. Die Stöße innerhalb der Brettstapelelemente sind als Punkte gekennzeichnet.

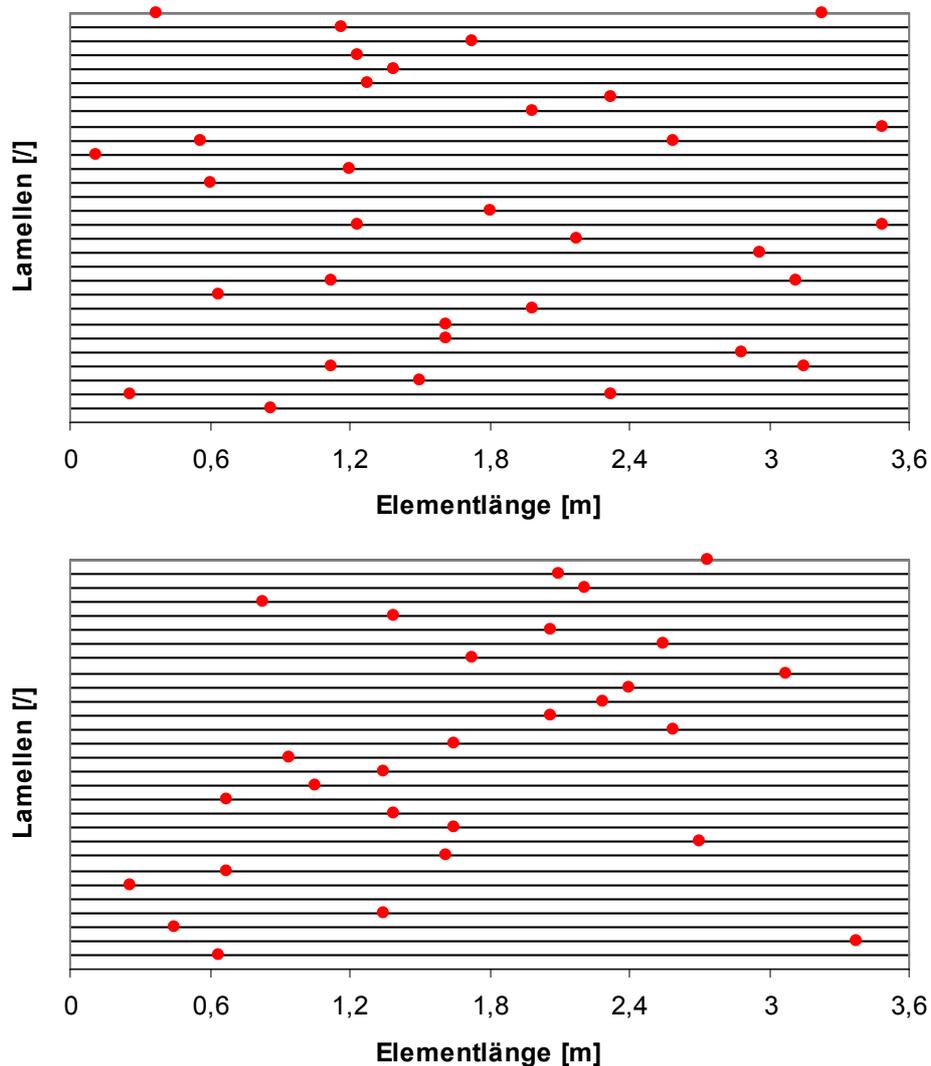


Bild 3- 25 Simulationsbeispiele von zwei Brettstapelementen mit zufällig gestoßenen Lamellen, Draufsicht

3.4.3. Grundlage der Simulationen

Die Simulation der Brettstapelemente erfolgte teilautomatisiert mit Hilfe des Finite-Elemente-Programms ANSYS. Eine teilautomatisierte Simulation von Brettstapelementen bedeutet, dass alle für eine Simulationscharge erforderlichen Dateien auf einem lokalen PC generiert, auf einen Großrechner übertragen und mittels einer Stapeldatei (Batch-Job) durchgerechnet wurden. Die Ergebnisdateien der Simulationen mussten wiederum vom Großrechner auf einen lokalen PC übertragen werden, um dort zusammengefasst und ausgewertet werden zu können.

Für eine Simulationscharge mussten Dateien mit den Materialeigenschaften der Lamellen und bei den Simulationen mit nichtlinearen Last-Verschiebungs-Kurven auch Dateien mit den über Polygonzügen angenäherten Last-Verschiebungs-Kurven der Nägel generiert werden. Weiterhin wurden Dateien mit den Mittelwerten der Materialeigenschaften der Lamellen und Dateien mit den Simulationsparametern (Lamellenquerschnitt, Nagelabstand etc.) angelegt. Bei der eigentlichen Erstellung der Eingabedateien für das FE-Programm ANSYS wurden die Parameter aus den zuvor erzeugten Dateien entnommen.

Das im Folgenden beschriebene Vorgehen ist in Bild 3- 26 anhand eines Flussdiagramms veranschaulicht.

Das Programm, mit dem die Materialeigenschaften generiert wurden (EMO.EXE), wurde nach den in Abschnitt 3.1 dargestellten Grundlagen mit Hilfe der Programmiersprache BASIC und eines entsprechenden Power-Basic Compilers erstellt. Bei dem Programm EMO.EXE besteht die Möglichkeit, die Anzahl der Lamellen innerhalb eines Brettstapelelementes und die Anzahl der gewünschten Simulationen interaktiv einzugeben. Die Eingabe der Anzahl der Lamellen innerhalb eines Brettstapelelementes war wichtig, da z.B. in einem Brettstapelelement mit wechselseitig gestoßenen Lamellen doppelt so viele Lamellen verwendet wurden wie in einem Brettstapelelement mit ungestoßenen Lamellen und gleicher Anzahl von Lamellensträngen. Über die Anzahl der Simulationen wurde festgelegt, wie viele Simulationen für die entsprechende Simulationscharge durchgeführt werden sollten. Entsprechend der Anzahl der Simulationen wurden mit dem Programm EMO.EXE n-Dateien mit dem Namen „Emo_(i).DAT“ angelegt, wobei der ganzzahlige Zähler von $i = 1$ bis n läuft. In den Dateien „Emo_(i).DAT“ standen die Materialeigenschaften der Lamellen in Spaltenform aufgelistet. Wie in Abschnitt 3.1 dargestellt, wurden 4,5 m lange virtuelle Lamellen in 30 jeweils 150 mm lange Segmente unterteilt, denen miteinander korrelierte, unterschiedliche Materialeigenschaften zugewiesen wurden. In den Dateien „Emo_(i).DAT“ finden sich drei Spalten mit den Elastizitätsmoduln, den Zugfestigkeiten und den Ästigkeiten der 150 mm langen Lamellensegmente. Die Anzahl der Datenzeilen der Dateien richtet sich nach der Anzahl der simulierten Lamellen und berechnet sich aus $30 \cdot \text{Lamellenanzahl}$.

Neben den Dateien mit den Materialeigenschaften der Lamellensegmente wurden auch Dateien mit den mittleren Materialeigenschaften der ganzen Lamellen angelegt. In diesen Dateien „Allg_(i).DAT“ finden sich Angaben über die Anzahl der simulierten Lamellen, die Mittelwerte der Elastizitätsmoduln und der Mittelwert der Normalrohdichten der simulierten Lamellen. Diese Dateien dienten nur zur Überprüfung der Simulationen und wurden nicht weiter verwendet.

Für die Simulationen mit dem nichtlinearen Trag- und Verformungsverhalten der Nagelverbindungen mussten noch die Stützstellen der angenäherten Polygonzüge an die Last-Verschiebungs-Kurven von virtuellen Holz-Holz-Nagelverbindungen generiert werden. Die Dateien mit den Stützstellen wurden mit Hilfe einer SAS-Makro-Programmierung mit den Grundlagen aus Abschnitt 3.3.3.4 erstellt. Die Anzahl der virtuellen Nägel pro Datei wurde pauschal auf 1800 Stück festgesetzt, da das SAS-Makro eine sehr kurze Laufzeit aufwies und die 1800 virtuellen Nägel für alle Fälle ausreichten. Mit dem SAS-Makro wurden n-Dateien „Na_(i).DAT“ angelegt, in denen sich die Stützstellen, d.h. die Wertepaare (Kraft/Weg), des angenäherten Polygonzuges für jeweils 1800 virtuelle Nägel befanden.

Nachdem die Materialeigenschaften der virtuellen Lamellen und die Nageleigenschaften generiert waren, konnten die eigentlichen Eingabedateien für das FE-Programm ANSYS erstellt werden. Die Programme zur Erstellung der Eingabedateien wurden analog zu den Materialeigenschaften mit Hilfe der Programmiersprache BASIC programmiert. Es wurden für jede Stoßvariante der Lamellen (ungestoßene, wechselseitig gestoßene, wandernd gestoßene und zufällig gestoßene Lamellen) eigene Programme erstellt (Stoßvariante.EXE). In diesen Programmen können abhängig von der Simulationsart folgende Eingaben getätigt werden:

- Stützweite des Brettstapelements (ℓ)
- Querschnittswerte der Lamellen (t/h)
- Abstand der Nägel untereinander (a_1)
- Durchmesser der Nägel (d_N)
- Betrag der Lasten
- Lage der Stöße, Übergreifungslänge (ℓ')

Nach der zuvor gewählten Anzahl der zu simulierenden Brettstapelemente wurden n-Dateien in der Form „Name(i).DAT“ mit den entsprechenden Datensätzen angelegt. Die einzelnen Simulationschargen wurden alphabetisch benannt, d.h. „Name“ war für Charge 1 „A“, für Charge 2 „B“ usw .

Die Vorgehensweise bei der Generierung der Dateien für die Simulationen und deren Auswertung ist in Bild 3- 26 als Flussdiagramm dargestellt.

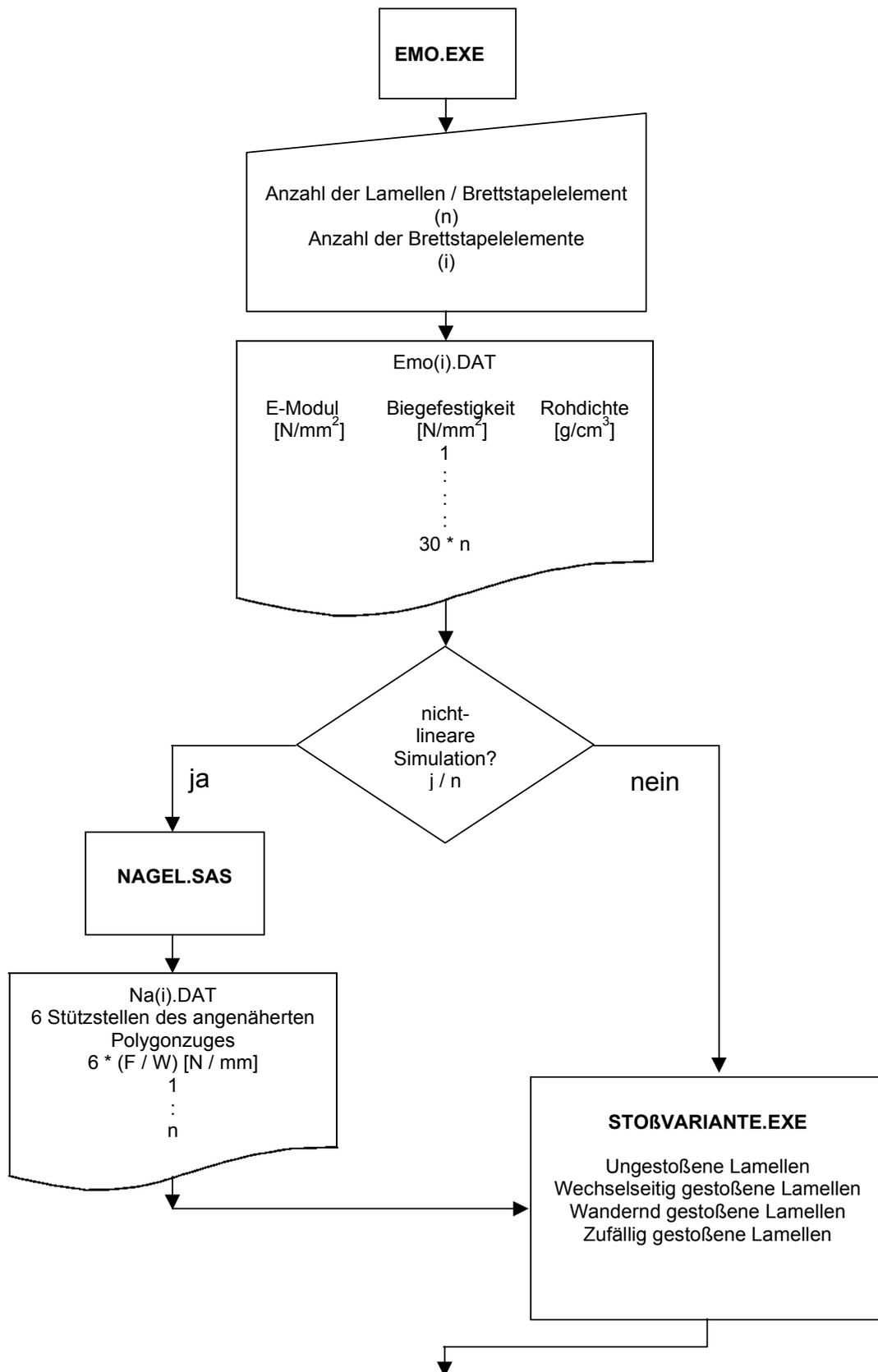


Bild 3- 26 Flussdiagramm der Simulationen

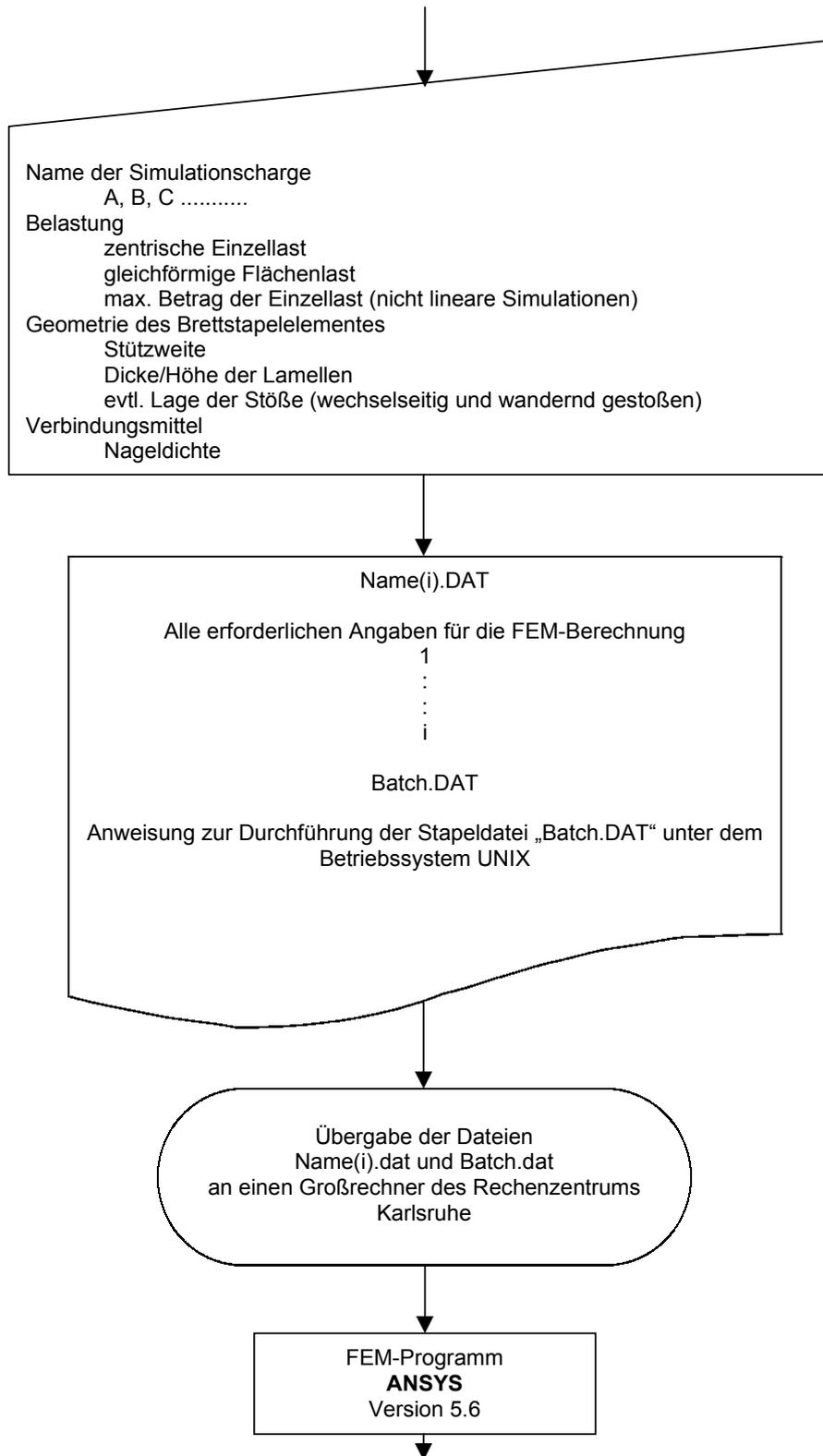


Bild 3- 26 Flussdiagramm der Simulationen

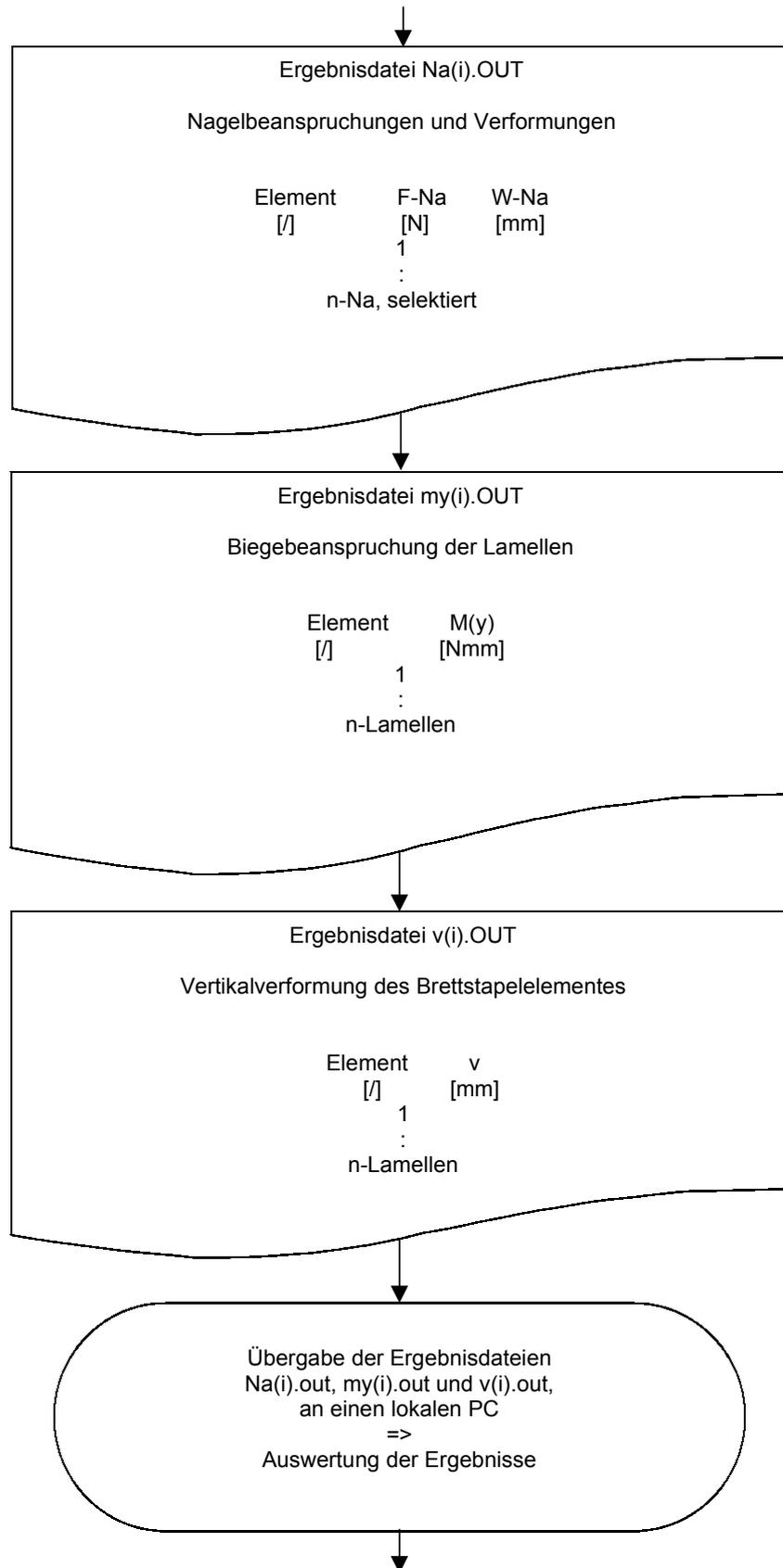


Bild 3- 26 Flussdiagramm der Simulationen

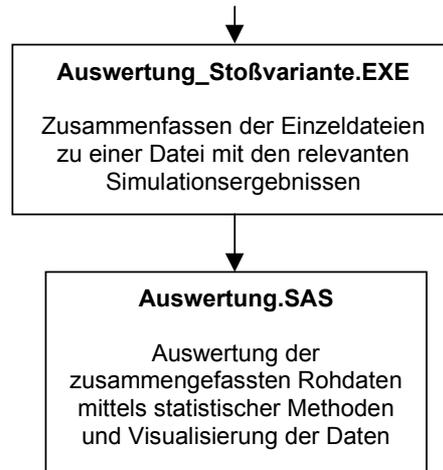


Bild 3- 26 Flussdiagramm der Simulationen

Entsprechend den Eingaben wurde ein Knotenraster in einer X-Y-Ebene angelegt, zwischen denen die finiten Elemente mit den zugehörigen Materialeigenschaften eingebaut wurden. Die Knoten für das Finite-Element-System wurden in X-Richtung in Abständen von 3,75 cm angeordnet, in Y-Richtung entsprach der Abstand der Knoten untereinander der Lamellendicke t_{Lam} . Der Abstand der Knoten in X-Richtung wurde unter verschiedenen Gesichtspunkten gewählt. Einerseits sollten die Knoten so angeordnet werden, dass der Abstand untereinander einem Bruchteil von 15 cm entsprach, da die Materialeigenschaften der Lamellen in Längsrichtung in diesem Bereich variiert wurden ($3,75 \text{ cm} = 15 \text{ cm} / 4$). Andererseits musste die Knotendichte des Finite-Elemente-Netzes so gewählt werden, dass die Berechnungsergebnisse gegen einen Grenzwert streben, d. h. die Netzdichte sollte nicht zu groß (ungenauere Ergebnisse), aber auch nicht zu eng (zu hohe Rechenzeiten ohne signifikante Verbesserung der Ergebnisse) gewählt werden. Im Vorfeld der Simulationen wurden Vergleichsrechnungen durchgeführt, die zeigten, dass der Knotenabstand zwischen 7,5 cm und 3,75 cm liegen kann, ohne dass sich wesentliche Änderungen der Ergebnisse einstellen. Durch die hohe Knotendichte wurde das Einbringen von Lamellenstößen vereinfacht, da die Stöße durch das Herausschneiden von Elementen simuliert wurden. Hierdurch konnten die Lamellenelemente, die sich an der Stoßkoordinate befanden, zwischen den beiden entsprechenden benachbarten Knoten herausgeschnitten werden, ohne dass weitere Hilfskonstruktionen notwendig waren.

Die Belastung der Brettstapelelemente erfolgte mittels Knotenlasten. Bei Brettstapelelementen, die durch zentrische Einzellasten beansprucht wurden, wurde die

Belastung auf sechs Knoten (zwei Lamellen, jeweils drei Knoten) verteilt. Somit ergab sich eine Lastaufstandsfläche der Einzellast von $2 t_{Lam}$ in Querrichtung und 11,25 cm in Längsrichtung. Dies entspricht etwa dem Mittelwert zwischen den in Eurocode 1 vorgeschlagenen 5 cm / 5 cm und den Querschnittsabmessungen einer Stütze. Die Simulation einer gleichförmigen Flächenlast wurde ebenfalls über Knotenlasten realisiert. Die Knotenlasten für eine gleichförmig verteilte Flächenlast q kann über Gleichung (3- 19) berechnet werden:

$$F_{Knoten} = q \cdot \ell_K \cdot t_{Lam} \quad (3- 19)$$

Hierin bedeuten

q gleichförmig verteilte Flächenlast [N/m^2]

ℓ_K Knotenabstand [m]

t_{Lam} Dicke der Lamelle in [m]

F_{Knoten} Knotenlast in [N]

Die Vernetzung (Lage der Knoten) der Lamellen, die Anordnung der zentrischen Einzellasten auf die Brettstapelelemente und die angenommene Aufstandsfläche sind in Bild 3- 27 dargestellt.

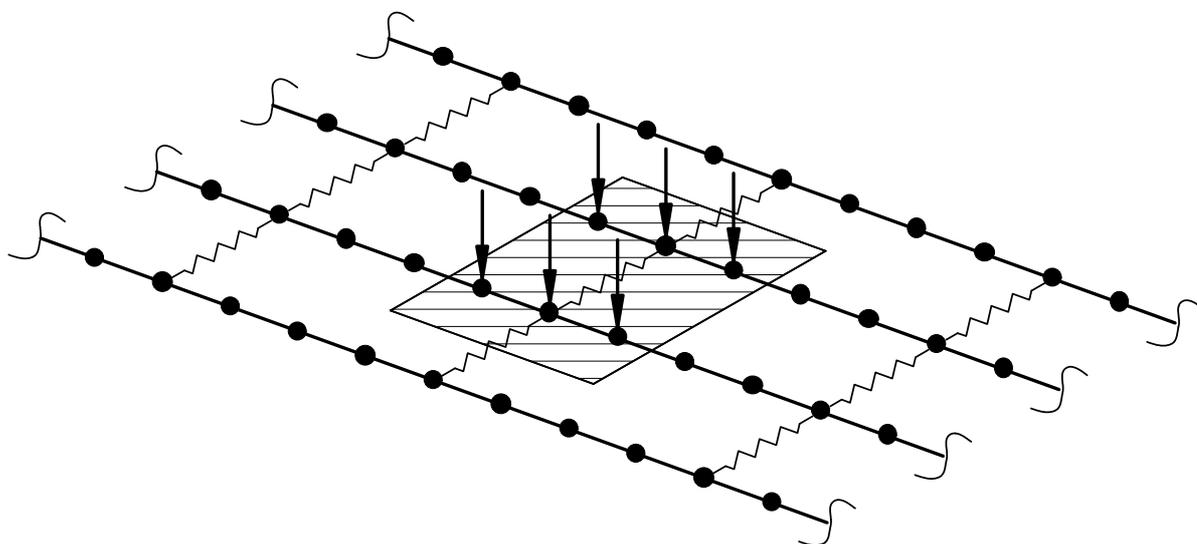


Bild 3- 27 Knoten der Brettstapelelemente und Belastung

Die erforderliche Anzahl der Simulationen eines Brettstapelsystems wurde über Proberechnungen von Haberer ermittelt [62]. Hierfür wurden Brettstapelsysteme mit ungestoßenen Lamellen und unter zentrischer Einzellast 500, 650 und 800 mal simuliert und ausgewertet. Die Änderungen der Mittelwerte und der 5%-Fraktilwerte der Materialeigenschaften und der Berechnungsergebnisse waren mit der Zunahme der Simulationsanzahl so gering, dass bei den Simulationen mit linear elastischem Tragverhalten der Nagelverbindungen pro Simulationscharge jeweils 500 Simulationen durchgeführt wurden. Die Chargen der Simulationen mit nichtlinearem Tragverhalten der Nagelverbindungen bestanden aus jeweils 100 Simulationen, da bei diesen Berechnungen die Last in n -Schritten aufgebracht wurde und das System n -mal durchgerechnet werden musste. Hierdurch ergab sich im Vergleich zu den Berechnungen mit dem linear elastischen Tragverhalten der Nagelverbindungen ein enormer zeitlicher Mehraufwand (i.d.R. Faktor 10 pro System). Aufgrund des enormen zeitlichen Mehraufwandes und den begrenzten Rechnerkapazitäten wurden für die Simulationen mit nichtlinearem Tragverhalten der Nagelverbindungen 100 Brettstapelsysteme pro Simulationscharge berechnet.

3.5 Zusammenstellung der Simulationsparameter

Nachfolgend sind die Simulationsparameter der Brettstapelemente unter Plattenbeanspruchung zusammengestellt. Neben den zuvor dargestellten Parametern wurde noch der Nagelabstand a_1 der Nägel untereinander in Faserrichtung variiert. Der Nagelabstand a_1 ist definiert als der Abstand der Nägel untereinander der sich ergeben würde, wenn die Nägel eines Zick-Zack-Nagelmusters in eine horizontale Reihe geschoben wären. Die Definition des Nagelabstandes a_1 ist in Bild 3-28 dargestellt. Als Grundmaß des Abstandes a_1 wurde nach Aussage zweier Brettstapelhersteller 150 mm angenommen. Um den Einfluss des Nagelabstandes a_1 auf das Trag- und Verformungsverhalten von Brettstapelementen abschätzen zu können, wurden von dem Grundmaß 75 mm abgezogen bzw. addiert, so dass sich für a_1 die Werte 75 mm, 150 mm und 225 mm als Simulationsparameter ergaben. Von Krämer wurden im Rahmen von Vorversuchen z.T. größere Nagelabstände als 225 mm für die Prüfkörper gewählt [13], die dann aufgrund der augenscheinlich zu geringen Nageldichte wieder verworfen wurden. Haberer simulierte Brettstapelemente mit ungestoßenen Lamellen unter zentrischer Einzellast mit einem Nagelabstand von $a_1 = 300$ mm [62]. Diese Simulationsvariante wurde bei den Brettstapelementen mit gestoßenen Lamellen nicht wiederholt.

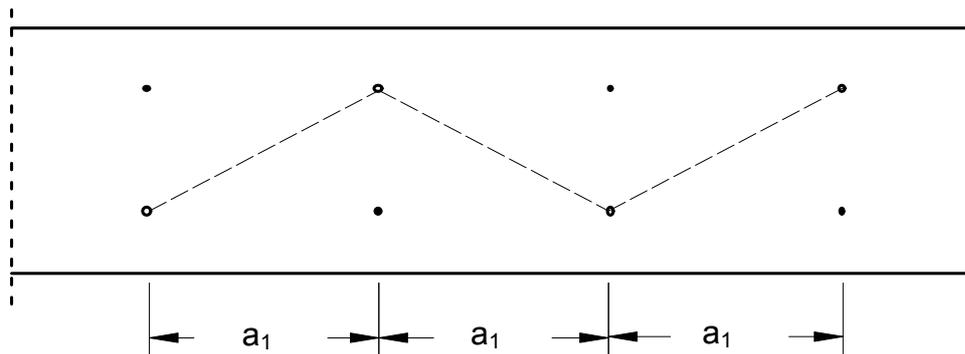


Bild 3- 28 Definition des Nagelabstandes a_1

- Lamellen

$$\ell = 3600 \text{ mm}$$

$$h = 140 \text{ mm}, 160 \text{ mm und } 180 \text{ mm}$$

$$t = 30 \text{ mm}, 35 \text{ mm und } 40 \text{ mm}$$

- Nägel

$$3,4 \times 90 \text{ mm}, 3,8 \times 100 \text{ mm und } 4,2 \times 120 \text{ mm}$$

- Nagelabstände parallel zur Faserrichtung a_1

$$75 \text{ mm}, 150 \text{ mm}, 225 \text{ mm und } 300 \text{ mm}$$

- Stoßvarianten der Lamellen

ungestoßen, wechselseitig, wandernd und zufällig gestoßen

- Stoßlage (ℓ'), wechselseitig gestoßene Lamellen

$$\ell/3, \ell/4 \text{ und } \ell/5$$

- Übergreifungslänge ($\ell_{\text{Ü}}$), wandernd gestoßene Lamellen

$$\ell/4, \ell/6$$

- Belastung

Zentrische Einzellast (F) und gleichförmige Flächenlast (q)

- Last-Verformungsverhalten der Nagelverbindungen

linear elastisch, nichtlinear

Die Simulationspläne finden sich im Anhang A.

4. Ergebnisse der Simulationen

4.1 Simulationen mit linear elastischem Tragverhalten der Nagelverbindungen

Als Simulationsergebnisse wurden die elastischen Durchbiegungen, die Biegebeanspruchung der Lamellen und die Nagelbeanspruchungen ausgewertet. Für jede Konfiguration eines Brettstapelelementes (vgl. Simulationspläne im Anhang A) lagen jeweils 500 Ergebnisse der o.g. Werte vor. Aus diesen 500 Ergebnissen wurden die Mittelwerte der Durchbiegungen und die 98%-Fraktilwerte der Biegebeanspruchung der Lamellen sowie der Nagelbeanspruchung berechnet. Aus den 36 Simulationschargen von Brettstapelelementen mit ungestoßenen Lamellen unter zentrischer Einzellast konnten z.B. 36 unterschiedliche Mittelwerte der elastischen Durchbiegung berechnet werden. Die Abhängigkeit der Mittel- und Fraktilwerte der Simulationsergebnisse von den Simulationsparametern, wie z.B. der Lamellengeometrie oder der Nageldichte, wurde durch multiple, nichtlineare Regressionsanalysen [66] bestimmt.

4.2 Vorgehensweise zur Auswertung der Simulationsergebnisse

Die Berechnungen einer Simulationscharge wurden mittels eines „Batch-Jobs“ (automatisches Durchrechnen vieler einzelner Rechnungen) an dem UNIX-Großrechner RZANW1 des Rechenzentrums der Universität Karlsruhe durchgeführt. Bei jedem der 500 Berechnungsdurchläufe einer Simulationscharge wurden Ergebnisdateien mit den maßgebenden Ergebnissen angelegt. In jedem Berechnungsdurchlauf wurden drei Ergebnisdateien mit den Beträgen der Maximalwerte der Biegemomente der Lamellen, der Durchbiegungen und der Nagelbeanspruchungen angelegt:

- Name_my_i.OUT (Momentenbeanspruchung der Lamellen)
- Name_u_i.OUT (Verformung des Brettstapelelementes)
- Name_Na_i.OUT (Beanspruchung der Nägel)

Wegen der Vielzahl der finiten Elemente, aus denen ein virtuelles Brettstapelelement besteht, mussten diejenigen Elemente mit den maximalen Beträgen der Ergebnisse bestimmt und ausgegeben werden. Bei den Ergebnisdateien mit den Biegemomenten der Lamellen und den vertikalen Verformungen wurden in Brettstapelelementmitte quer zur Lamellenrichtung Finite Elemente für die Biegemomente und Knoten für die vertikale Verformung selektiert und deren Beträge mit zugehöriger Element- oder Knotennummer in die Ergebnisdateien geschrieben. Die Nummern der Finten

Elemente die selektiert werden sollten, wurden im Vorfeld der Simulationen für jede Simulationscharge durch arithmetische Reihen ermittelt. Lamellenstöße wurden durch das Herausschneiden einzelner Finite Elemente im Bereich des Stoßes simuliert. Hierdurch ergaben sich abhängig von der Stoßanordnung unterschiedliche Nummerierungen der Finiten Elemente. Die fortlaufende Nummerierung der Knoten in einem System war dagegen immer gleich. So wurden die zuvor ermittelten Knoten und Elemente selektiert und die zugehörigen Simulationsergebnisse in eine Ergebnisdatei geschrieben. In Bild 4- 1 ist die Lage der selektierten Elemente und Knoten für die Ergebnisdateien dargestellt (Schnitt A-A).

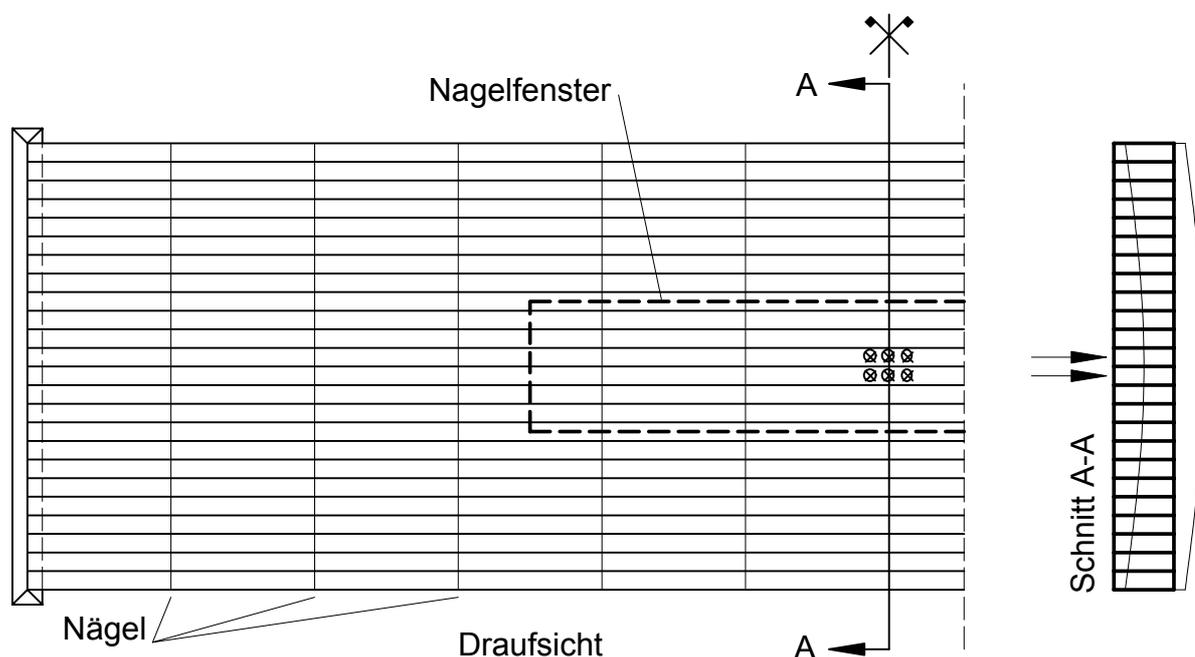


Bild 4- 1 Lage der selektierten Lamellenelemente im Schnitt A-A und Bereich der selektierten Nägel (Nagelfenster); qualitative Verformungsfigur der Lamellen im Schnitt A-A

War die Lage der Elemente mit den maximalen Biegemomenten oder den maximalen Verformungen nicht bekannt (unterschiedliche Stoßanordnungen), wurde in ganzen Bereichen der Brettstapelelemente Finite Elemente und Knoten selektiert und die Beträge der Simulationsergebnisse wurden in die Ergebnisdateien geschrieben.

Die Auswahl der Nägel bzw. der Nagelelemente erfolgte bei Brettstapelelementen mit durchlaufenden Lamellen in einem Bereich von jeweils drei Scherfugen rechts und links der Lasteinleitung mit je fünf Nägeln in den Scherfugen in Längsrichtung (vgl. Bild 4- 1). Bei Brettstapelelementen mit gestoßenen Lamellen wurden die Nagelelemente der mittleren 6 Scherfugen von einem Lamellenstoß bis zum nächsten Lamellenstoß selektiert. Aus den in den Ergebnisdateien aufgelisteten Simulationsergebnissen wurden nachträglich der Größtwert der Simulationsergebnisse

ausgelesen. Auf der Grundlage der maximalen Simulationsergebnisse wurden Gleichungen zur Berechnung der Biege- und Normspannungen der Lamellen, der Verformungen der Brettstapelelemente und der Nagelbeanspruchungen abgeleitet.

4.3 Darstellung der Simulationsergebnisse

Für die Darstellung der Ergebnisse der Simulationen mit dem linear elastischen Tragverhalten von Nagelverbindungen werden hier exemplarisch die Ergebnisse der Simulationen mit zentrischer Einzellast und ungestoßenen Lamellen verwendet. Bei Betrachtung aller Simulationen, d.h. Brettstapelelemente mit gestoßenen und ungestoßenen Lamellen, wurden insgesamt 89 Chargen mit jeweils 500 Einzelsimulationen mit zentrischen Einzellasten durchgeführt. Die Simulationen mit zentrischen Einzellasten und ungestoßenen Lamellen bestanden aus 36 Chargen mit jeweils 500 Einzelsimulationen. Die Simulationsparameter sind in Tabelle 4-1 teilweise dargestellt.

Tabelle 4- 1 Simulationsparameter, zentrische Einzellast, ungestoßene Lamellen

Nr.	Nagelabstand a1 [mm]	Lamellenhöhe h [mm]	Lamellenbreite t [mm]	Nageldurchmesser d [mm]
1	75	140	30	3,4
2	75	140	35	3,8
3	75	140	40	4,2
4	75	160	30	3,4
5	75	160	35	3,8
6	75	160	40	4,2
7	75	180	30	3,4
8	75	180	35	3,8
9	75	180	40	4,2
10	150	140	30	3,4
11	150	140	35	3,8
12	150	140	40	4,2
13	150	160	30	3,4
14	150	160	35	3,8
15	150	160	40	4,2
16	150	180	30	3,4
17	150	180	35	3,8
18	150	180	40	4,2
19	225	140	30	3,4
:	:	:	:	:
28	300	140	30	3,4
:	:	:	:	:
36	300	180	40	4,2

Die Fraktilwerte und die Mittelwerte der Simulationsergebnisse wurden mit Hilfe des Statistikprogrammes SAS berechnet. Das Statistikprogramm SAS bietet zur Berechnung der Fraktil- und Mittelwerte von Datensätzen Prozeduren an [66]. Die

gewählte SAS-Prozedur zur Berechnung der Fraktilewerte berechnet diese auf der Grundlage des Abzählverfahrens. Die Nummer der sortierten Werte der Beobachtungen die für das Abzählverfahren herangezogen wird, berechnet sich durch die Multiplikation der Anzahl der Beobachtungen mit dem Percentil (z.B. 0,05 für die 5%-Fraktile). Für eine Simulationscharge mit 500 Simulationen stellt der 25.-Wert ($500 \times 0,05 = 25$) der sortierten Simulationsergebnisse die 5%-Fraktile dar.

4.3.1. Biegespannungsverteilung

Die Streuung der maximalen Biege- und Randspannungen der Lamellen wird exemplarisch an einer Simulationscharge gezeigt. Hierfür wurde die Charge 16 aus Tabelle 4- 1 gewählt. In Bild 4- 2 sind die maximalen Biege- und Randspannungen der Lamellen infolge einer zentrischen Einzellast von 1,0 kN über die 500 Einzelsimulationen dargestellt. Die 98%-Fraktile weist bei der Charge 16 einen Betrag von $0,833 \text{ N/mm}^2$ auf und ist in Bild 4- 2 als durchgezogene horizontale Linie dargestellt. Der Mittelwert der Biege- und Randspannungen ergibt $0,673 \text{ N/mm}^2$ mit einer Standardabweichung von $0,0820 \text{ N/mm}^2$.

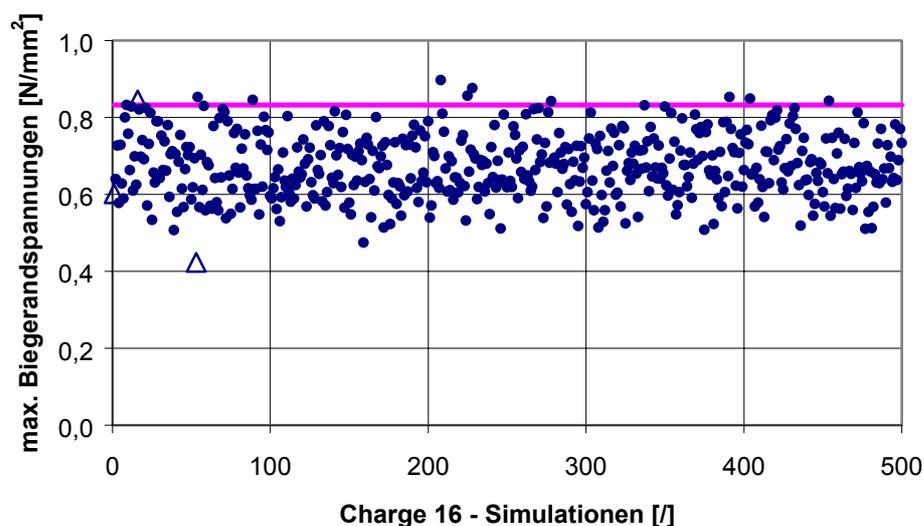


Bild 4- 2 Maximale Biege- und Randspannungen der Lamellen infolge einer zentrischen Einzellast, Charge 16

Die Verteilung der Biege- und Randspannungen quer zur Spannrichtung innerhalb eines Brettstapelelementes unter zentrischer Einzellast (vgl. Bild 4- 1, Schnitt A-A) ist beispielhaft an drei simulierten Brettstapelelementen in Bild 4- 3 gezeigt. Es handelt sich bei den gezeigten Beispielen um Brettstapelelemente mit sehr geringen, mittleren und sehr großen maximalen Biege- und Randspannungen. Diese Simulationsbeispiele sind im Bild 4- 2 als „ Δ “ gekennzeichnet. In Bild 4- 3 sind die Biege- und Randspannungen über

die 32 Lamellen der simulierten Brettstapelelemente mit negativen Werten in $[\text{N}/\text{mm}^2]$ aufgetragen; die zugehörigen Säulen im positiven Bereich stellen die mittleren Elastizitätsmoduln der Lamellen in $[\text{N}/\text{mm}^2 \times 10^{-5}]$ dar.

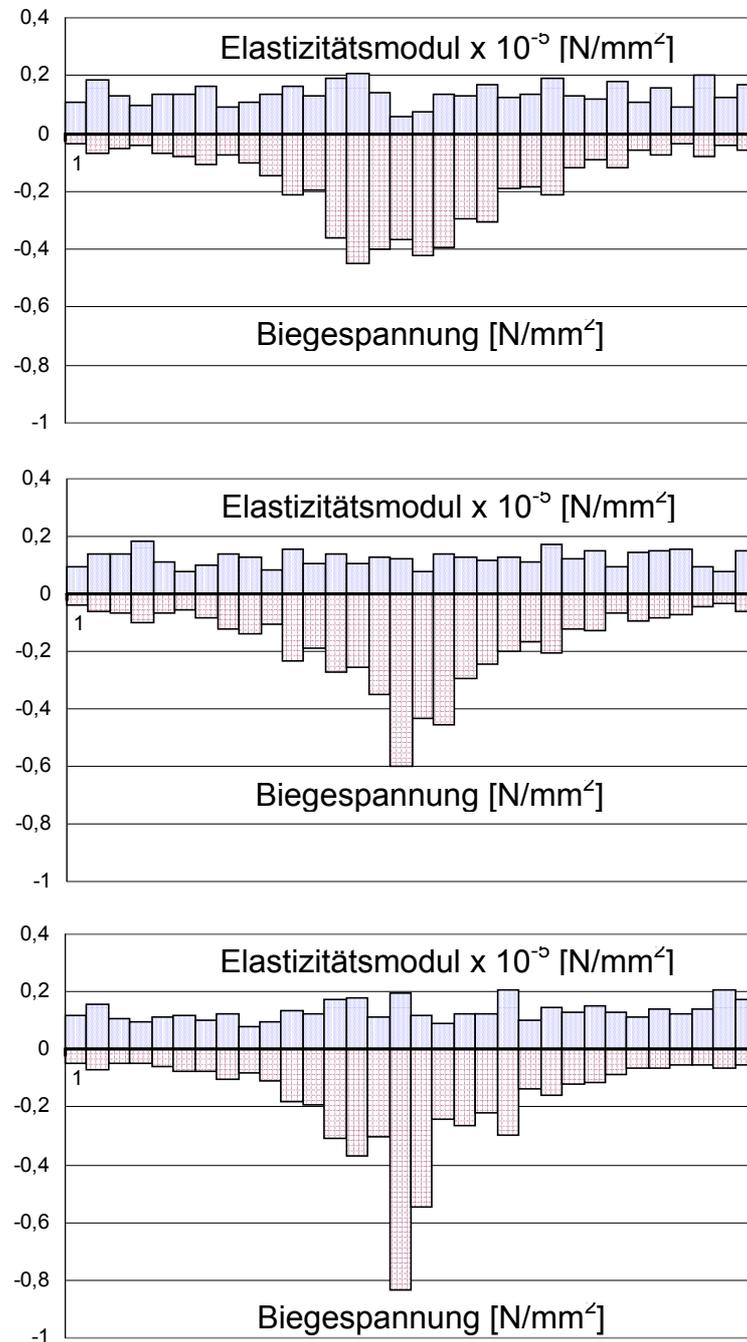


Bild 4- 3 Biegespannungsverteilung quer zur Spannrichtung infolge zentrischer Einzellast und zugehörige mittlere Elastizitätsmoduln der Lamellen, Charge 16

4.3.2. Elastische Verformung der Brettstapelelemente

Die maximalen Beträge der elastischen Verformung der Brettstapelelemente unterliegen innerhalb einer Simulationscharge geringeren Streuungen als die maximalen Biege- und Randspannungen der Lamellen. Dies liegt daran, dass der Einfluss der mittleren Elastizitätsmoduln der einzelnen Lamellen sich nicht so deutlich auf das Verformungsverhalten der Brettstapelelemente auswirkt, da infolge der kontinuierlichen Vernagelung der Lamellen diese nachgiebig miteinander gekoppelt sind. Infolge dieser nachgiebigen Koppelung können Lamellen mit einem hohen mittleren Elastizitätsmodul schwächere Lamellen unterstützen, d.h. es findet eine Lastumlagerung im Brettstapelelement statt. Brettstapelelemente sind hochgradig statisch überbestimmte Tragsysteme, die ein sehr gutmütiges Tragverhalten im Gebrauchszustand zeigen, da Elemente mit höheren Steifigkeiten auch höhere Lasten „anziehen“. Selbst nach dem Versagen einzelner Tragelemente (Lamellen/Nägel) kann das Brettstapelelement durch die Vielzahl von Einzeltragelementen und deren häufige Koppelung durch die Verbindungsmittel weiterhin Lasten abtragen.

Die Streuungen der maximalen elastischen Verformungen der Brettstapelelemente wird analog zu den Biege- und Randspannungen an der Simulationscharge 16 nach Tabelle 4- 1 gezeigt. In Bild 4- 4 sind die maximalen elastischen Verformungen der Brettstapelelemente infolge einer zentrischen Einzellast von 1,0 kN über die 500 Einzelsimulationen dargestellt. Der Mittelwert der Charge 16 weist einen Betrag von 0,427 mm auf (Standardabweichung = 0,0198 mm) und ist in Bild 4- 4 als durchgezogene horizontale Linie dargestellt.

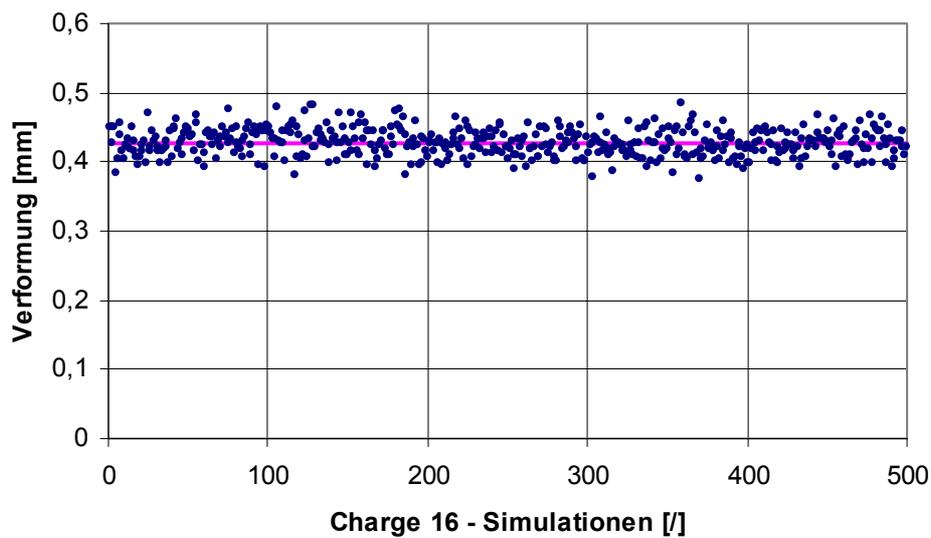


Bild 4- 4 Maximale elastische Verformungen der Brettstapelelemente infolge einer zentrischen Einzellast - Charge 16

Die elastische Verformung von Brettstapelelementen unter zentrischen Einzellasten hängt neben den geometrischen Werten der Lamellen signifikant vom Abstand der Nägel untereinander ab. Neben den Maxima der Durchbiegungen stellen sich abhängig von der Nageldichte trichterförmige Verformungsfiguren quer zur Lamellenlängsrichtung im Brettstapelelement ein (vgl. Bild 4- 5). Brettstapelelemente mit hoher Nageldichte weisen eine kleinere maximale Verformung auf als Brettstapelelemente mit kleiner Nageldichte, bei denen die Verformung wiederum schneller abgebaut wird und sich so ein steilerer Verformungstrichter ausbildet. In Bild 4- 5 ist die Verformungsfigur quer zur Lamellenrichtung bis zur Mittellamelle (vgl. Bild 4- 1, Schnitt A-A) von Brettstapelelementen unter zentrischen Einzellasten in Abhängigkeit der Nagelabstände a_1 beispielhaft dargestellt. Bei den dargestellten Verformungsfiguren handelt es sich um die Simulationsergebnisse der Chargen 1 ($a_1=75$ mm), 10 ($a_1=150$ mm), 19 ($a_1=225$ mm) und 28 ($a_1=300$ mm) nach Tabelle 4- 1, welche mit 14 cm die geringsten Lamellenhöhen aufwiesen und somit die größten Verformungen zeigten.

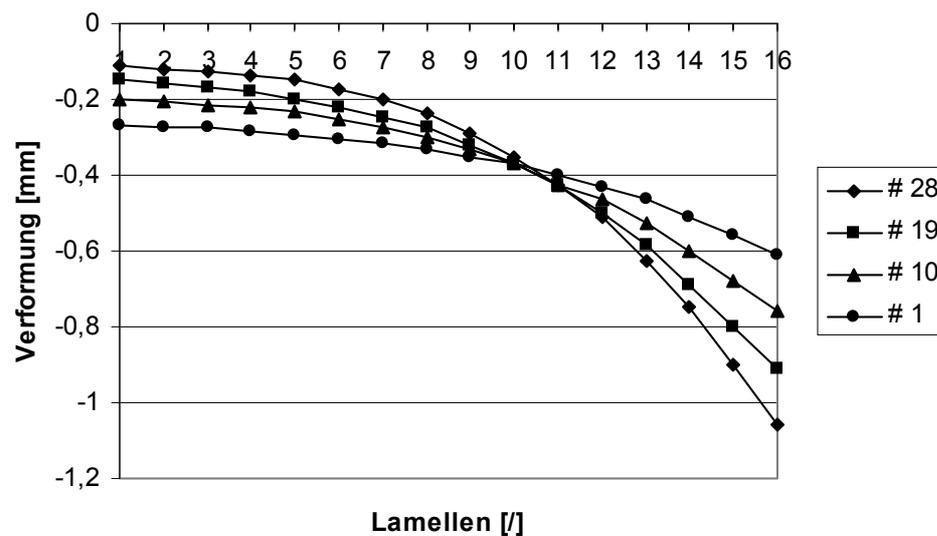


Bild 4- 5 Verformungen der Lamellen im Mittelschnitt quer zur Spannrichtung von Brettstapelelementen mit unterschiedlichen Nageldichten unter zentrischer Einzellast; Randlamelle 1 bis zur belasteten Lamelle 16

4.3.3. Nagelbeanspruchung auf Abscheren

Infolge der Beanspruchung der Brettstapelelemente durch äußere Lasten werden die Nägel auf Abscheren beansprucht. Dies gilt insbesondere bei Brettstapelelementen unter zentrischen Einzellasten mit gestoßenen Lamellen. Bei Brettstapelelementen mit durchlaufenden Lamellen unter zentrischen Einzellasten werden die Nägel gering auf Abscheren beansprucht.

Die Nagelbeanspruchungen sind sehr eng mit den in Abschnitt 4.3.2 gezeigten Verformungen quer zur Lamellenrichtung korreliert. Die Relativverschiebungen zwischen den Lamellen resultieren aus dem Last-Verschiebungs-Verhalten der Nagelverbindungen und hängen eng mit der Nageldichte zusammen. Infolge der geringen Streuungen der Verformungen und der engen Korrelation der Nagelbeanspruchungen mit den Verformungen zeigen auch die Nagelbeanspruchungen eine deutlich geringere Streuung als die Biegerandspannungen der Lamellen. In Bild 4- 6 sind die maximalen Nagelbeanspruchungen auf Abscheren infolge einer zentrischen Einzellast von 1,0 kN über 500 Einzelsimulationen dargestellt (Charge 16). Der Mittelwert liegt bei einem Betrag von 81,4 N, die Standardabweichung liegt bei 4,95 N. Die 98%-Fraktile liegt bei 91,7 N und ist in Bild 4- 6 als horizontale durchgezogene Linie dargestellt.

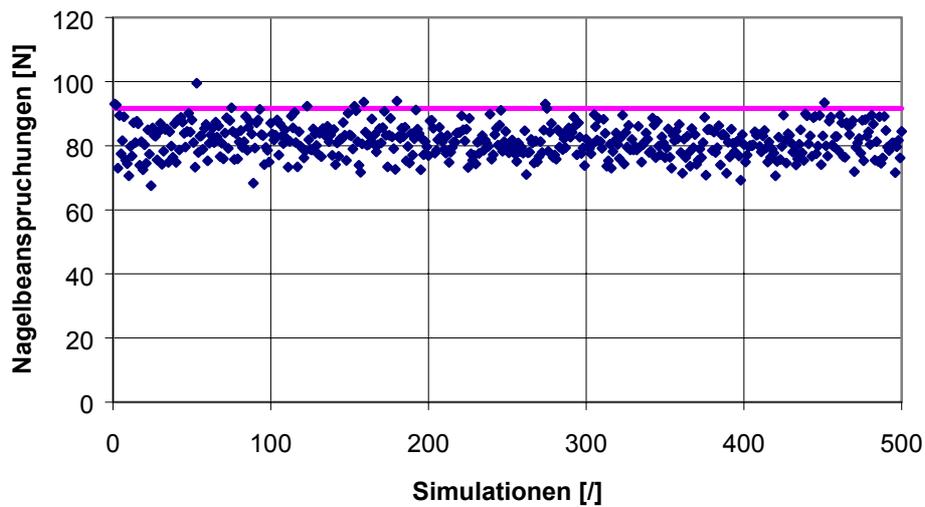


Bild 4- 6 Maximale Nagelbeanspruchungen auf Abscheren infolge einer zentrischen Einzellast

Der Einfluss der Nageldichte auf die Abscherbeanspruchung der Nägel und die Abklingrate der Abscherbeanspruchungen in den Scherfugen von innen nach außen ist in Bild 4- 7 exemplarisch für die Simulationschargen 1, 10, 19 und 28 dargestellt (vgl. Abschnitt 4.3.2).

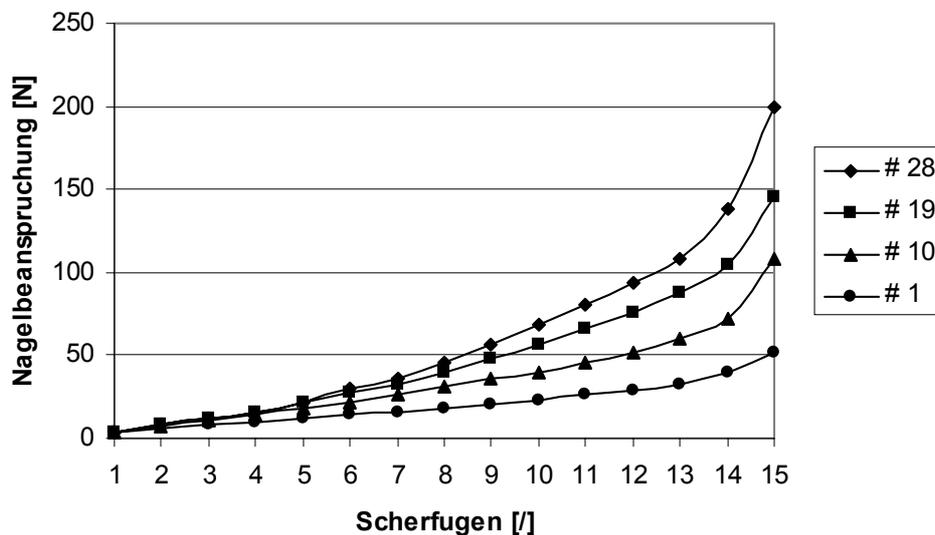


Bild 4- 7 Scherbeanspruchungen der Nägel quer zur Spannrichtung bis zur mittleren Scherfuge (Nr. 15) infolge zentrischer Einzellast und unterschiedlichen Nagelabständen - Charge 16

4.4 Ableiten der Näherungsgleichungen zur Berechnung der Beanspruchungen von Brettstapelelementen

Die Gleichungen zur Berechnung der Lamellen- und Nagelbeanspruchungen und der elastischen Verformung von Brettstapelelementen wurden mit Hilfe der Fraktil- und Mittelwerte der Simulationsergebnisse im linear elastischen Bereich der Simulationsergebnisse bestimmt. Die Berechnung der Biegebeanspruchungen der Lamellen und der elastischen Verformung der Brettstapelelemente kann auf der Grundlage der technischen Biegelehre unter Verwendung einer Anzahl mitwirkender Lamellen (n_{ef}), die von den signifikanten Einflussparametern abhängen, durchgeführt werden. Die Berechnung der Nagelbeanspruchungen fußt auf empirischen Gleichungen [65].

Die Anzahl mitwirkender Lamellen zur Berechnung der Biegebeanspruchung der Lamellen und der Verformung der Brettstapelelemente wurden mit Hilfe des Statistikprogramms SAS [66] ermittelt. Es wurde das nichtlineare Modell "Proc NLIN" zur Berechnung einer Anzahl mitwirkender Lamellen verwandt. Das nichtlineare Modell "Proc NLIN" berechnet Regressoren auf der Grundlage der kleinsten Abstandsquadrate (modifizierte Gauss-Newton-Methode). Bei diesem nichtlinearen Modell muss eine Regressionsgleichung und die Startwerte der Regressoren eingegeben werden, worauf iterativ die Summe der quadratischen Residuen minimiert wird, bis ein Minimum erreicht ist.

Die Vorgehensweise wird am Beispiel der Berechnung der Biegebeanspruchungen der Lamellen eines Brettstapelelementes unter einer zentrischen Einzellast gezeigt. Die angenommenen Einflussparameter auf die Biegebeanspruchungen der Lamellen eines Brettstapelelementes unter einer zentrischen Einzellast seien die Geometrie des Brettstapels (ℓ/h) und der Nagelabstand (a_1). Als Regressionsgleichung wird die Grundgleichung zur Berechnung von Biegerandspannungen eines Einfeldträgers unter einer zentrischen Einzellast entsprechend der technischen Biegelehre verwendet und mit Regressoren erweitert (Gleichung (4- 1)).

$$\sigma_B = \frac{M}{W} = \frac{M}{t \cdot h^2} \cdot \left(\frac{\ell}{h}\right)^{x_1} \cdot a_1^{x_2} \cdot x_3 \quad (4- 1)$$

Hierin bedeuten:

σ_B	Biegespannung der Lamellen (Simulationsergebnisse) [N/mm ²]
M	Biegemoment [Nmm]
ℓ	Stützweite des Trägers [mm]
t / h	Breite / Höhe des Trägers [mm]
a_1	Abstand der Nägel [mm]
x1, x2, x3	Regressoren [/]

Da in jeder Simulationscharge die Einflussparameter variiert wurden, konnten mit Hilfe der Simulationsergebnisse und des nichtlinearen Modells "Proc NLIN" die Regressoren bestimmt werden. Die Anzahl mitwirkender Lamellen wurde durch Multiplikation mit den mit Regressoren behafteten Einflussparametern bestimmt. Die Einflussparameter und die Regressoren wurden zu einer Gleichung zur Bestimmung der mitwirkenden Lamellen (n_{ef}) zusammengefasst.

4.4.1. Biegerandspannung der Lamellen

4.4.1.1. Zentrische Einzellast

Die Berechnung der Biegebeanspruchung der Lamellen soll auf der Grundlage der Gleichungen der technischen Biegelehre erfolgen. Die maximale Biegerandspannung eines Trägers auf zwei Stützen mit Rechteckquerschnitt und konstanten Querschnittsmaßen unter einer zentrischen Einzellast kann mit Gleichung (4- 2) berechnet werden:

$$\sigma_B = \frac{M}{W} = \frac{F \cdot \ell}{\frac{t \cdot h^2}{6}} \quad (4- 2)$$

Hierin bedeuten:

F	zentrische Einzellast [N]
ℓ	Stützweite des Trägers [mm]
t / h	Breite / Höhe des Trägers [mm]

Wie in Abschnitt 3.4.2 erläutert, wirkten die zentrischen Einzellasten auf zwei Lamellen ein, d.h. das Widerstandsmoment der belasteten Lamellen kann mit Gleichung (4- 3) angegeben werden:

$$W_{2L} = \frac{2 \cdot t_{Lam} \cdot h^2}{6} \quad (4- 3)$$

Hierin bedeuten:

$$t_{Lam} / h \quad \text{Breite / Höhe der Lamelle [mm]}$$

Werden die Biegerandspannungen eines Brettstapelelementes mit Gleichung (4- 2) unter Verwendung des Widerstandsmomentes W_{2L} berechnet, resultieren hieraus wesentlich zu große Werte, da die Lastausbreitung infolge der kontinuierlichen Vernagelung der Lamellen noch nicht berücksichtigt ist. Um realistische Werte der Biegerandspannungen berechnen zu können, muss die Beteiligung der nicht direkt belasteten Lamellen an der Lastabtragung berücksichtigt werden.

Die Beteiligung der nicht direkt belasteten Lamellen an der Abtragung von Biegemomenten wurde über den Ansatz einer wirksamen Anzahl von Lamellen berücksichtigt. Bei der Methode einer wirksamen Anzahl von Lamellen werden die ungleichförmig verteilten Biegespannungen der Lamellen eines Brettstapelelementes in einem Schnitt quer zur Spannrichtung aufsummiert (vgl. z.B. Schnitt A-A, Bild 4- 1) und mit der Lamellenbreite multipliziert. Die so berechnete "Spannungsfläche" wird einem Ersatzträger zugewiesen. Der Ersatzträger weist über seine Breite eine gleichförmige Biegespannungsverteilung auf, wobei die Biegerandspannung des Ersatzträgers gleich der maximalen Biegerandspannung im Brettstapelelement ist. Die Breite des Ersatzträgers entspricht der wirksamen Anzahl der Lamellen n_{ef} und berechnet sich über das Flächenäquivalent der zuvor berechneten "Spannungsfläche" der Biegerandspannungen im Brettstapelelement.

Die wirksame Anzahl der Lamellen n_{ef} kann mit Gleichung (4- 5) bestimmt werden:

$$t_{Lam} \cdot \sum_{i=1}^n \sigma_i = n_{ef} \cdot t_{Lam} \cdot \sigma_{max} \quad (4- 4)$$

$$n_{ef} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{\sigma_{max}} \quad (4- 5)$$

Hierin bedeuten:

t_{Lam}	Breite der Lamelle [mm]
σ_i	Biegerandspannung der Lamellen [N/mm ²]
σ_{max}	maximale Biegerandspannung im Brettstapelelement [N/mm ²]
n_{ef}	wirksame Anzahl der Lamellen [/]

In Bild 4- 8 ist die Biegerandspannungsverteilung infolge einer zentralen Einzellast auf zwei Lamellen und das rechteckförmige Flächenäquivalent zur Bestimmung der wirksamen Lamellenanzahl n_{ef} exemplarisch dargestellt.

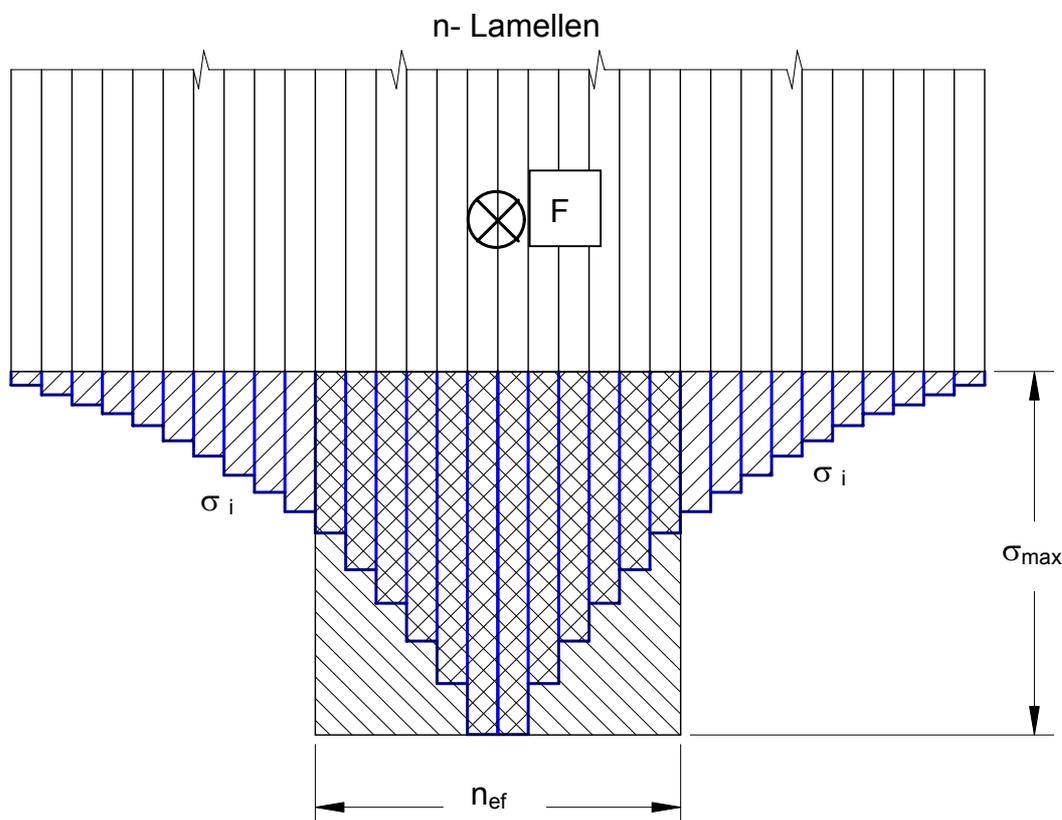


Bild 4- 8 Biegerandspannungsverteilung infolge einer Einzellast, Draufsicht

Um realistische Biegerandspannungen in beliebigen Brettstapelelementen berechnen zu können, musste die wirksame Anzahl der Lamellen n_{ef} mit den Simulationsparametern korreliert werden. Der Einfluss der Simulationsparameter wurde mit Hilfe nichtlinearer Regressionen mit dem Statistikprogramm SAS [66] bestimmt (vgl. Abschnitt 4.4).

Mit Hilfe der wirksamen Anzahl der Lamellen n_{ef} wurde ein wirksames Widerstandsmoment \hat{W} zur Berechnung von maximalen Biegegrandspannungen in Brettstapелеlementen unter zentrischen Einzellasten bestimmt. Folglich kann die Berechnung der Biegegrandspannungen von Lamellen in Brettstapелеlementen in Anlehnung an die technische Biegelehre unter Zuhilfenahme eines wirksamen Widerstandsmomentes geführt werden:

$$\sigma_B = \frac{M}{\hat{W}} = \frac{M}{\frac{n_{ef} \cdot t \cdot h^2}{6}} \quad (4-6)$$

Hierin bedeuten:

- M maximales Biegemoment [Nmm]
- \hat{W} wirksames Widerstandsmoment [mm³]
- n_{ef} Anzahl mitwirkender Lamellen [/]
- t h Breite / Höhe der Lamellen [mm]

4.4.1.2. Gleichförmige Flächenlast

In diesem Abschnitt gelten die gleichen Annahmen zur Berechnung der Biegegrandspannungen wie in Abschnitt 4.4.1.1. Den Gleichungen zur Berechnung der Biegegrandspannungen liegen Brettstapелеlemente mit einer Einheitsbreite von 1,0 m zugrunde. Werden Brettstapелеlemente mit anderen Breiten (Belastung) berechnet, müssen die wirksamen Widerstandsmomente \hat{W} mit dem Faktor $\frac{b_{\text{vorhanden}} [\text{m}]}{1,0 \text{ m}}$ multipliziert werden.

Die Biegegrandspannung eines Einfeldträgers mit konstanten Querschnittsmaßen unter einer gleichförmigen Streckenlast kann mit Gleichung (4-7) berechnet werden:

$$\sigma_B = \frac{M}{W} = \frac{q \cdot \ell^2}{\frac{t \cdot h^2}{6}} \quad (4-7)$$

Hierin bedeuten:

- q gleichförmige Streckenlast [N/mm]
- ℓ Stützweite des Trägers [mm]
- t / h Breite des Brettstapels = 1000 mm / Höhe des Trägers [mm]

Die Herleitung des wirksamen Widerstandsmomentes \hat{W} für Brettstapelelemente unter gleichförmiger Flächenlast erfolgte analog zu Abschnitt 4.4.1.1. Die Biegerandspannungen von Brettstapelelementen unter einer gleichförmigen Flächenlast können grundsätzlich mit Gleichung (4- 6) berechnet werden, wobei das wirksame Widerstandsmoment entsprechend berechnet wird.

4.4.2. Berechnung der elastischen Verformung von Brettstapelelementen

4.4.2.1. Zentrische Einzellast

Die Berechnung der elastischen Verformung von Brettstapelelementen soll analog zu der Berechnung der Biegerandspannungen der Lamellen mit Hilfe der Gleichungen aus der technischen Biegelehre erfolgen. Die elastische Verformung eines Trägers auf zwei Stützen mit Rechteckquerschnitt und konstanten Querschnittsmaßen unter einer zentrischen Einzellast kann mit Gleichung (4- 8) berechnet werden:

$$v = \frac{F \cdot \ell^3}{48 \cdot E \cdot I} = \frac{F \cdot \ell^3}{48 \cdot E \cdot \frac{t \cdot h^3}{12}} \quad (4- 8)$$

Hierin bedeuten:

- F zentrische Einzellast [N]
- ℓ Stützweite des Trägers [mm]
- t / h Breite / Höhe des Trägers [mm]
- E Elastizitätsmodul des Trägers [N/mm²]
- I Flächenmoment 2. Grades [mm⁴]

Die Herleitung des wirksamen Flächenmomentes 2. Grades \hat{I} erfolgte analog zur Herleitung des wirksamen Widerstandsmomentes \hat{W} in Abschnitt 4.4.1.1. Bei der Herleitung wurde ein mittlerer Elastizitätsmodul der Lamellen von 12600 N/mm² angenommen (vgl. Abschnitt 3.1.3).

Mit Gleichung (4- 9) kann somit die elastische Verformung von beliebigen Brettstapelelementen unter zentrischen Einzellasten berechnet werden:

$$v = \frac{F \cdot \ell^3}{48 \cdot E \cdot \hat{I}} = \frac{F \cdot \ell^3}{48 \cdot E \cdot \frac{n_{ef} \cdot t \cdot h^3}{12}} \quad (4- 9)$$

Hierin bedeuten:

\hat{I} wirksames Flächenmoment 2. Grades des Brettstapelelementes [mm⁴]

E mittlerer Elastizitätsmodul der Brettstapelelemente = 12600 N/mm²

n_{ef} Anzahl mitwirkender Lamellen [/]

t / h Breite / Höhe der Lamellen [mm]

4.4.2.2. Gleichförmige Flächenlast

Bei der Herleitung der wirksamen Flächenmomente 2. Grades \hat{I} für Brettstapelelemente unter gleichförmigen Flächenlasten gelten die gleichen Annahmen wie in Abschnitten 4.4.1.1 und 4.4.2.1. Die elastische Verformung eines Brettstapelelementes unter einer gleichförmigen Streckenlast kann mit Gleichung (4- 10) berechnet werden:

$$v = \frac{5 \cdot q \cdot \ell^4}{384 \cdot E \cdot \hat{I}} = \frac{5 \cdot q \cdot \ell^4}{384 \cdot E \cdot \frac{n_{ef} \cdot 1000 \cdot h^3}{12}} \quad (4- 10)$$

Hierin bedeuten:

q gleichförmige Streckenlast [N/mm]

ℓ Stützweite des Trägers [mm]

\hat{I} wirksames Flächenmoment 2. Grades des Brettstapelelementes [mm⁴]

E mittlerer Elastizitätsmodul der Brettstapelelemente = 12600 N/mm²

4.4.3. Nagelbeanspruchung auf Abscheren

Den Gleichungen zur Berechnung der Nagelbeanspruchungen auf Abscheren liegen keine mechanischen Modelle zugrunde. Die Herleitung der Gleichungen erfolgte mittels nichtlinearer Regressionen mit dem Statistikprogramm SAS (vgl. Abschnitt 4.4). Hierfür wurde der Einfluss der Simulationsparameter auf die Nagelbeanspruchungen bestimmt und zu einer empirischen Gleichung zusammengefasst. Die Regressionsgleichung wurde analog Gleichung (4- 11) angenommen.

$$F_{Na} = \left(\frac{\ell}{h}\right)^{x1} \cdot a_1^{x2} \cdot d_{Na}^{x3} \cdot x4 \quad (4- 11)$$

Hierin bedeuten:

F_{Na}	Nagelbeanspruchung auf Abscheren (Simulationsergebnisse) [N]
ℓ / h	Stützweite / Höhe des Brettstapelelementes [mm]
a_1	Nagelabstände [mm]
d_{Na}	Nageldurchmesser [mm]
$x1, x2, x3, x4$	Regressoren [/]

4.5 Simulationen mit nichtlinearem Tragverhalten der Nagelverbindungen

Aufbauend auf das Forschungsvorhaben von Blaß/Krämer [13] wurden Brettstapelelemente unter zentrischer Einzellast und den verschiedenen Stoßvarianten der Lamellen unter Berücksichtigung der nichtlinearen Last-Verschiebungs-Beziehung von Holz-Holz-Nagelverbindungen simuliert [81]. Die Steifigkeitseigenschaften der Balkenelemente, welche die Nägel in den Simulationen mit dem linear elastischen Tragverhalten von Holz-Holz-Nagelverbindungen repräsentieren, wurden über die Verschiebungsmoduln der entsprechenden Verbindungsmittel bestimmt. Diese Vorgehensweise bildet das Trag- und Verformungsverhalten von Brettstapelelementen nur näherungsweise realistisch ab, da die in der E-DIN 1052 bzw. im EC5 angegebenen Verschiebungsmoduln für Nägel Mittelwerte von Steigungen der Sekanten an die Last-Verschiebungs-Kurven darstellen. Eine Abschätzung der elastischen Anfangsverformung von genagelten Holzverbindungen kann nach [19] mit Hilfe des Anfangsverschiebungsmoduls K_{ser} erfolgen. Der Anfangsverschiebungsmodul K_{ser} wird definiert durch die Sekante an die Last-Verschiebungs-Kurve, welche die Last-Verschiebungs-Kurve bei 10% der Traglast (F_{01}/V_{01}) und bei 40% der Traglast (F_{04}/V_{04}) schneidet. In Bild 4- 9 ist eine Last-Verschiebungs-Kurve einer genagelten Holzverbindung und die Definition des Anfangsverschiebungsmoduls K_{ser} dargestellt.

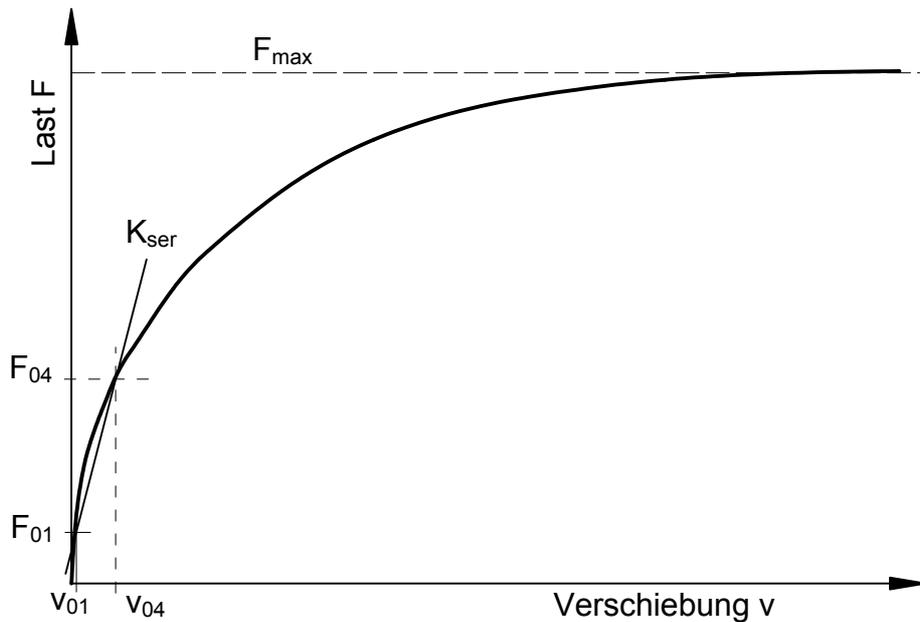


Bild 4- 9 Last-Verschiebungs-Kurve einer Nagelverbindung mit Verschiebungsmodul K_{ser}

Eine Berechnung der elastischen Anfangsverschiebung u_{inst} ergibt bei Nagelverbindungen unter Gebrauchslast einen Betrag von ca. 1,0 mm.

Wie in Bild 4- 9 zu erkennen ist, stellt der Anfangsverschiebungsmodul K_{ser} nur eine Näherung an das wirkliche Last-Verschiebungs-Verhalten von genagelten Holzverbindungen dar. Versuche mit zweischnittigen Holz-Holz-Nagelverbindungen zeigen, dass die Verbindungen zum Teil signifikant höhere Anfangssteifigkeiten aufweisen, als in den Simulationen mit dem linear elastischen Tragverhalten der Nagelverbindungen angenommen wurden. Werden die Nägel über die Gebrauchslast hinaus beansprucht, verändern sich die Steifigkeiten der Nagelverbindung und somit auch die Beanspruchungen innerhalb des Brettstapels, was durch den linear elastischen Ansatz des Anfangsverschiebungsmoduls nicht berücksichtigt werden kann. Der Effekt der plastischen Verformung der Nagelverbindungen tritt insbesondere bei Brettstapelelementen unter zentrischen Einzellasten und gestoßenen Lamellen auf. Bei Brettstapelelementen mit durchlaufenden Lamellen unter zentrischen Einzellasten erreichen die belasteten Lamellen die Biegefestigkeit, bevor die Nägel nennenswerte plastische Verformungen erreichen. Ein nichtlineares Verhalten der Nagelverbindungen tritt bei Brettstapelelementen mit ungestoßenen Lamellen nur bei einer unrealistisch geringen Nageldichte (sehr wenige Nägel pro Längeneinheit) auf.

Aus diesen Gründen wurden die Last-Verschiebungs-Kurven von genagelten, zweischnittigen Holzverbindungen durch Versuche ermittelt. Für Brettstapelelemente unter zentrischer Einzellast wurden zusätzliche Simulationen mit dem nichtlinearen und streuenden Last-Verformungs-Verhalten von Nagelverbindungen durchgeführt.

4.5.1. Grundlagen der Simulationen mit nichtlinearem Tragverhalten der Nagelverbindungen

Die Simulationen mit nichtlinearem Tragverhalten der Nagelverbindungen von Brettstapelelementen unter zentrischen Einzellasten wurden nach den gleichen Gesichtspunkten wie die Simulationen mit linear elastischem Tragverhalten der Nagelverbindungen durchgeführt. Die Erzeugung der Dateien, die eigentliche FEM-Berechnung und die Auswertung der Simulationsergebnisse geschieht grundsätzlich analog zu der in den vorhergehenden Kapiteln aufgezeigten Vorgehensweise.

Aufgrund der deutlich längeren Rechenzeiten infolge der FEM-Berechnung mit nichtlinearem Tragverhalten der Nagelverbindungen wurden anstelle von 500 Simulationen pro Charge nur 100 Simulationen berechnet und ausgewertet. Für jede Simulationscharge wurde im Vorfeld der Simulationen mit einer Einzelberechnung eine Höchstlast F_{\max} ermittelt, damit die Ergebnisse keine unrealistisch großen Beträge ergaben. Es wurde angestrebt, dass sich eine Nagelverformung (höchstbeanspruchtes Element) bei der jeweiligen Höchstlast von ca. 30 mm einstellt, so dass bei den späteren Simulationen sehr steife Elemente sich dennoch plastisch verhalten und sehr weiche Elemente keine unsinnigen Verformungen aufwiesen. Als untere Grenze der Belastung F_{\min} wurde pauschal 6,0 kN (6 x 1,0 kN verteilt auf zwei Lamellen) angenommen, da bei dieser Beanspruchung der Brettstapelelemente jedes Nagelelement sich im linear elastischen Bereich befand. Somit war für jede Simulationscharge ein oberer und unterer Lastbereich ermittelt. Als Lastschritte $F_{(i)}$ für die Simulationen wurde die Differenz der oberen und unteren Lasten gleichmäßig in vier Teile geteilt und schrittweise auf die Brettstapelelemente aufgebracht.

$$F_{(i)} = F_{\min} + i \cdot \frac{F_{\max} - F_{\min}}{4}, \text{ mit } i = 0, 1, 2, 3, 4 \quad (4-12)$$

Durch diese Vorgehensweise wurden bei jeder Berechnung insgesamt fünf Laststufen berechnet.

4.5.2. Auswertung der Ergebnisse der Simulationen mit nichtlinearem Tragverhalten der Nagelverbindungen

Die Ergebnisse der Simulationen mit nichtlinearem Tragverhalten der Nagelverbindungen wurden zweifach ausgewertet. Einerseits wurden die Ergebnisse auf die Einheitslast „1“ normiert, um so die Ergebnisse mit den Ergebnissen der Simulationen mit linear elastischem Tragverhalten der Nagelverbindungen besser vergleichen zu können. Andererseits wurden auf der Grundlage der Ergebnisse der nichtlinearen Simulationen Gleichungen zur Berechnung von Proportionalitätslasten für Brettstapelelemente unter zentrischer Einzellast hergeleitet. Nach Überschreiten der Proportionalitätslasten nehmen die Beanspruchungen bzw. die Verformungen einzelner Tragelemente im Brettstapelelement überproportional zu. Bei Brettstapelelementen mit gestoßenen Lamellen wird die Proportionalitätsgrenze immer durch die Verformungen der Nagelverbindungen erreicht. Für Brettstapelelemente mit durchlaufenden Lamellen unter zentrischer Einzellast wird keine Proportionalitätsgrenze angegeben, da bei diesen Systemen die Biegefestigkeit der Lamellen erreicht wird, bevor die Nägel plastisch verformt werden.

Bild 4- 10 zeigt die Quotienten der Mittelwerte der Simulationsergebnisse (x_{i+1} / x_i) für eine Simulation mit nichtlinearem Tragverhalten der Nagelverbindungen mit wechselseitig gestoßenen Lamellen. Da die Lasten in fünf Schritten aufgebracht wurden, ergeben sich vier Quotienten der entsprechenden Ergebnisse der maximalen Biege- randspannung der Lamellen, der Größtwerte der vertikalen Verformung des Brettstapelelementes und der Nagelverformung. Wie in Bild 4- 10 zu erkennen ist, zeigte sich bei der Auswertung aller Simulationsergebnisse, dass die Verformung der Nagelverbindungen das maßgebende Kriterium zur Bestimmung der Proportionalitätslasten darstellt.

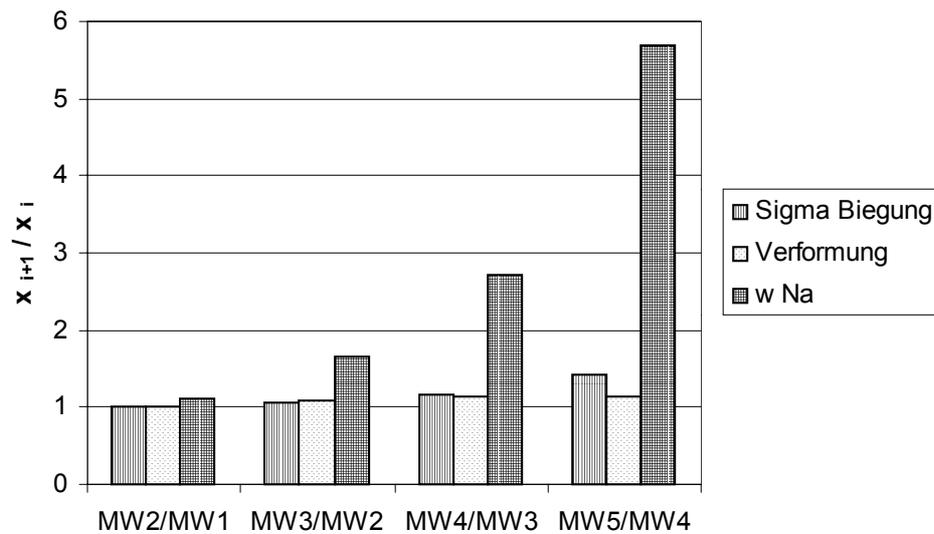


Bild 4- 10 Quotienten der Simulationsergebnisse einzelner Laststufen

4.5.3. Proportionalitätslasten

Auf der Grundlage der in Abschnitt 4.5.2 dargestellten Zusammenhänge wurde ein Kriterium zur Formulierung einer Proportionalitätsgrenze erarbeitet, das sich auf das Last-Verschiebungs-Verhalten von genagelten Holz-Holzverbindungen anwenden lässt. Die Proportionalitätslast stellt eine Grenzlasterlast auf ein Brettstapelelement dar. Nach Überschreiten der Proportionalitätslast verformen sich Nagelverbindungen im Brettstapelelement überproportional, so dass sich Lastumlagerungen im Brettstapelelement einstellen. In Folge der Lastumlagerungen verändern sich die Beanspruchungen im Brettstapelelement, hierdurch haben die im Abschnitt 7 dargestellten Bemessungsgleichungen für Brettstapelelemente nach Überschreiten der Proportionalitätslasten keine Gültigkeit mehr.

Für die Formulierung einer Proportionalitätsgrenze von genagelten Holz-Holzverbindungen gab es schon verschiedene Ansätze, die jedoch nicht verwendet werden konnten, da die Last-Verschiebungs-Kurven über einen Polygonzug angenähert wurden. Ehlbeck schreibt in [68], dass für solche genagelten Verbindungen eine deutliche Proportionalitätsgrenze nicht beobachtet werden kann. Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Proportionalitätsgrenze gibt Ehlbeck in [50] an (vgl. Bild 4- 11).

Hiernach kann die Verformung an der Proportionalitätsgrenze berechnet werden zu

$$s_y = \frac{F_y}{K_0} + s_{ir,y} \quad (4-13)$$

mit

$$s_{ir,y} = 0,04 d_N \quad (4-14)$$

Hierin bedeuten:

- $s_{ir,y}$ bleibende Verformung [mm]
- F_y Last bei Proportionalitätsgrenze [N]
- K_0 Anfangssteigung [N/mm]
- d_N Nenndurchmesser Nagel [mm]

Durch den Koordinatenursprung und durch das Wertepaar F_y / s_y kann eine Sekante gelegt werden, die einen Verschiebungsmodul im linear elastischen Bereich einer Holz-Holz nagelverbindung beschreibt. Ehlbeck rät jedoch von dieser Methode ab, da hieraus rechnerisch bei Verbindungen mit dicken Nägeln größere Verformungen resultieren als bei Verbindungen mit dünnen Nägeln.

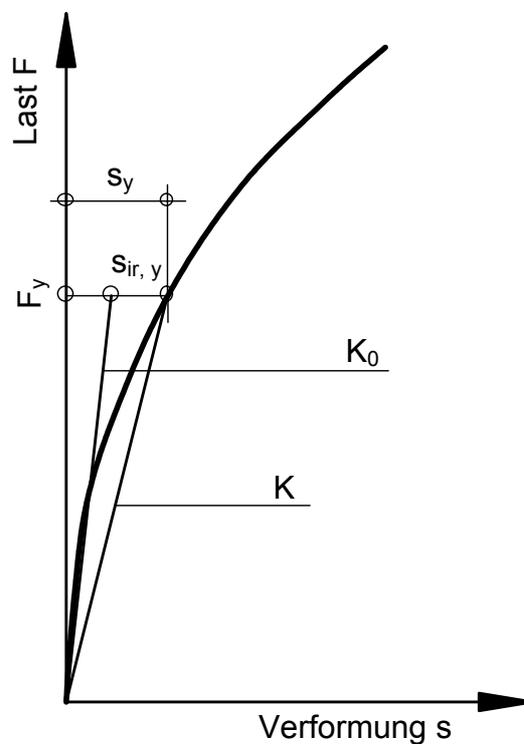


Bild 4- 11 Definition von Proportionalitätslasten (Ehlbeck)

Norèn gab 1968 eine Definition zur Bestimmung einer „Fließlast“ von genagelten Holz-Holzverbindungen an [69]. Die Fließlast und damit eine Proportionalitätsgrenze ist dann erreicht, wenn der Lastzuwachs bezogen auf 1,0 mm Verformung nicht mehr als 10 % beträgt (vgl. Bild 4- 12). Aus Versuchen mit nordischen Hölzern, die parallel zur Faserrichtung beansprucht waren, ergab sich die Fließlast bei einer Absolutverformung von ca. 2,0 mm.

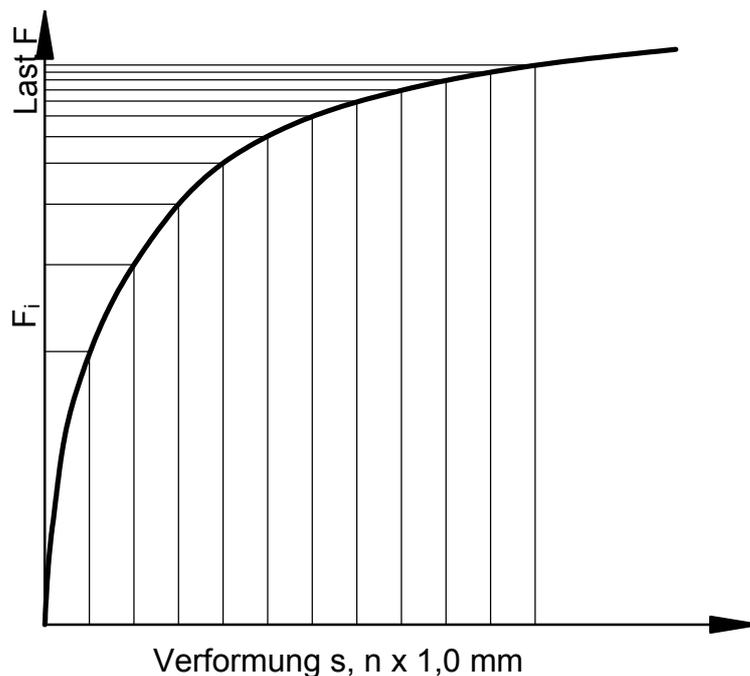


Bild 4- 12 Definition von Proportionalitätslasten (Norèn)

In Prüfnormen für verschiedene Materialien gibt es Vorschläge und Hinweise, wie eine Proportionalitätsgrenze bestimmt werden kann. So findet sich z.B. in der amerikanischen Prüfnorm für Festigkeiten von metallischen Materialien [70] die Möglichkeit, die Tangente der Anfangssteifigkeit um 5% zu neigen, um so eine Sekante mit dem Kurvenschnittpunkt bei der Proportionalitätsgrenze zu bestimmen (vgl. Bild 4- 13).

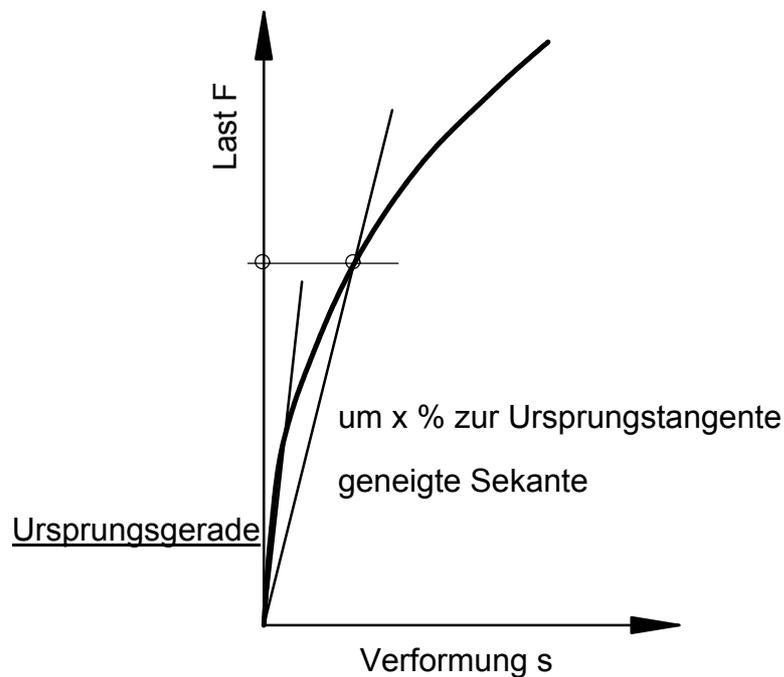


Bild 4- 13 Proportionalitätsgrenze über Neigung der Ursprungsgeraden

In DIN EN 12512 [83] finden sich zwei Definitionen zur Bestimmung der Fließlasten (Proportionalitätslasten) von Last-Verschiebungs-Kurven von Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln. Weist die Last-Verschiebungs-Kurve zwei eindeutig lineare Bereiche auf, kann die Proportionalitätslast F_y und die zugehörige Verschiebung s_y über den Schnittpunkt der beiden Geraden bestimmt werden (vgl. Bild 4- 14).

Besitzt die Last-Verschiebungs-Kurve die beiden linearen Anteile nicht, werden die Fließwerte F_y und s_y über den Schnittpunkt zweier konstruierter Geraden bestimmt. Da bei genagelten Holz-Holz-Verbindungen die Last-Verschiebungs-Kurven meist zwei lineare Anteile aufweisen, wird die zweite Methode, die Fließwerte nach DIN EN 12512 zu bestimmen, nicht weiter dargestellt.

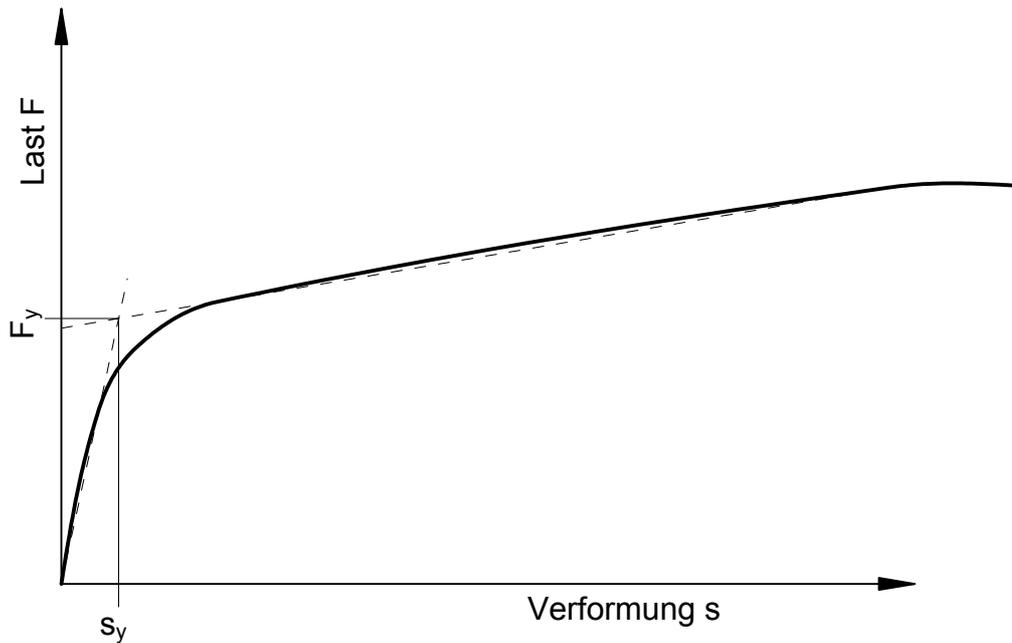


Bild 4- 14 Definition der Fließwerte nach DIN EN 12512 bei Last-Verschiebungs-Kurven mit zwei eindeutig linearen Anteilen

Die oben gezeigten Möglichkeiten zur Bestimmung einer Proportionalitätsgrenze von genagelten Holz-Holzverbindungen stellen willkürliche Beziehungen dar, die dem realistischen Last-Verformungs-Verhalten nur bedingt Rechnung tragen. Die Bestimmung der Proportionalitätsgrenze über eine um $x\%$ geneigte Ursprungstangente wäre praktikabel, scheint aber zu pauschal, da das weitere Last-Verformungs-Verhalten der Nagelverbindung nicht berücksichtigt wird. Um die Verfahren nach Ehlbeck oder Norèn sinnvoll anwenden zu können, müsste eine stetige Funktion der Last-Verschiebungs-Kurve vorhanden sein. Dies ist im vorliegenden Fall nicht gegeben, da die Last-Verschiebungs-Kurve über ein Polygon angenähert wurde.

Wie in Abschnitt 3.3.3.5 dargestellt, sind die simulierten Last-Verschiebungs-Kurven über einen Polygonzug mit sechs Stützstellen in die Simulationen implementiert worden. Um bei der Bestimmung der Proportionalitätslast den Verlauf der Last-Verschiebungs-Kurve über das erste Teilstück des Polygonzuges (Anfangstangente) hinaus zu berücksichtigen, wurden die Steigungen der ersten beiden Geraden verglichen ($\tan g_2 / \tan g_1$). Über den Quotient der Steigungen der Geraden wurde die Proportionalitätslast für jeden selektierten, höchstbeanspruchten Nagel im Brettstapelement bestimmt. Der Quotient κ kann entsprechend Gleichung (4- 15) angegeben werden zu:

$$\kappa = \frac{\tan g_2}{\tan g_1}, \text{ mit } \kappa \leq 1,0 \quad (4- 15)$$

Ist die Neigung der zweiten Geraden wesentlich geringer als die der ersten Geraden, strebt κ gegen 0. Die ersten drei Geraden des angenäherten Polygonzuges mit den zugehörigen Steigungen sind in Bild 4- 15 dargestellt.

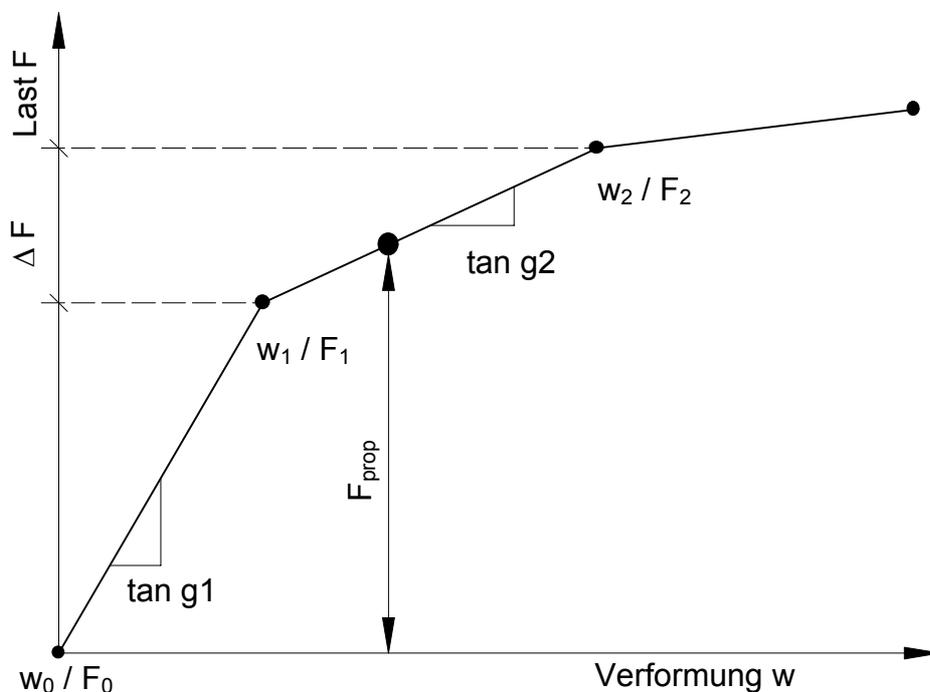


Bild 4- 15 Polygonzug und Definition der Proportionalitätslast

Entsprechend dem Betrag des Quotienten κ wurde die Proportionalitätslast F_{prop} auf der zweiten Geraden des Polygonzuges berechnet. Die Proportionalitätslast F_{prop} wurde in jeder Simulation über Gleichung (4- 16) berechnet.

$$F_{\text{prop}} = \kappa \cdot (F_2 - F_1) + F_1 \quad (4- 16)$$

Waren die beiden Steigungen gleich groß ($\kappa = 1$), ergab sich die Proportionalitätslast zu F_2 . Mit abnehmendem Betrag von κ näherte sich der berechnete Wert von F_{prop} dem Betrag von F_1 an.

In Bild 4- 16, Bild 4- 17 und Bild 4- 18 sind für drei Fälle ($\kappa = 0,06$; $\kappa = 0,5$; $\kappa = 1$) die Proportionalitätslasten eingezeichnet.

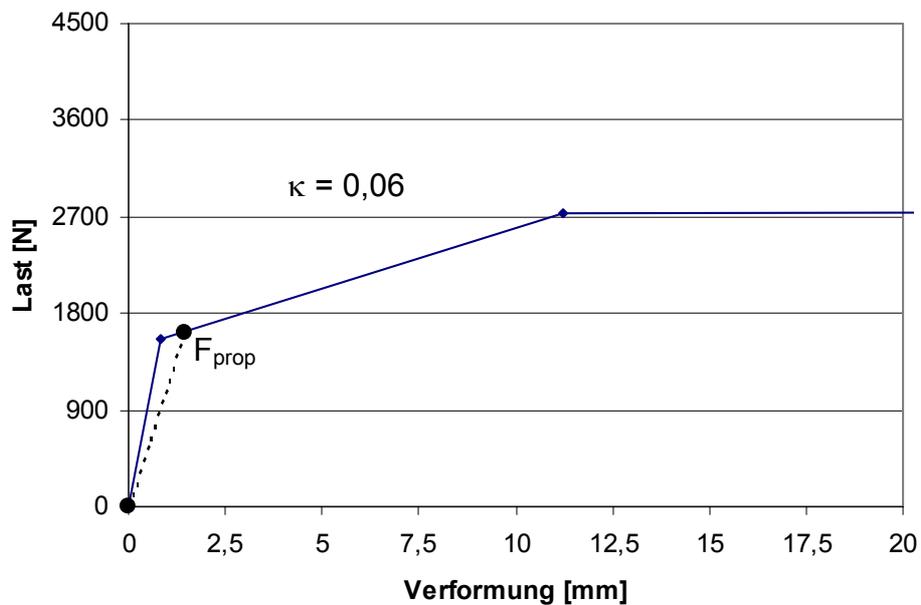
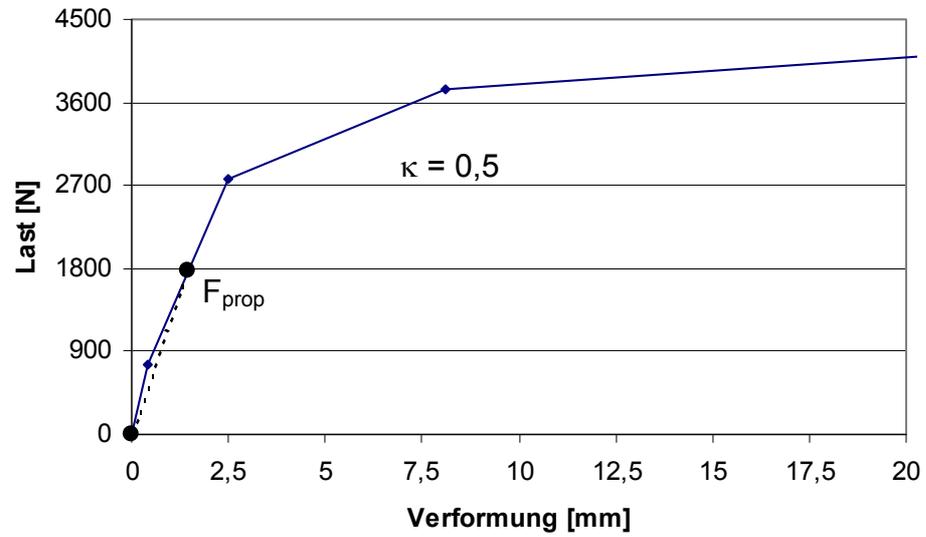
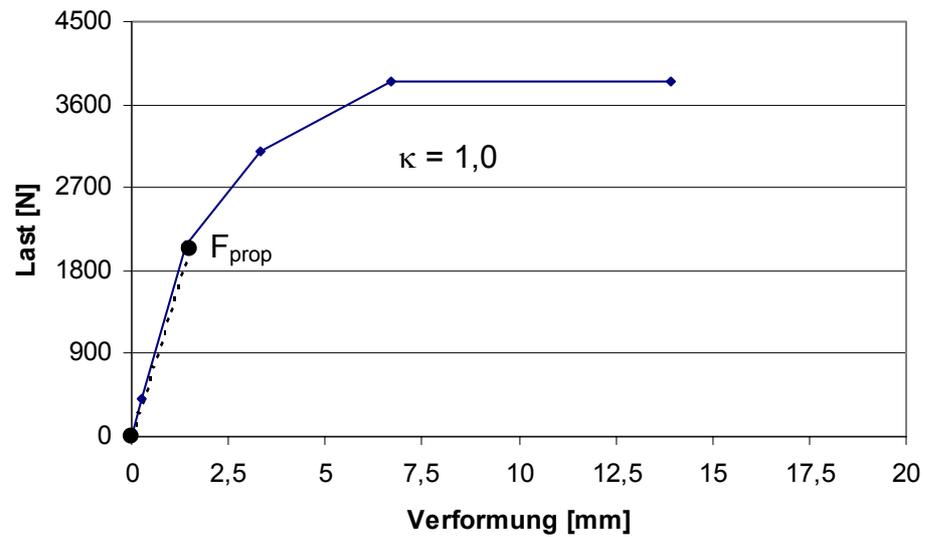


Bild 4- 16 Proportionalitätslasten aus Simulationen, $\kappa = 0,06$

Bild 4- 17 Proportionalitätslasten aus Simulationen, $\kappa = 0,5$ Bild 4- 18 Proportionalitätslasten aus Simulationen, $\kappa = 1,0$

5. Näherungsgleichungen zur Berechnung von Beanspruchungen von Brettstapelelementen

5.1 Brettstapelelemente unter zentrischen Einzellasten

Die folgenden Gleichungen zur Berechnung der Biegerandspannungen der Lamellen, der elastischen Verformung der Brettstapelelemente und der Nagelbeanspruchungen auf Abscheren fußen auf den Ergebnissen der Simulationen mit dem nichtlinearen Tragverhalten von Nagelverbindungen. Bei der Berechnung der o.g. Beanspruchungen werden die Grundgleichungen aus der technischen Biegelehre verwendet. Um realistische Berechnungsergebnisse zu erhalten, wurden die mechanischen Querschnittsgrößen, wie das Widerstandsmoment W und das Flächenmoment 2. Grades I als wirksame Größen über die Simulationsergebnisse bestimmt (vgl. Abschnitt 4.4). Die wirksamen Querschnittsgrößen werden im Folgenden jeweils mit einem „Dach“ gekennzeichnet.

5.1.1. Biegerandspannung

Die Biegerandspannungen von Lamellen eines Brettstapelelementes unter einer zentrischen Einzellast wird mit Hilfe von Gleichung (4- 6) berechnet.

$$\sigma_B = \frac{M}{\hat{W}} = \frac{M}{\frac{n_{ef} \cdot t \cdot h^2}{6}}$$

Das Biegemoment berechnet sich nach der technischen Biegelehre mit Gleichung (5- 1).

$$M = \frac{F \cdot \ell}{4} \quad [\text{N mm}] \quad (5- 1)$$

Hierin bedeuten:

F zentrische Einzellast [N]

ℓ Stützweite des Brettstapelelementes [mm]

Die Gleichungen zur Berechnung der wirksamen Anzahl der Lamellen n_{ef} sind in Tabelle 5- 1 dargestellt.

Tabelle 5- 1 Wirksame Anzahl der Lamellen n_{ef} für Brettstapelelemente unter zentrischer Einzellast (Biegerandspannung)

Stoßvariante	Zentrische Einzellast
Ungestoßene Lamellen	$n_{ef} = \frac{1,3 \cdot \ell}{h \cdot a_1^{0,3}}$
Wechselseitig gestoßene Lamellen	$n_{ef} = \frac{2,5 \cdot \ell}{h^{1,15} \cdot a_1^{0,3}}$
Wandernd gestoßene Lamellen	$n_{ef} = \frac{2 \cdot \ell}{h^{1,15} \cdot a_1^{0,3}}$
Zufällig gestoßene Lamellen	$n_{ef} = \frac{2 \cdot \ell}{h^{1,15} \cdot a_1^{0,3}}$

Hierin bedeuten:

- h Höhe der Lamelle [mm]
- ℓ Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
- a_1 Nagelabstand [mm]

In Bild 5- 1 ist die mit dem wirksamen Widerstandsmoment (ungestoßene Lamellen) berechnete maximale Biegespannung der Lamellen eines Brettstapelelementes in Abhängigkeit von dem ℓ/h -Verhältnis und dem Nagelabstand a_1 für eine Einheitslast von 1,0 kN dargestellt. Hierfür wurde eine Stützweite von $\ell = 3,60$ m und eine Lamellendicke von 35 mm angenommen.

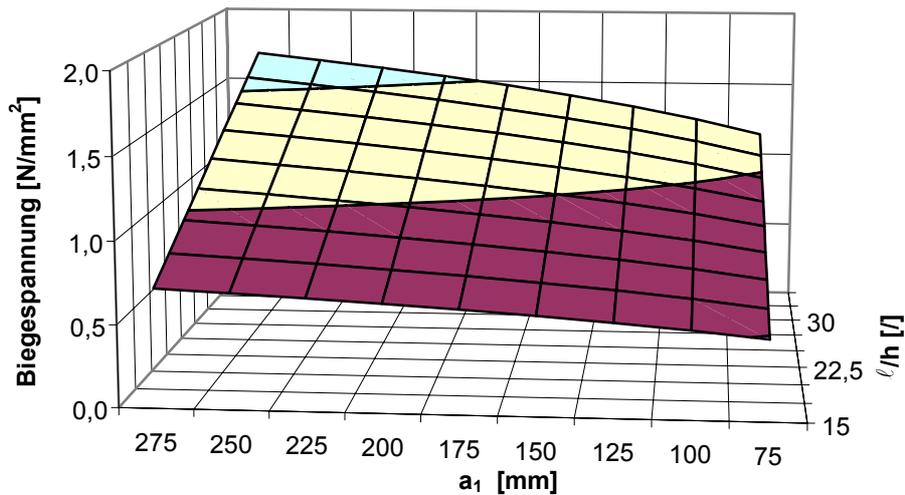


Bild 5- 1 Biegespannung über l/h -Verhältnis und Nagelabstand a_1

5.1.2. Elastische Verformung

Für Brettstapelelemente unter zentrischer Einzellast berechnet sich die elastische Verformung mit Gleichung (4- 9)

$$v = \frac{F \cdot \ell^3}{48 \cdot E \cdot \hat{I}} = \frac{F \cdot \ell^3}{48 \cdot E \cdot \frac{n_{\text{ef}} \cdot t \cdot h^3}{12}}$$

Hierin bedeuten:

- F zentrische Einzellast [N]
- ℓ Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
- E mittlerer Elastizitätsmodul der Lamellen [N/mm^2]
- \hat{I} wirksames Flächenmoment 2. Grades [mm^4]
- n_{ef} Anzahl mitwirkender Lamellen [/]
- t / h Breite / Höhe der Lamellen [mm]

Die Gleichungen zur Berechnung der wirksamen Anzahl der Lamellen n_{ef} sind in Tabelle 5- 2 dargestellt.

Tabelle 5- 2 Wirksame Anzahl der Lamellen n_{ef} für Brettstapelelemente unter zentrischer Einzellast (Verformung)

Stoßvariante	Zentrische Einzellast
Ungestoßene Lamellen	$n_{ef} = \frac{13,3 \cdot \ell^{0,86}}{h \cdot a_1^{0,4}}$
Wechselseitig gestoßene Lamellen	$n_{ef} = \frac{2,9 \cdot \ell}{h \cdot a_1^{0,4}}$
Wandernd gestoßene Lamellen	$n_{ef} = \frac{2,9 \cdot \ell}{h \cdot a_1^{0,4}}$
Zufällig gestoßene Lamellen	$n_{ef} = \frac{2,9 \cdot \ell}{h \cdot a_1^{0,4}}$

Die Bezeichnungen können Tabelle 5- 1 entnommen werden.

In Bild 5- 2 ist die mit dem wirksamen Flächenmoment 2. Grades (ungestoßene Lamellen) berechnete maximale Verformung eines Brettstapelelementes in Abhängigkeit vom ℓ/h -Verhältnis und dem Nagelabstand a_1 für eine Einheitslast von 1,0 kN dargestellt. Es gelten die gleichen Annahmen wie in Abschnitt 5.1.1.

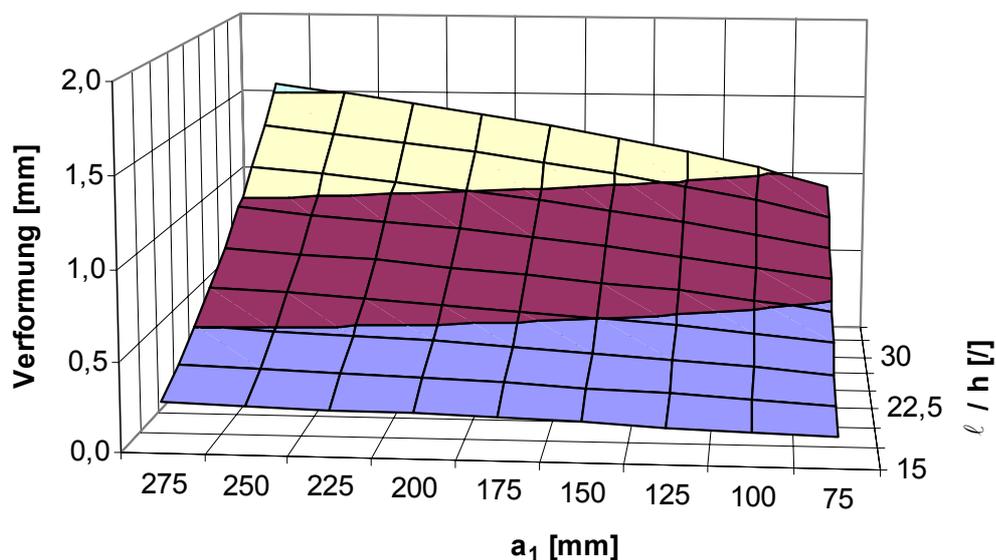


Bild 5- 2 Verformung über ℓ/h -Verhältnis und Nagelabstand a_1

5.1.3. Nagelbeanspruchung

Die maximale Beanspruchung eines Nagels auf Abscheren infolge einer zentrischen Einzellast auf ein Brettstapelelement berechnet sich über die in Tabelle 5- 3 dargestellten Näherungsgleichungen.

Tabelle 5- 3 Näherungsgleichungen zur Berechnung der Beanspruchung eines Nagels auf Abscheren infolge einer zentrischen Einzellast

Stoßvariante	Zentrische Einzellast
Ungestoßene Lamellen	$F_{\text{Na}} = F \cdot \frac{\left(\frac{\ell}{h}\right)^{2/3} \cdot a_1^{0,8}}{8,3}$
Wechselseitig gestoßene Lamellen	$F_{\text{Na}} = F \cdot \frac{\left(\frac{\ell}{h}\right)^{2/3} \cdot a_1^{0,8}}{8,3}$
Wandernd gestoßene Lamellen	$F_{\text{Na}} = F \cdot \frac{\left(\frac{\ell}{h}\right)^{2/3} \cdot a_1^{0,8}}{5,3}$
Zufällig gestoßene Lamellen	$F_{\text{Na}} = F \cdot 2,3 \cdot \left(\frac{\ell}{h}\right)^{2/3} \cdot a_1^{1/3}$

Hierin bedeuten:

- F zentrische Einzellast [kN]
- t, h Breite und Höhe der Lamelle [mm]
- ℓ Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
- a_1 Nagelabstand [mm]

In Bild 5- 3 ist die mit der in Tabelle 5- 3 dargestellten Näherungsgleichung (ungestoßene Lamellen) berechnete maximale Beanspruchung der Nägel auf Abscheren in Abhängigkeit von dem ℓ/h -Verhältnis und dem Nagelabstand a_1 für eine Einheitslast von 1,0 kN dargestellt.

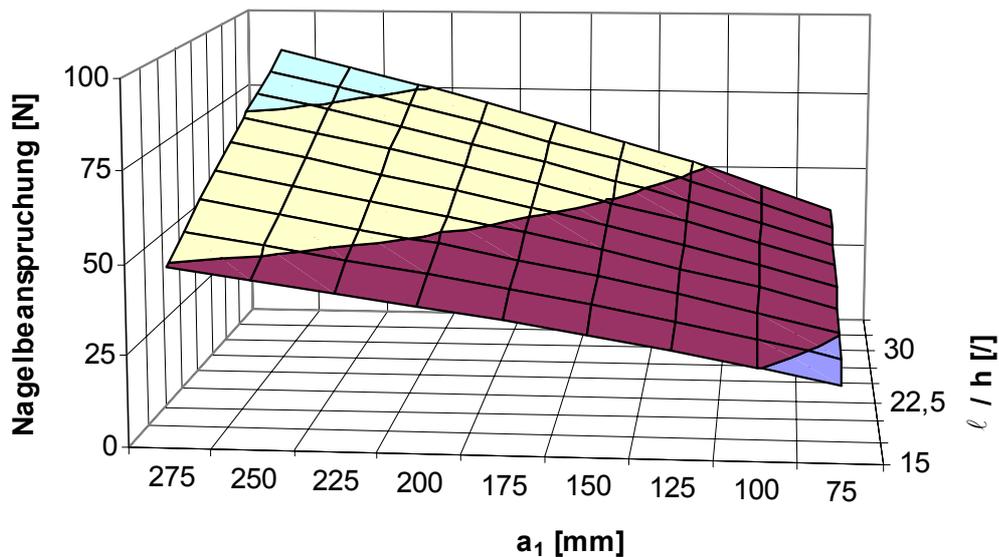


Bild 5- 3 Beanspruchung der Nägel über ℓ/h -Verhältnis und Nagelabstand a_1

5.1.4. Proportionalitätslast

Die Proportionalitätslast von Brettstapelelementen unter zentrischen Einzellasten berechnet sich über die in Tabelle 5- 4 dargestellten Näherungsgleichungen.

In Tabelle 5- 4 bedeuten:

- ℓ Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
- t, h Breite und Höhe der Lamelle [mm]
- a_1 Nagelabstand [mm]

Tabelle 5- 4 Zusammenstellung der Näherungsgleichungen zur Berechnung der Proportionalitätslasten von Brettstapelelementen unter zentrischen Einzellasten

Stoßvariante	Zentrische Einzellast
Ungestoßene Lamellen	–
Wechelseitig gestoßene Lamellen	$F_{\text{prop}} = 220 \cdot \frac{t^{0,8}}{a_1^{0,8} \cdot \left(\frac{\ell}{h}\right)^{0,36}}$
Wandernd gestoßene Lamellen	$F_{\text{prop}} = 16 \cdot \frac{t}{a_1^{0,6}}$
Zufällig gestoßene Lamellen	$F_{\text{prop}} = 3,7 \cdot \frac{t^{1,4}}{a_1^{0,6}}$

5.2 Brettstapelelemente unter gleichförmiger Flächenlast

Den Gleichungen zur Berechnung der Biegerandspannungen und der Verformungen liegen Brettstapelelemente mit einer Einheitsbreite von 1,0 m zugrunde. Werden Brettstapelelemente mit anderen Breiten (Beanspruchung) berechnet, müssen die wirksamen Widerstandsmomente \hat{W} und die wirksamen Flächenmomente 2. Grades \hat{I} mit dem Faktor $\frac{b_{\text{vorhanden}} [\text{m}]}{1,0\text{m}}$ multipliziert werden.

Bei Brettstapelelementen mit wechselseitig gestoßenen Lamellen bezeichnet die Größe ℓ' die Lage der Lamellenstöße nach Bild 3- 23. Die im Folgenden angegebenen Gleichungen zur Berechnung der wirksamen Querschnittswerte von Brettstapelelementen mit wechselseitig gestoßenen Lamellen gelten unter der Voraussetzung, dass die Stöße in dem Bereich von $\ell/3$ bis $\ell/5$ und symmetrisch zur Mittelachse quer zur Spannrichtung des Brettstapelelementes angeordnet sind.

Die Beanspruchungen der Nägel von Brettstapelelementen mit wandernd gestoßenen Lamellen hängen von der Übergreifungslänge $\ell_{\text{ü}}$ der Lamellen ab. Die folgenden Näherungsgleichungen gelten unter der Voraussetzung, dass die Übergreifungslängen im Bereich von $\ell/4$ bis $\ell/6$ liegen (vgl. Bild 3- 24).

5.2.1. Biegerandspannung

Für die Berechnung der Biegerandspannungen kann ein Brettstapelelement mit einer Einheitsbreite von $b_E = 1,0$ m herangezogen werden. Die Biegerandspannung wird nach Gleichung (4- 6) berechnet:

$$\sigma_B = \frac{M}{\hat{W}} = \frac{M}{n_{ef} \cdot 1000 \cdot h^2} \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$6$$

Das Biegemoment M kann nach der technischen Biegelehre bestimmt werden.

Die Gleichungen zur Bestimmung der Faktoren n_{ef} zur Berechnung der wirksamen Breite von Brettstapelelementen unter gleichförmiger Flächenlast (Biegerandspannung) sind in Tabelle 5- 5 dargestellt.

Tabelle 5- 5 Faktoren n_{ef} zur Berechnung der wirksamen Breite für Brettstapelelemente unter gleichförmiger Flächenlast (Biegerandspannung)

Stoßvariante	Gleichförmige Flächenlast
Ungestoßene Lamellen	$n_{ef} = 1$
Wechselseitig gestoßene Lamellen	$n_{ef} = \frac{0,2}{\sqrt{\frac{\ell'}{\ell}}}$
Wandernd gestoßene Lamellen	$n_{ef} = 0,29 \cdot \left(\frac{\ell}{h}\right)^{0,15}$
Zufällig gestoßene Lamellen	$n_{ef} = \frac{0,29 \cdot \left(\frac{\ell}{h}\right)^{\frac{1}{4}}}{a_1^{\frac{1}{9}}}$

Hierin bedeuten:

- h Höhe der Lamelle [mm]
- b Breite des Brettstapelelementes [mm]
- ℓ Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
- ℓ' Stoßlage ab Auflager [mm]
- a_1 Nagelabstand [mm]

5.2.2. Elastische Verformung

Die Berechnung der elastischen Verformung der Brettstapelelemente erfolgt analog zu Abschnitt 4.4.2.2 mit Gleichung (4- 10):

$$v = \frac{5 \cdot q \cdot \ell^4}{384 \cdot E \cdot \hat{I}} = \frac{5 \cdot q \cdot \ell^4}{384 \cdot E \cdot \frac{n_{ef} \cdot 1000 \cdot h^3}{12}} \quad [\text{mm}]$$

Die Gleichungen zur Bestimmung der Faktoren n_{ef} zur Berechnung der wirksamen Breite von Brettstapelelementen unter gleichförmiger Flächenlast (Verformung) sind in Tabelle 5- 6 dargestellt.

Tabelle 5- 6 Faktoren n_{ef} zur Berechnung der wirksamen Breite für Brettstapelelemente unter gleichförmiger Flächenlast (Verformung)

Stoßvariante	Gleichförmige Flächenlast
Ungestoßene Lamellen	$n_{ef} = 1$
Wechselseitig gestoßene Lamellen	$n_{ef} = \frac{0,35 \cdot \left(\frac{\ell}{h}\right)^{1/4}}{\left(\frac{\ell'}{\ell}\right)^{1/3} \cdot a_1^{1/8}}$
Wandernd gestoßene Lamellen	$n_{ef} = \frac{0,29 \cdot \sqrt{\frac{\ell}{h}}}{a_1^{1/6}}$
Zufällig gestoßene Lamellen	$n_{ef} = \frac{\left(\frac{\ell}{h}\right)^{0,9}}{12 \cdot a_1^{1/5}}$

Die Bezeichnungen können Tabelle 5- 5 entnommen werden.

5.2.3. Nagelbeanspruchung

Die maximale Beanspruchung eines Nagels auf Abscheren infolge einer gleichförmigen Flächenlast auf ein Brettstapelelement berechnet sich über die in Tabelle 5- 7 dargestellten Näherungsgleichungen.

Tabelle 5- 7 Näherungsgleichungen zur Berechnung der Beanspruchung eines Nagels auf Abscheren infolge einer gleichförmigen Flächenlast

Stoßvariante	Gleichförmige Flächenlast
Ungestoßene Lamellen	–
Wechelseitig gestoßene Lamellen	$F_{\text{Na}} = q \cdot \frac{\sqrt{\frac{\ell'}{\ell}} \cdot a_1^{1/3} \cdot \frac{\ell}{h} \cdot d_N^{1,2}}{4,8}$
Wandernd gestoßene Lamellen	$F_{\text{Na}} = q \cdot \frac{a_1^{2/3} \cdot d_N^{4/3} \cdot \left(\frac{\ell}{h}\right)^{2/5}}{17 \cdot \left(\frac{\ell_{\text{ü}}}{\ell}\right)^{2/5}}$
Zufällig gestoßene Lamellen	$F_{\text{Na}} = q \cdot \frac{\sqrt{\frac{\ell}{h}} \cdot a_1^{2/3} \cdot d_N^{1,5}}{9}$

Hierin bedeuten:

- q gleichförmige Streckenlast, bezogen auf 1,0 m [kN/m]
- h Höhe der Lamelle [mm]
- ℓ Stützweite des Brettstapelelementes [mm]
- ℓ' Stoßlage ab Auflager [mm]
- $\ell_{\text{ü}}$ Übergreifungslänge der Lamellen [mm]
- a_1 Nagelabstand [mm]
- d_N Nageldurchmesser [mm]

6 Versuche

Um die Simulationsergebnisse und die daraus abgeleiteten Gleichungen zur Berechnung der Beanspruchungen von Brettstapelelementen zu bestätigen, wurden aus 936 Lamellen 43 Prüfkörper hergestellt und geprüft. Die Prüfkörper wurden von Krämer/Denzler [71] bei der Firma Kaufmann Massivholz GmbH in Oberstadion hergestellt. Die Wahl der Lamellen bei der Herstellung der Prüfkörper erfolgte zufällig, d.h. es wurden keine Prüfkörper aus Lamellen mit ähnlichen mittleren Materialeigenschaften hergestellt. Die Vernagelung der Prüfkörper erfolgte auf einer eigens für die Brettstapelherstellung entwickelten Haltevorrichtung mit dem in der o.g. Firma vorhandenen Pressluftnagler.

Die Prüfkörper unterschieden sich grundsätzlich durch die Anzahl der Lamellenstränge infolge der Belastung (zentrische Einzellast und gleichförmige Flächenlast). Weiterhin wurden die Stoßvarianten, die Nageldichte und die l/h -Verhältnisse der Prüfkörper variiert. Um zu untersuchen, wie gut die Simulationsergebnisse das tatsächliche Trag- und Verformungsverhalten von Brettstapelelementen beschreiben, wurden die Prüfkörper virtuell nachgebildet und die Belastungen simuliert. Hierzu wurden den Lamellen laufende Nummern zugewiesen und deren mittlere Rohdichte, mittlere Holzfeuchte, maximale Ästigkeit und mittlerer Elastizitätsmodul bestimmt. Bei der Herstellung der Prüfkörper wurde die Lage der Lamellen notiert. Unter Berücksichtigung der Simulationsparameter und der mittleren Materialeigenschaften sowie der maximalen Ästigkeit der Lamellen konnten so die Prüfkörper realitätsnah simuliert werden.

6.1 Materialeigenschaften

Die maximale Ästigkeit und die mittlere Rohdichte der Lamellen sind die Eingangsgrößen zur Simulation der Lamelleneigenschaften über Regressionsgleichungen (vgl. Abschnitt 3.1). Nach der Herstellung der Prüfkörper waren die Lage jeder Lamelle und somit auch deren Materialeigenschaften bekannt. Für die Simulation der Prüfkörper wurden die zuvor gemessenen Materialeigenschaften der Lamellen vorgegeben. Die virtuellen Lamellen wurden so generiert, dass der mittlere Elastizitätsmodul der simulierten Lamelle um maximal 3 % von dem gemessenen Wert abwich. Auf diese Weise konnten Prüfkörper nachgebildet werden, deren mittlere Materialeigenschaften und maximale Ästigkeiten um maximal 3% von den gemessenen Werten der geprüften Lamellen abwichen.

6.1.1 Feuchtegehalt der Lamellen

Die Holzfeuchte wurde mittels eines Elektronik-Feuchtemessgerätes (GANN Hydromette M 2050) vor Ort gemessen. Aufgrund der Vielzahl der Lamellen ($n = 936$) wurden die Holzfeuchten nicht nach DIN 52183 [73] bestimmt. Beide Methoden zur Bestimmung der Holzfeuchte der Lamellen liefern nur lokale Werte, die sich in Lamellenlängsrichtung unterscheiden können.

Der Mittelwert der Holzfeuchte ergab sich zu 14,4% mit einer Standardabweichung von 1,14%.

6.1.2 Rohdichte

Die Rohdichte ρ_u der feuchten Lamellen wurde auf der Grundlage von DIN 52182 [20] ermittelt und berechnet sich nach Gleichung (6- 1):

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \quad [\text{kg/m}^3] . \quad (6- 1)$$

Hierin bedeuten:

m_u Masse der feuchten Lamellen [kg]

V_u Volumen der feuchten Lamellen [m^3]

Das Volumen der Lamellen wurde mittels Mess-Schiebern für die Breite und Höhe auf ca. 0,1 mm genau sowie mittels Maßlatten (gekappte Dachlatten mit definierten Längen) und Zollstöcken für die Länge auf ca. 1,0 mm genau ermittelt. Die Masse der einzelnen feuchten Lamellen wurde mit einer elektronischen Waage (Messbereich 0 – 35 kg, Messgenauigkeit $\pm 1,0$ g) gemessen.

In Bild 6- 1 ist die Häufigkeitsverteilung der mittleren Rohdichten von 936 Lamellen und eine angepasste Dichtefunktion dargestellt.

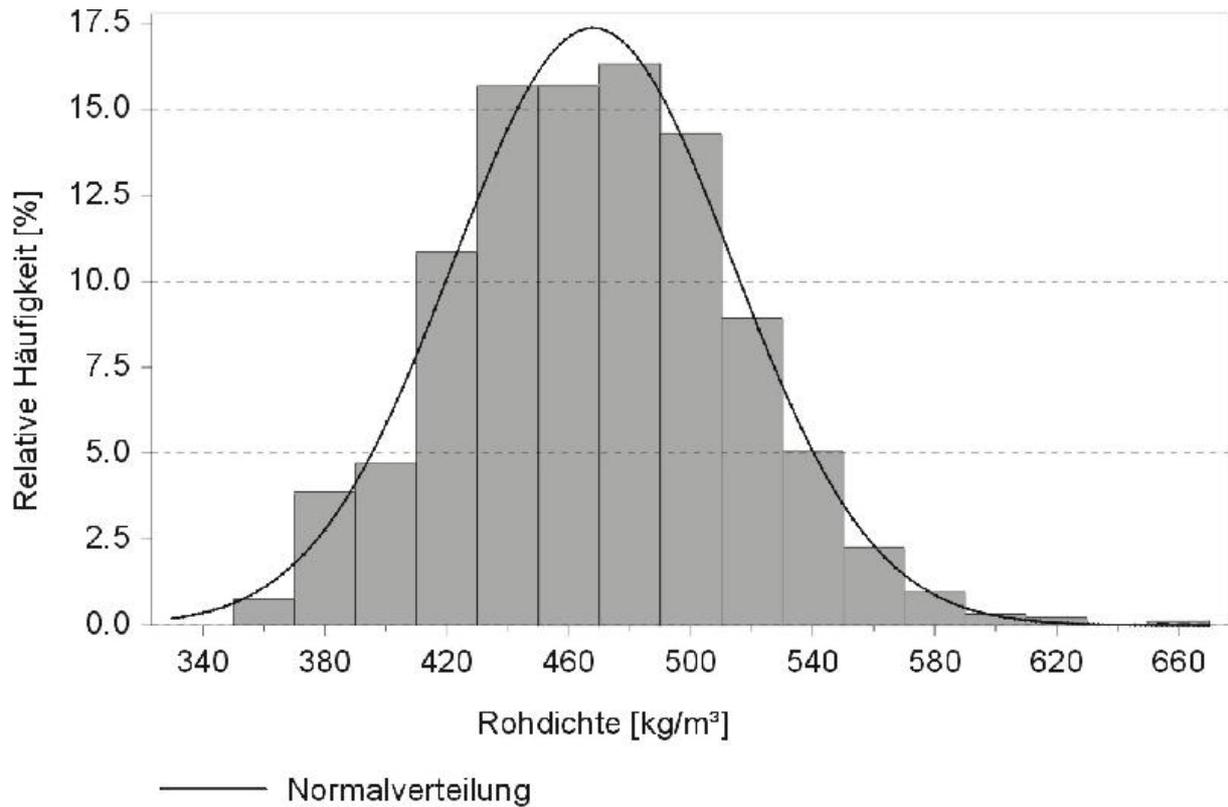


Bild 6- 1 Häufigkeitsverteilung der gemessenen mittleren Rohdichten

Zur Anpassung der Häufigkeitsverteilung der mittleren Rohdichten wurde eine zwei-parametrische Normalverteilung mit folgenden Parametern bestimmt:

Normalverteilung:

μ	Mittelwert	= 467 kg/m ³
σ	Standardabweichung	= 45,9 kg/m ³

6.1.3 Ästigkeit

Die Definition der Ästigkeit findet sich in Abschnitt 3.1.1. Die Lage des für die Ästigkeit maßgebenden 150 mm langen Segments wurde visuell bestimmt. Die Dimensionen der Äste wurden in diesem Segment aufgenommen und in ein Formblatt übertragen. Der KAR-Wert des Lamellen-Segmentes wurde mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms berechnet. Die Ästigkeit kann nach Gleichung (6- 2) bestimmt werden:

$$\text{KAR} = \frac{\sum \text{Astflächen}}{\text{Lamellenquerschnitt}} \quad [/]. \quad (6- 2)$$

Die Verteilung der Ästigkeit in Lamellenlängsrichtung wurde nicht untersucht, da nur der maximale KAR-Wert als Eingangsgröße in die Simulationsprogramme eingeht und die restlichen KAR-Werte über Regressionsgleichungen auf die virtuellen Lamellen verteilt werden.

In Bild 6- 2 ist die Häufigkeitsverteilung der maximalen KAR-Werte von 936 Lamellen und eine angepasste Dichtefunktion dargestellt.

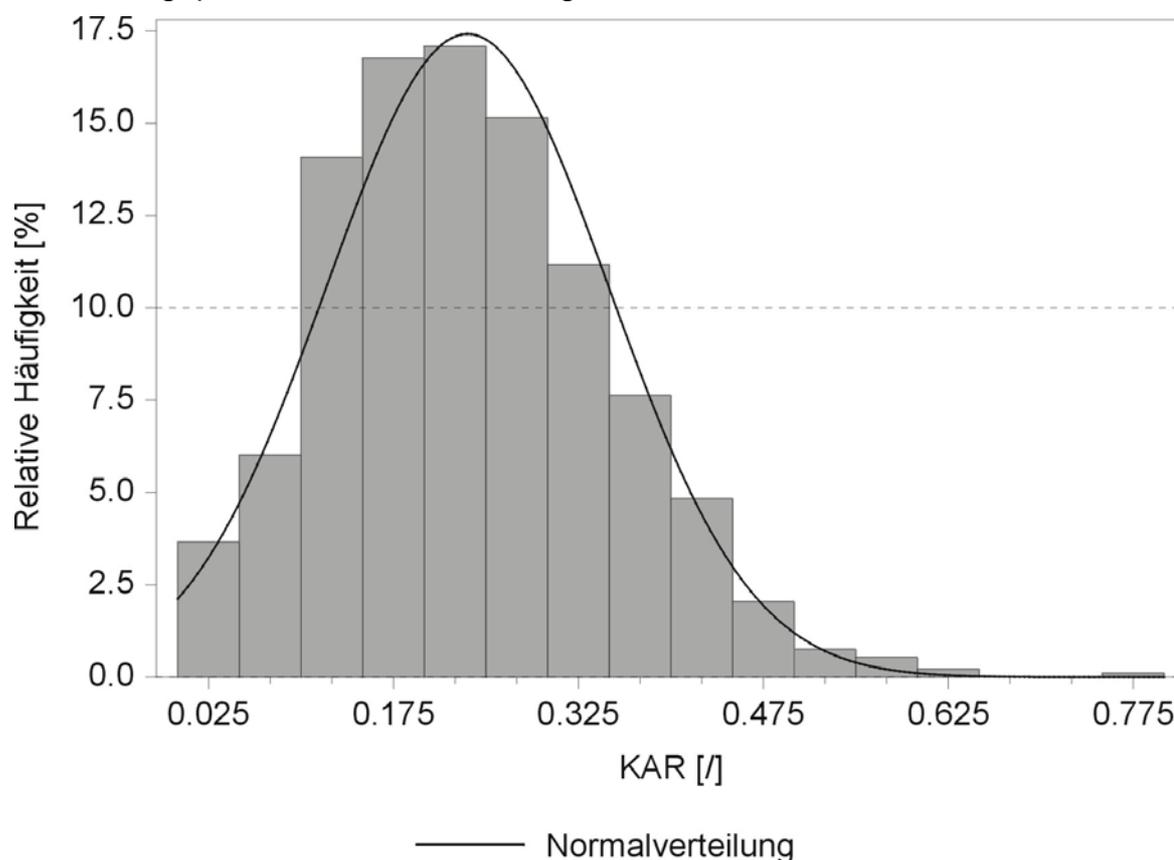


Bild 6- 2 Verteilung der gemessenen maximalen Ästigkeiten

Die Parameter zur Beschreibung der Normalverteilung ergeben sich zu:

μ	Mittelwert	= 0,235 [°]
σ	Standardabweichung	= 0,115 [°]

6.1.4 Elastizitätsmodul

Der mittlere Elastizitätsmodul von Lamellen kann grundsätzlich auf zwei verschiedene Arten bestimmt werden. Nach DIN 52186 [74] kann der Biege-Elastizitätsmodul über einen quasi statischen 4-Punkt-Biegeversuch, d.h. ein Einfeldträger mit zwei Lastenleitungen in den Drittelpunkten, bestimmt werden. Der Nachteil dieser Methode liegt in dem sehr hohen Zeitaufwand für die Durchführung und Auswertung der Versuche.

Eine andere zerstörungsfreie Methode zur Bestimmung des mittleren Elastizitätsmoduls veröffentlichte Görlacher 1984 [75]. Hierbei wird ein stabförmiges Bauteil in Longitudinal- oder Transversalschwingungen versetzt und über die Messung der Schwingungsdauer kann mit Hilfe einer Näherungslösung der Differentialgleichung der Biegeschwingung ein dynamischer Elastizitätsmodul E_{dyn} berechnet werden. In [76] gibt Görlacher Gleichung (6- 3) zur Berechnung des dynamischen Elastizitätsmoduls eines Bauteils auf der Grundlage der Längsschwingungszeit T einer Schwingung an, mit deren Hilfe die Berechnung der dynamischen Elastizitätsmoduln der Lamellen durchgeführt wurde.

$$E_{\text{dyn}} = 4 \cdot \rho_u \cdot \ell^2 \cdot f^2 \cdot 10^{-6} \quad [\text{N/mm}^2] . \quad (6- 3)$$

Hierin bedeuten:

ℓ	Länge der Bauteile [m]
ρ_u	mittlere Rohdichte der Lamelle [kg/m^3]
f	Frequenz = $1/T$ [1/s] = Hz

Die mittleren Elastizitätsmoduln der Lamellen wurden dynamisch mittels des oben beschriebenen Verfahrens bestimmt.

Die Frequenz der Longitudinalschwingungen wurde mit dem Messgerät GRINDOSONIC der Firma J.W. Lemmens-Elektronika N.V. gemessen. Hierzu wurden die Lamellen flachkant mittig auf eine kleine, ca. 20/20 cm große Unterlage aus Polystyrol gelegt, um eine möglichst ungestörte Verteilung der Längsschwingungen zu ermöglichen. Die Longitudinalschwingung wurde durch einen leichten Schlag auf das

Hirnholz der Lamelle mit einem Hammer erzeugt, wobei die Schwingung mit einem piezo-elektrischen Taster aufgenommen wurde. Das Messgerät zeigte kurz vor dem Abklingen der Schwingungen die mittlere Frequenz „f“ der letzten acht Schwingungen an.

Die gemessenen Frequenzen lagen zwischen 405 Hz und 985 Hz mit einem Mittelwert von 639 Hz und einer Standardabweichung von 105 Hz.

Über die geometrischen Werte der Lamellen (h , t , ℓ), die Massen der Lamellen und die Frequenzmessung konnten über Gleichung (6- 3) die mittleren dynamischen Elastizitätsmoduln bestimmt werden. In Bild 6- 3 sind die mittleren dynamischen Elastizitätsmoduln von 936 Lamellen und eine angepasste Dichtefunktion dargestellt.

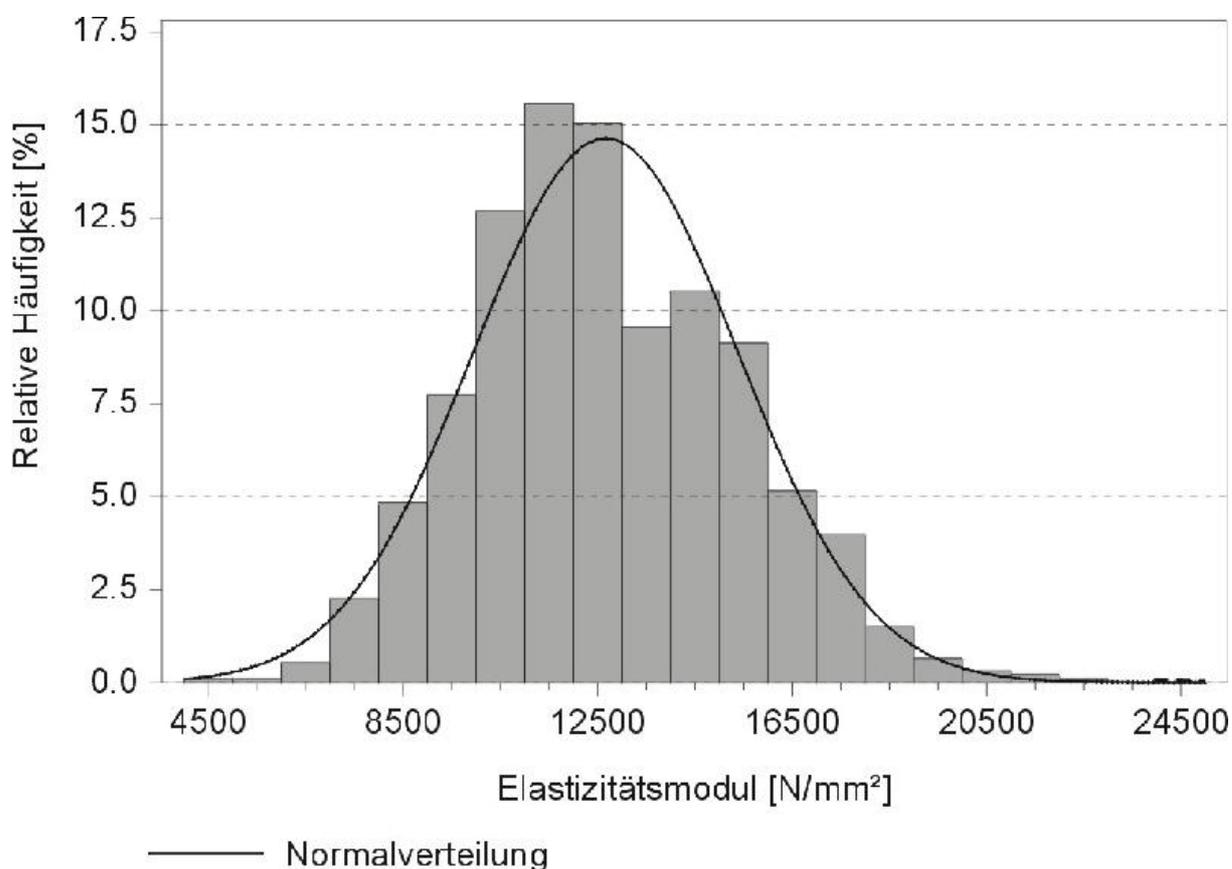


Bild 6- 3 Verteilung der gemessenen mittleren dynamischen Elastizitätsmoduln

Zur Anpassung der Häufigkeitsverteilung der mittleren Elastizitätsmoduln wurde eine zweiparametrische Normalverteilung mit folgenden Parametern bestimmt:

Normalverteilung:

μ	Mittelwert	= 12664 N/mm ²
σ	Standardabweichung	= 2726 N/mm ²

In Bild 6- 4 sind die mittleren dynamischen Elastizitätsmoduln über den zugehörigen mittleren Rohdichten dargestellt.

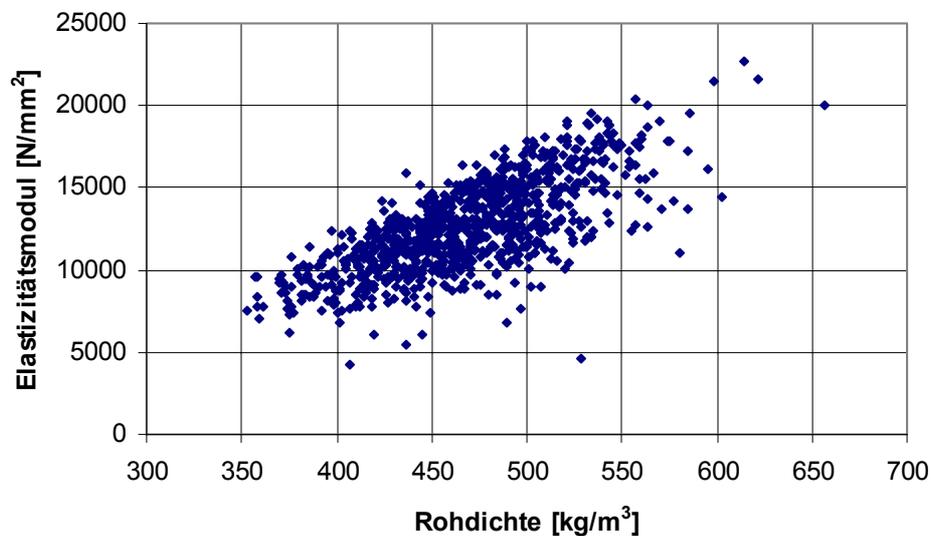


Bild 6- 4 Mittlere dynamischen Elastizitätsmoduln über mittlere Rohdichten (936 Werte)

6.2 Planung und Herstellung der Prüfkörper

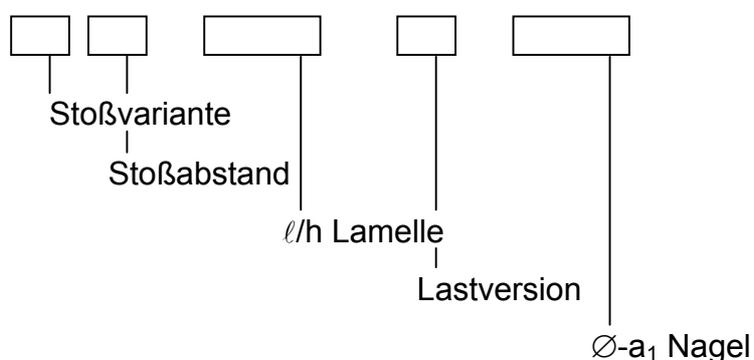
Für die Planung und Herstellung der Prüfkörper standen 936 Lamellen zur Verfügung. Mit diesen Lamellen wurde eine maximale Anzahl von Prüfkörpern geplant. So wurden Prüfkörper mit verschiedenen l/h -Verhältnissen, mit unterschiedlichen Nageldurchmessern und Nagelabständen, mit verschiedenen Stoßvarianten und für unterschiedliche Belastungsvarianten hergestellt. Bei der Planung der Prüfkörper wurden die Simulationsparameter berücksichtigt. So wurden z.B. die Nagelabstände in den Bereichen 75 mm, 150 mm und 225 mm variiert. Die Nagelung erfolgte mit einem Pressluftnagler und wurde als zweischnittige Holz-Holz-Nagelung ausgeführt.

Prüfkörper, die durch eine zentrische Einzellast belastet wurden, bestanden aus mindestens 30 Lamellensträngen (Lastausbreitung), Prüfkörper unter einer gleichförmigen Flächenlast bestanden aus 12 Lamellensträngen. Durch die Wahl der Anzahl der Lamellenstränge in den Prüfkörpern konnte sichergestellt werden, dass die Stöße immer symmetrisch zur Längs- und Querachse angeordnet waren, um so eine ungewollte Torsionsbeanspruchung der Prüfkörper zu vermeiden. Dies traf bei Prüfkörpern mit zufällig verteilten Lamellenstößen nicht zu.

Um den Einfluss der Reibung [72] zwischen den Lamellen möglichst gering zu halten, wurden in jede Scherfuge zwei 0,15 mm dicke PE-Folien eingelegt. Diese Maßnahme wurde gewählt, da bei eingebauten Brettstapelelementen durch Feucht- abnahme der Kontakt zwischen den Lamellen verloren geht und somit keine Last- übertragung zwischen den Lamellen infolge Reibung stattfinden kann. Die Lamellen zur Herstellung von Brettstapelelementen haben im Mittel eine ca. 3 % höhere Holz- feuchte als die zu erwartende Ausgleichsfeuchte der Brettstapelelemente im einge- bauten Zustand. Die Übertragung der Schubkräfte in den Scherfugen erfolgt nur über die Verbindungsmittel.

Der Abstand der Stirnseiten der Lamellen im Stoßbereich wurde konstant mit 3,0 cm durch das Einlegen eines Abstandsholzes ausgeführt. Die in der Praxis ausgeführten Lamellenstöße in einem Brettstapelelement sind zwar deutlich passgenauer, den- noch war bei der Herstellung der Prüfkörper beabsichtigt, das steifigkeitserhöhende Anlegen der Stirnseiten der Lamellen im Biegedruckbereich zu vermeiden.

Die Bezeichnung der Prüfkörper erfolgte nach unten stehendem Schema, das alle relevanten Simulationsparameter enthält:



Hierin bedeuten:

Stoßvariante	W	wechselseitiger Stoß
	T	treppenförmiger (wandernder) Stoß
	Z	zufällig verteilter Stoß
	U	ungestoßen
Stoßabstand	Abstand des ersten Stoßes bis zum Auflager, bzw. Übergreifungslänge (ℓ') [cm]	
ℓ/h Lamelle	Stützweite der Lamellenstränge [m] / Höhe der Lamellen [mm]	
Lastversion	Q	Flächenlast
	F	Einzellast
\varnothing -a ₁ Nagel	Durchmesser des Nagels [mm] – Nagelabstand [cm]	

Die Bezeichnung

[Q08] T60_4,20/165_Q_3,1-7,5

beinhaltet folgende Informationen:

Q08 ist eine Kurzbezeichnung und bedeutet, dass es sich um einen Prüfkörper unter einer gleichförmigen Flächenlast mit der laufenden Nummer 08 handelt. Diese Kurzform wird im Folgenden verwendet.

Die eigentliche Bezeichnung liefert alle relevanten Daten: Die Lamellen des Prüfkörpers sind treppenförmig (wandernd) gestoßen [T]; der Abstand des ersten Stoßes vom Auflager beträgt 60 cm [60]; die Stützweite beträgt 4,20 m [4,20]; die Lamellenhöhe beträgt 165 mm [165]; das „Q“ steht wie bei der Kurzbezeichnung für eine Flächenlast. Hergestellt wurde der Brettstapel mit 3,1 mm dicken Nägeln [3,1] im Abstand von 7,5 cm [7,5].

Die in Tabelle 6- 1 und Tabelle 6- 2 vorkommende Größe ℓ_{ges} bezeichnet die gesamte Länge der Prüfkörper (mit Auflagerüberstand), die Größe ℓ bezeichnet die Stützweite der Prüfkörper. Die Versuche mit Brettstapelelementen unter gleichförmiger Flächenlast sind in Tabelle 6- 1 zusammengestellt.

Tabelle 6- 1 Zusammenstellung der Versuchskörper für gleichförmige Flächenlast

Bezeichnungen [/]		l_{ges} [m]	l [m]	h [mm]	\varnothing [mm]	a_1 [cm]	Stoßart [/]
Q1	W107_3.15/165_Q_3.1-7.5	3,50	3,15	165	3,1	7,5	Wechsel
Q2	W107_3.15/165_Q_3.1-15	3,50	3,15	165	3,1	15,0	Wechsel
Q3	W107_3.15/165_Q_3.4-22.5	3,50	3,15	165	3,4	22,5	Wechsel
Q4	W107_3.15/180_Q_3.1-15	3,50	3,15	180	3,1	15,0	Wechsel
Q5	W90_3.60/165_Q_3.4-7.5	4,00	3,60	165	3,4	7,5	Wechsel
Q6	W90_3.60/165_Q_3.4-15	4,00	3,60	165	3,4	15,0	Wechsel
Q7	W80_4.05/165_Q_3.4-22.5	4,50	4,05	165	3,4	22,5	Wechsel
Q8	T60_4.20/165_Q_3.1-7.5	4,50	4,20	165	3,1	7,5	Treppe
Q9	T60_4.20/165_Q_3.1-15	4,50	4,20	165	3,1	15,0	Treppe
Q10	T60_3.60/165_Q_3.1-22.5	4,00	3,60	165	3,1	22,5	Treppe
Q11	T60_4.20/165_Q_3.4-15	4,50	4,20	165	3,4	15,0	Treppe
Q12	T90_3.60/180_Q_3.1-15	4,00	3,60	180	3,1	15,0	Treppe
Q13	T120_4.80/180_Q_3.1-7.5	5,00	4,80	180	3,1	7,5	Treppe
Q14	T120_4.80/180_Q_3.1-15	5,00	4,80	180	3,1	15,0	Treppe
Q15	T118_4.725/180_Q_3.1-22.5	5,00	4,73	180	3,1	22,5	Treppe
Q16	T120_4.80/180_Q_3.4-15	5,00	4,80	180	3,4	15,0	Treppe
Q17	T90_3.60/165_Q_3.1-15	4,00	3,60	165	3,1	15,0	Treppe
Q18	Z_3.60/165_Q_3.1-7.5	3,80	3,60	165	3,1	7,5	Zufall
Q19	Z_3.60/165_Q_3.1-15	3,80	3,60	165	3,1	15,0	Zufall
Q20	Z_3.60/165_Q_3.1-22.5	3,80	3,60	165	3,1	22,5	Zufall
Q21	Z_3.60/180_Q_3.4-7.5	3,80	3,60	180	3,4	7,5	Zufall
Q22	Z_3.60/180_Q_3.4-15	3,80	3,60	180	3,4	15,0	Zufall
Q23	Z_3.60/180_Q_3.4-22.5	3,80	3,60	180	3,4	22,5	Zufall
Q24	U_4.05/180_Q_3.1-22.5	4,50	4,05	180	3,1	22,5	Ohne

Die Versuche mit Brettstapelelementen unter zentrischer Einzellast sind in Tabelle 6- 2 zusammengestellt.

Tabelle 6- 2 Zusammenstellung der Versuchskörper für zentrische Einzellast

Bezeichnungen [/]		l_{ges} [m]	l [m]	h [mm]	\varnothing [mm]	a_1 [cm]	Stoßart [/]
F01	W105_3.15/180_F_3.1-7.5	3,50	3,15	180	3,1	7,50	Wechsel
F02	W105_3.15/180_F_3.1-15	3,50	3,15	180	3,1	15,0	Wechsel
F03	W105_3.15/180_F_3.1-22.5	3,50	3,15	180	3,1	22,5	Wechsel
F04	W80_4.05/165_F_3.4-15	4,50	4,05	165	3,4	15,0	Wechsel
F05	W100_4.05/165_F_3.1-15	4,50	4,05	165	3,1	15,0	Wechsel
F06	T60_3.60/180_F_3.1-7.5	4,00	3,60	180	3,1	7,5	Treppe
F07	T60_3.60/180_F_3.1-15	4,00	3,60	180	3,1	15,0	Treppe
F08	T60_3.60/180_F_3.1-22.5	4,00	3,60	180	3,1	22,5	Treppe
F09	T105_4.20/165_F_3.1-15	4,50	4,20	165	3,1	15,0	Treppe
F10	T75_4.50/180_F_3.4-15	5,00	4,50	180	3,4	15,0	Treppe
F11	Z_3.60/180_F_3.1-15	3,80	3,60	180	3,1	15,0	Zufall
F12	Z_3.60/180_F_3.4-15	3,80	3,60	180	3,4	15,0	Zufall
F13	Z_3.60/165_F_3.1-22.5	3,80	3,60	165	3,1	22,5	Zufall
F14	U_3.75/190_F_3.8-15	4,00	3,75	190	3,8	15,0	Ohne
F15	U_4.50/155_F_3.1-15	5,00	4,50	155	3,1	15,0	Ohne
F16	U_4.50/140_F_3.4-15	5,00	4,50	140	3,4	15,0	Ohne
F17	U_3.75/180_F_3.1-7.5	4,00	3,75	180	3,1	7,50	Ohne
F18	U_3.75/180_F_3.1-15	4,00	3,75	180	3,1	15,0	Ohne
F19	U_3.60/180_F_3.1-22.5	4,00	3,60	180	3,1	22,5	Ohne

Bei der Herstellung der Prüfkörper wurde die Lage jeder Lamelle registriert und in vorbereitete Pläne eingezeichnet. Mit dem Wissen um die Lage der Lamellen im Brettstapelelement und um deren mittlere Materialeigenschaften konnte das Trag- und Verformungsverhalten des Prüfkörpers realitätsnah simuliert werden. Aus den Simulationsergebnissen konnte so eine Bruchlast für jeden Prüfkörper prognostiziert werden. Das Erreichen der Nageltragfähigkeit war i.d.R. das maßgebende Kriterium für die Berechnung der Bruchlast, wurde aber nicht als Versagenskriterium für die Versuchsdurchführung angesehen, da nach dem Erreichen der Fließgrenze der Nägel die Prüfkörper noch deutlich höhere Lasten abtragen konnten. Die Bruchlast war für die Dimensionierung der Fläche der Lasteinleitungselemente erforderlich, so dass sich die Lasteinleitungselemente nicht zu sehr in die Lamellen des Brettstapelelementes eindrückten (vgl. Bild 6- 5). Die Lasteinleitung erfolgte durch einen Stahlblock, der die Breite von $2 t_{\text{Lamelle}} - 2 \text{ mm}$ aufwies.



Bild 6- 5 Lasteinleitung und Wegaufnehmer - zentrische Einzellast

6.3 Versuchsdurchführung

6.3.1 Zentrische Einzellasten

Die Verformungen der Prüfkörper wurden unabhängig von der Belastungsart (Einzellast/Flächenlast) mit induktiven Wegaufnehmern gemessen. Bei den Prüfkörpern unter zentrischen Einzellasten wurden die Verformungen in der Symmetrieachse quer zur Elementhaupttrichtung gemessen. Weiterhin wurden Wegaufnehmer im Bereich der Lasteinleitung und im Bereich von $l/4$ wiederum quer zur Elementhaupttrichtung angebracht. In Bild 6- 6 sind die Orte der induktiven Wegaufnehmer an den Prüfkörpern durch Kreuze markiert.

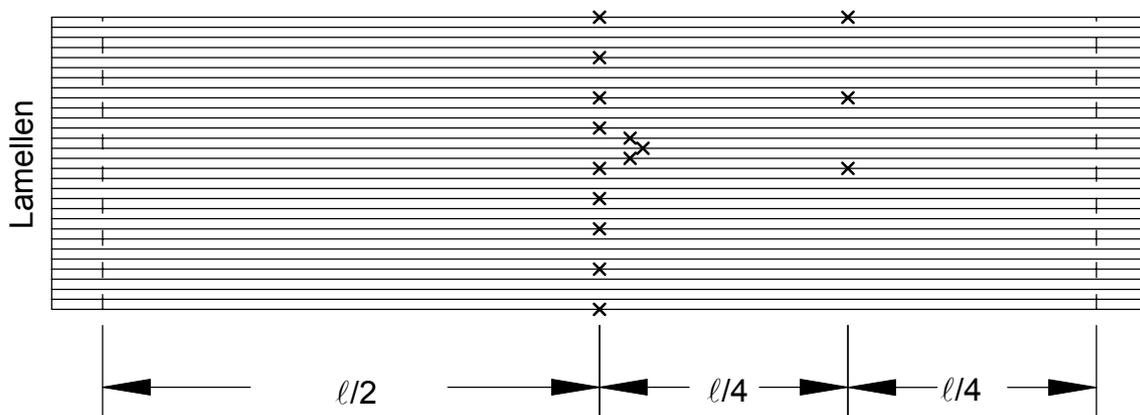


Bild 6- 6 Lage der Wegaufnehmer bei Prüfkörpern unter Einzellasten, Draufsicht

Die Versuche wurden in Anlehnung an DIN EN 26891 [49] durchgeführt. Hiernach wird auf den Prüfkörper 40% der geschätzten Höchstlast F_{est} aufgebracht, die Last wird 30 Sekunden lang konstant gehalten, wonach sie auf den Betrag von 10% F_{est} verringert wird, dieses Lastniveau wird 30 Sekunden lang konstant gehalten und danach wird der Prüfkörper bis zum Bruch belastet. Der Prüfablauf ist in Bild 6- 7 dargestellt.

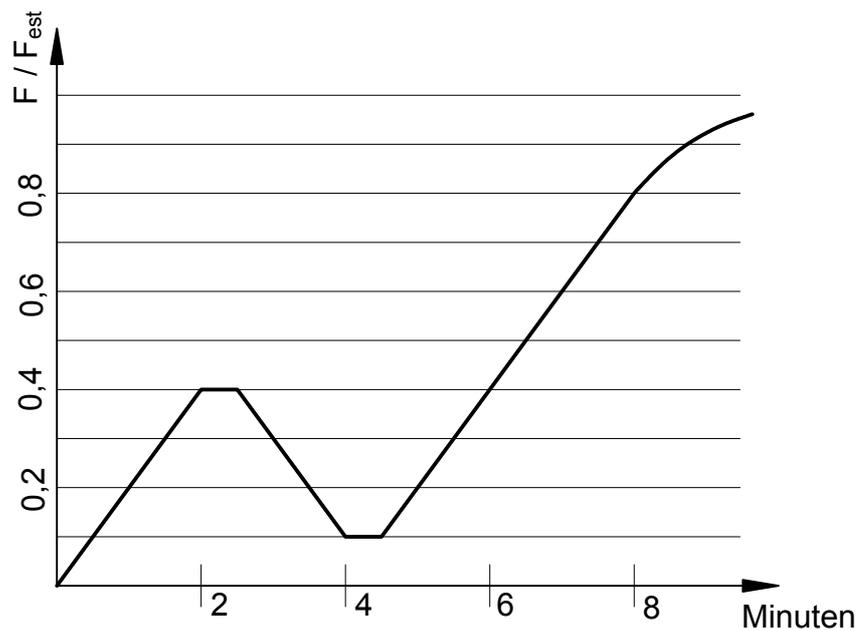


Bild 6- 7 Prüfablauf nach DIN EN 26891

Diejenigen Prüfkörper, die durch zentrische Einzellasten beansprucht wurden, zeigten zwei unterschiedliche Versagensformen. Prüfkörper mit ungestoßenen Lamellen oder mit einer hohen Nageldichte versagten i.d.R. spröde durch das Erreichen der Biegefestigkeit der Lamellen.

Die Prüfkörper mit großen Nagelabständen oder mit ungünstigen Stoßvarianten, d.h. kurze Übergreifungslängen, versagten infolge gegenseitigem Abscheren der Lamellen im Bereich der Lasteinleitung (Durchstanzens der Einzellast). Das Erreichen der Nageltragfähigkeit stellte hier das maßgebende Versagenskriterium dar (vgl. Bild 6- 8). Das Versagen eines Brettstapelelementes infolge des gegenseitigen Abscherens der Lamellen im Bereich der Lasteinleitung stellt eine duktile Versagensform dar, der Restquerschnitt des Brettstapelelementes, rechts und links der Lasteinleitungsstelle, bleibt weiterhin tragfähig. Flächenlasten können weiterhin abtragen werden.



Bild 6- 8 Versagen eines Prüfkörpers infolge des gegenseitigen Abscherens der Lamellen im Lasteinleitungsbereich

6.3.2 Gleichförmige Flächenlasten

Die Prüfkörper unter gleichförmiger Flächenlast bestanden aus jeweils 12 Lamellensträngen. Mit dieser Anzahl von Lamellensträngen konnten alle Stoßvarianten, mit Ausnahme der zufällig verteilten Stöße, symmetrisch zur Brettstapelelement-Längsachse hergestellt werden. Weiterhin entfiel - im Gegensatz zu den Prüfkörpern unter zentrischer Einzellast - die Untersuchung der Lastausbreitung.

Um bei den Versuchen eine möglichst realistische Flächenlast zu simulieren, wurde die Prüfkraft mittels vier gleichgeschalteten Einzelprüfzylindern über vier Längstraversen in 8 U-Profile eingeleitet. Somit wurde in den $1/9$ -Punkten des Prüfkörpers jeweils eine Linienlast quer zur Prüfkörperhaupttrichtung aufgebracht. In Bild 6- 9 ist der Aufbau der Versuche mit Prüfkörpern unter gleichförmiger Flächenlast dargestellt.

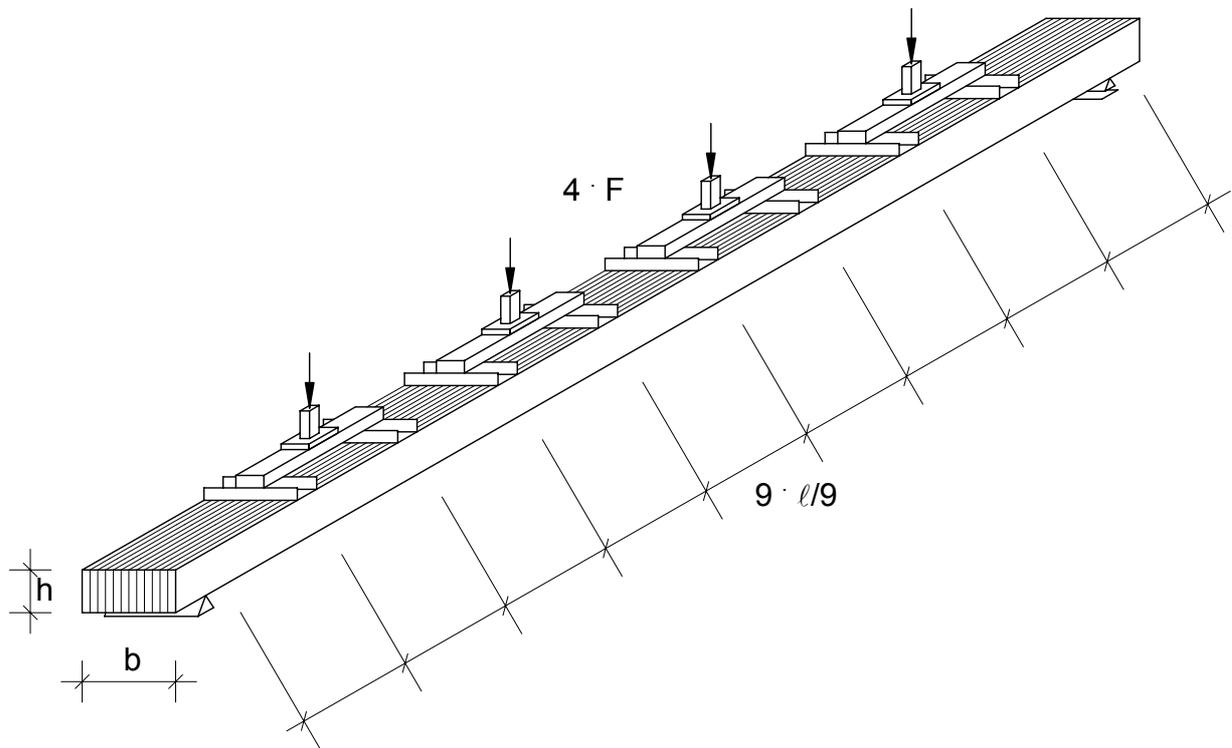


Bild 6- 9 Versuchsaufbau für Prüfkörper unter gleichförmiger Flächenlast

An den Prüfkörpern unter gleichförmiger Flächenlast wurden die Verformungen an den Längsseiten bei $l/4$, $l/2$ und bei $3l/4$ mit induktiven Wegaufnehmern gemessen. Weiterhin wurden Wegaufnehmer im Bereich der Prüfkörpermitte und im Stoßbereich einer Lamelle angebracht. In Bild 6- 10 sind die Lagen der induktiven Wegaufnehmer an den Prüfkörpern durch Kreuze markiert.

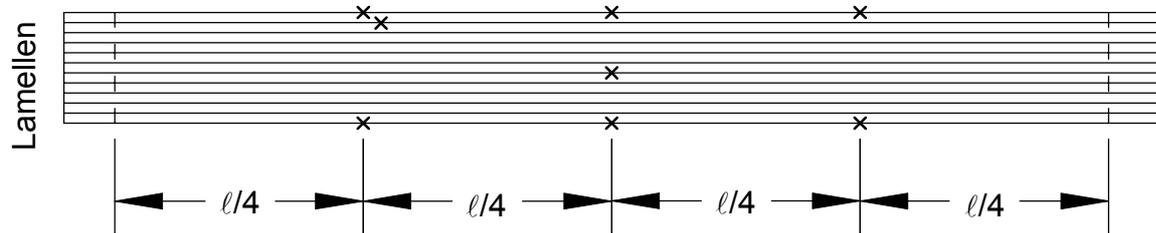


Bild 6- 10 Lage der Wegaufnahme bei Versuchen mit Flächenlasten, Draufsicht

Die Prüfkörper unter gleichförmigen Flächenlasten zeigten analog zu den Prüfkörpern unter zentrischer Einzellast zwei unterschiedliche Versagensformen. Prüfkörper mit einer hohen Nageldichte versagten i.d.R. spröde durch das Erreichen der Biegefestigkeit der Lamellen. Die Prüfkörper mit einer geringen Nageldichte oder mit ungünstigen Stoßvarianten zeigten ein duktileres Versagen, verursacht durch das Erreichen der Tragfähigkeit der Nägel, so dass die Lamellen gegenseitig abscheren. In Bild 6- 11 ist Prüfkörper Q4 dargestellt, der infolge des Abscherens der Nägel versagte.



Bild 6- 11 Versagen eines Prüfkörpers durch das Abscheren der Nägel

6.4 Darstellung der Versuchsergebnisse

Im Folgenden werden für jede Belastungsart exemplarisch nur die Versuchsergebnisse eines Versuches dargestellt und mit den Simulationsergebnissen verglichen. Eine ausführliche Darstellung der Versuchsergebnisse und die Dokumentation der Prüfkörper findet sich in [13] und [71].

Die Versuche wurden bis zum Erreichen der Traglast gefahren, d.h. bis keine Laststeigerung mehr möglich war.

6.4.1 Zentrische Einzellasten

In Bild 6- 12 ist die Last-Verschiebungs-Kurve des Prüfkörpers „W105_3.15/180_F_3.1-7.5“ (Versuch F01) dargestellt. Die Schleife im unteren Lastbereich resultiert aus dem Prüfablauf in Anlehnung an DIN EN 26891 (vgl. Abschnitt 6.3).

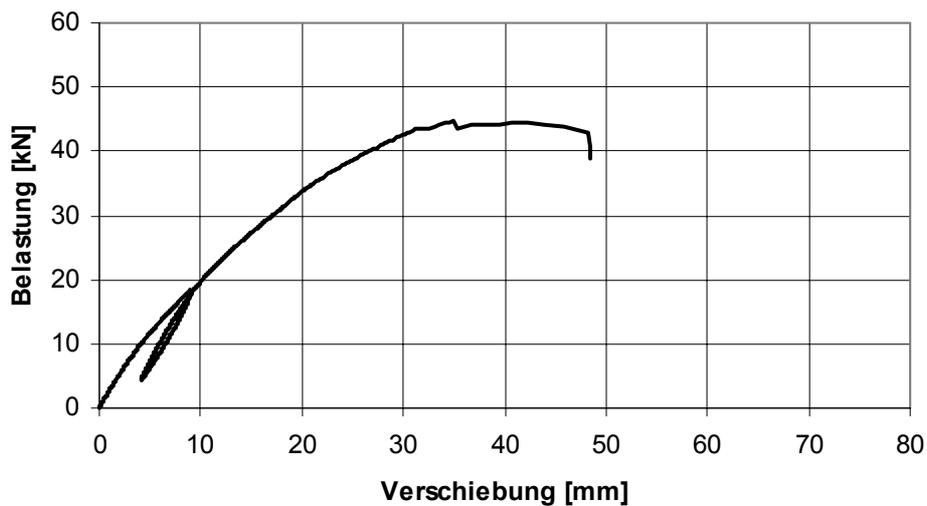


Bild 6- 12 Last- Verschiebungs-Kurve des Prüfkörpers F01

In Bild 6- 13 ist die Verformungsfigur des Prüfkörpers F01 quer zur Spannrichtung zentrisch unter der Prüflast und unter zwei Laststufen dargestellt (gestrichelte Linie). Zum direkten Vergleich sind die korrespondierenden Simulationsergebnisse (durchgezogene Linie) eingezeichnet. Die Lage der induktiven Wegaufnehmer, die quer zur Spannrichtung angebracht waren, sind in Bild 6- 6 dargestellt.

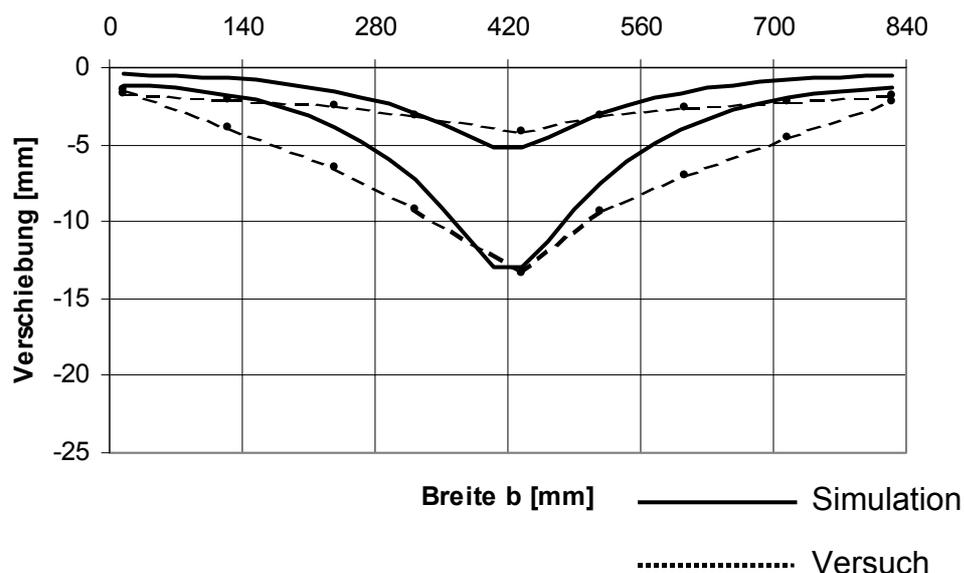


Bild 6- 13 Vergleich der Verformungen des Prüfkörpers F01 in Querrichtung bei einer Belastung von 10 kN und 25 kN

In Bild 6- 14 ist die Verformung des belasteten Lamellenstranges vom linken Auflager aus bis zur Lasteinleitung (halbe Stützweite) unter zwei Laststufen dargestellt. Analog zum vorhergehenden Bild wurden zum direkten Vergleich die Simulationsergebnisse (durchgezogene Linie) eingezeichnet. Die hier dargestellten Linien wurden über die Messergebnisse bzw. die Simulationsergebnisse konstruiert, indem ein geglätteter Polygonzug über die Wertepaare (Last/Weg) gelegt wurde.

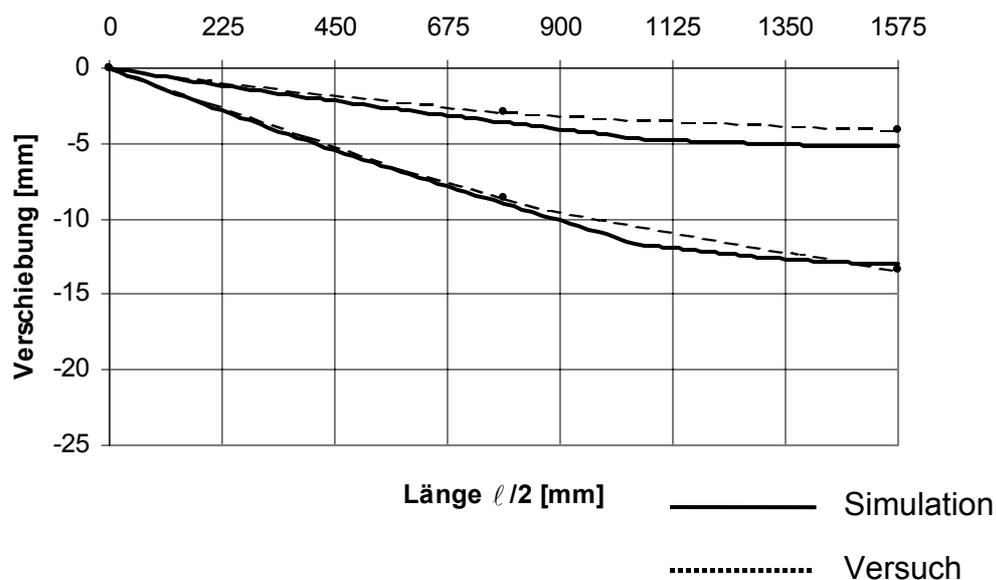


Bild 6- 14 Vergleich der Verformungen des belasteten Lamellenstranges bei einer Belastung von 10 kN und 25 kN; Prüfkörper F01

Die Bruchlasten der 19 Prüfkörper unter zentrischen Einzellasten sind in Tabelle 6- 3 zusammengefasst.

Tabelle 6- 3 Bruchlasten der Prüfkörper unter zentrischen Einzellasten

Bezeichnungen [/]		l [m]	F_{Bruch} [kN]
F01	W105_3.15/180_F_3.1-7.5	3,15	44,7
F02	W105_3.15/180_F_3.1-15	3,15	29,3
F03	W105_3.15/180_F_3.1-22.5	3,15	24,3
F04	W80_4.05/165_F_3.4-15	4,05	52,6
F05	W100_4.05/165_F_3.1-15	4,05	44,1
F06	T60_3.60/180_F_3.1-7.5	3,60	59,4
F07	T60_3.60/180_F_3.1-15	3,60	53,7
F08	T60_3.60/180_F_3.1-22.5	3,60	36,6
F09	T105_4.20/165_F_3.1-15	4,20	37,4
F10	T75_4.50/180_F_3.4-15	4,50	48,3
F11	Z_3.60/180_F_3.1-15	3,60	29,6
F12	Z_3.60/180_F_3.4-15	3,60	46,4
F13	Z_3.60/165_F_3.1-22.5	3,60	31,2
F14	U_3.75/190_F_3.8-15	3,75	99,2
F15	U_4.50/155_F_3.1-15	4,50	30,4
F16	U_4.50/140_F_3.4-15	4,50	37,2
F17	U_3.75/180_F_3.1-7.5	3,75	61,5
F18	U_3.75/180_F_3.1-15	3,75	46,7
F19	U_3.60/180_F_3.1-22.5	3,60	43,0

Um die Verlässlichkeit der Simulationen und der daraus abgeleiteten Gleichungen zur Berechnung von Brettstapelelementen zu überprüfen, wurden die Versuchsergebnisse den Simulationsergebnissen (Prüfkörper) und den Ergebnissen aus den entsprechenden Näherungsgleichungen gegenübergestellt.

In Bild 6- 15 sind die maximalen vertikalen Verformungen der Prüfkörper F 14 – F 19 (ungestoßene Lamellen), die Verformungen aus den zugehörigen Simulationen und die mit den Gleichungen aus Abschnitt 5.1.2 berechneten Verformungen bei einer Laststufe von 20,0 kN abgetragen.

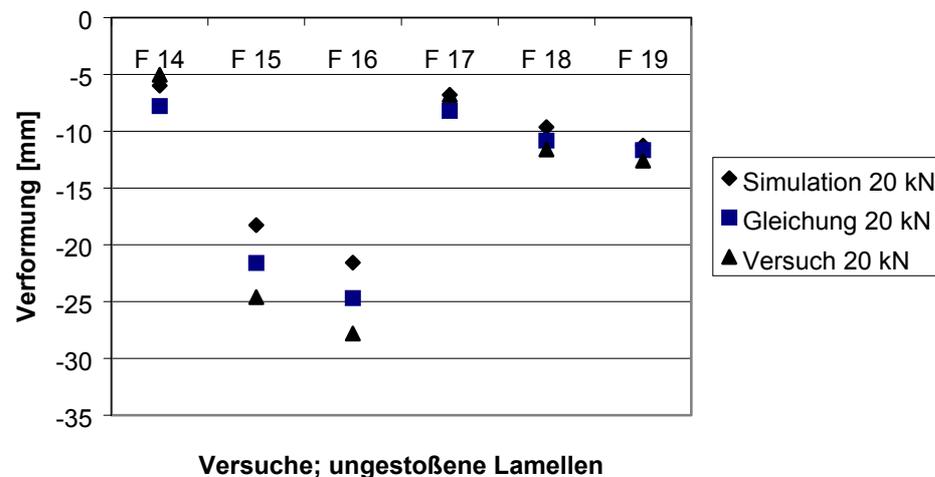


Bild 6- 15 Vertikale Verformungen aus Versuch, Simulation und Gleichung, bei $F = 20,0$ kN, ungestoßene Lamellen

In Bild 6- 16, Bild 6- 17 und Bild 6- 18 sind die entsprechenden Werte der vertikalen Verformungen der Prüfkörper F 1 – F 13 (gestoßene Lamellen), der Verformungen aus den zugehörigen Simulationen und die berechneten Verformungen bei einer Laststufe von 20,0 kN dargestellt.

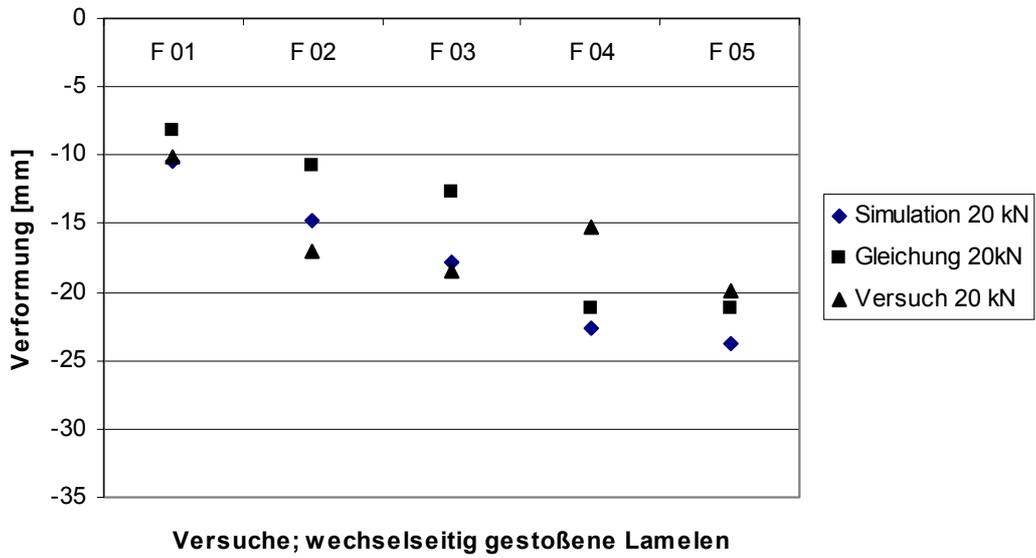


Bild 6- 16 Vertikale Verformungen aus Versuch, Simulation und Gleichung (20,0 kN), wechselseitig gestoßene Lamellen

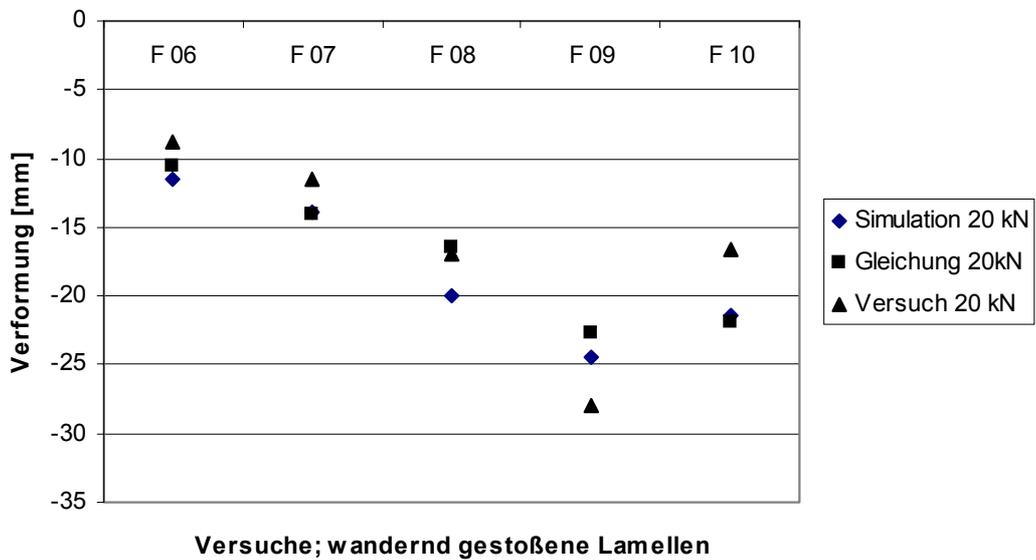


Bild 6- 17 Vertikale Verformungen aus Versuch, Simulation und Gleichung (20,0 kN), wandernd gestoßene Lamellen

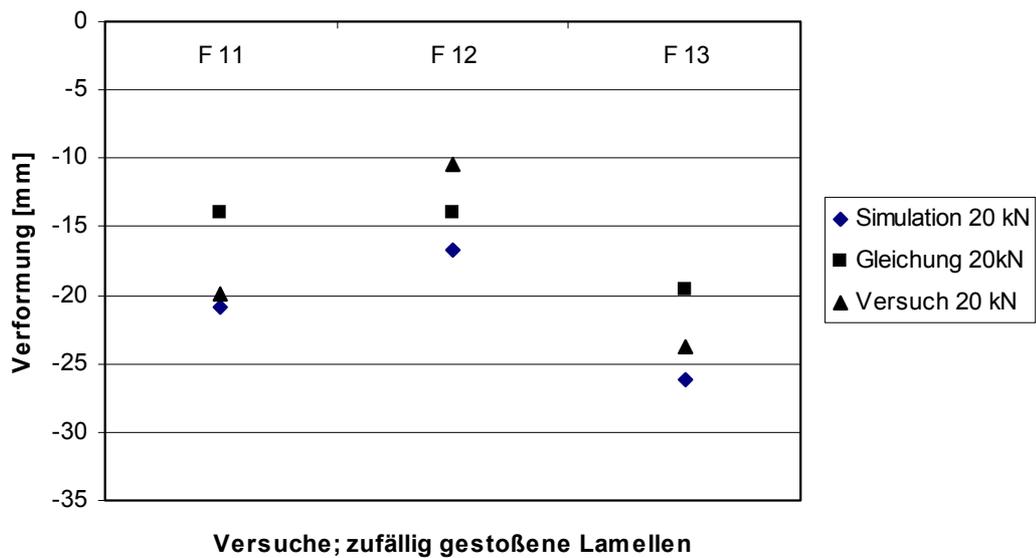


Bild 6- 18 Vertikale Verformungen aus Versuch, Simulation und Gleichung (20,0 kN), wandernd gestoßene Lamellen

6.4.2 Gleichförmige Flächenlasten

Eine gleichförmige Flächenlast ist im Labor nur sehr schwer zu simulieren. Deshalb wurde die Prüfkraft mittels vier gleichgeschalteten Einzelprüfzylindern über vier Längstraversen in 8 U-Profile eingeleitet (vgl. Abschnitt 6.3.2). In Bild 6- 9 ist der Aufbau der Versuche mit Prüfkörpern unter einer angenäherten, gleichförmigen Flächenlast dargestellt.

In den folgenden Bildern sind analog zum Abschnitt 6.4.1 die Verformungen in der Mitte der Prüfkörper den entsprechenden Simulationsergebnissen und den Berechnungsergebnissen gegenübergestellt.

Die Verformungen beziehen sich jeweils auf eine Kolbenlast der Einzelprüfzylinder von 2,0 kN. Eine entsprechende Streckenlast q' kann über Gleichung (6- 4) berechnet werden:

$$q' = \frac{4 \cdot F_K}{\ell} \quad [\text{N/mm}] . \quad (6- 4)$$

Hierin bedeuten:

F_K Einzelkolbenlast der Prüfzylinder [N]

ℓ Stützweite der Prüfkörper [mm]

Bei einem Betrag von 2,0 kN pro Einzelprüfzylinder wirken auf die Prüfkörper angenäherte Streckenlasten von 1,67 N/mm bis 2,54 N/mm ein.

In Bild 6- 19 ist die Last-Verschiebungs-Kurve des Prüfkörpers „W90_3.60/165_Q_3.4_15“ (Q06) dargestellt.

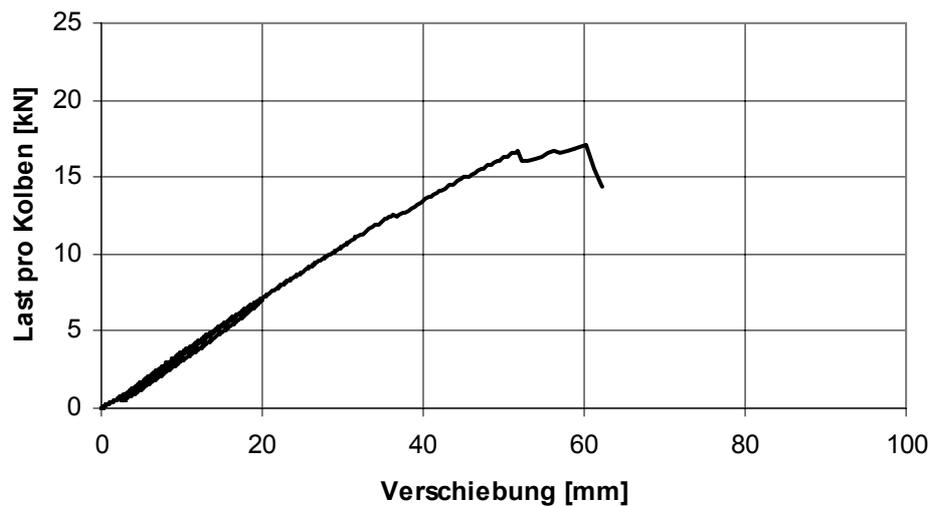


Bild 6- 19 Last-Verschiebungs-Kurve des Prüfkörpers Q06

In Bild 6- 20 ist die Verformung des belasteten Prüfkörpers über die ganze Stützweite unter zwei Laststufen dargestellt. Analog zum vorhergehenden Abschnitt wurden zum direkten Vergleich die Simulationsergebnisse (durchgezogene Linie) eingezeichnet.

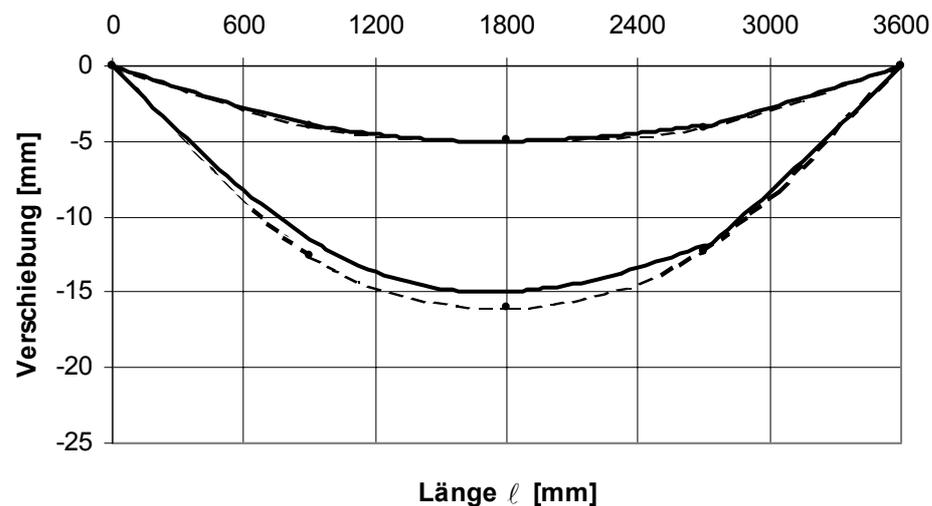


Bild 6- 20 Vergleich der Verformungen des belasteten Lamellenstranges bei einer Belastung von 2,0 kN und 6,0 kN pro Prüfszylinder; Prüfkörper Q06

Die Bruchlasten der 24 Prüfkörper unter gleichförmigen Flächenlasten sind in Tabelle 6- 4 zusammengefasst. Bei den Bruchlasten handelt es sich um die maximalen Lasten der Einzelprüfszylinder F_1 , die mittels Gleichung (6- 4) in eine Streckenlast q' umgerechnet wurden. Die berechneten Streckenlasten q' sind ebenfalls in Tabelle 6- 4 aufgeführt.

Tabelle 6- 4 Bruchlasten der Prüfkörper unter Flächenlasten

Bezeichnungen [/]		l [m]	F_1 [kN]	q^f [kN/m]
Q1	W107_3.15/165_Q_3.1-7.5	3,15	15,5	19,7
Q2	W107_3.15/165_Q_3.1-15	3,15	15,5	19,7
Q3	W107_3.15/165_Q_3.4-22.5	3,15	14,4	18,3
Q4	W107_3.15/180_Q_3.1-15	3,15	17,8	22,6
Q5	W90_3.60/165_Q_3.4-7.5	3,60	17,9	19,9
Q6	W90_3.60/165_Q_3.4-15	3,60	17,2	19,1
Q7	W80_4.05/165_Q_3.4-22.5	4,05	14,5	14,3
Q8	T60_4.20/165_Q_3.1-7.5	4,20	14,4	13,7
Q9	T60_4.20/165_Q_3.1-15	4,20	13,9	13,2
Q10	T60_3.60/165_Q_3.1-22.5	3,60	17,2	19,1
Q11	T60_4.20/165_Q_3.4-15	4,20	14,1	13,4
Q12	T90_3.60/180_Q_3.1-15	3,60	17,9	19,9
Q13	T120_4.80/180_Q_3.1-7.5	4,80	21,3	17,8
Q14	T120_4.80/180_Q_3.1-15	4,80	17,1	14,3
Q15	T118_4.725/180_Q_3.1-22.5	4,73	13,7	11,6
Q16	T120_4.80/180_Q_3.4-15	4,80	12,9	10,8
Q17	T90_3.60/165_Q_3.1-15	3,60	17,0	18,9
Q18	Z_3.60/165_Q_3.1-7.5	3,60	18,6	20,7
Q19	Z_3.60/165_Q_3.1-15	3,60	21,5	23,9
Q20	Z_3.60/165_Q_3.1-22.5	3,60	15,0	16,7
Q21	Z_3.60/180_Q_3.4-7.5	3,60	20,3	22,6
Q22	Z_3.60/180_Q_3.4-15	3,60	24,4	27,1
Q23	Z_3.60/180_Q_3.4-22.5	3,60	25,7	28,6
Q24	U_4.05/180_Q_3.1-22.5	4,05	33,3	32,9

Analog zum Abschnitt 6.4.1 sind die Versuchsergebnisse den Ergebnissen der Simulationen der Prüfkörper und den Ergebnissen aus den Gleichungen zur Berechnung der Beanspruchungen von Brettstapelelementen gegenübergestellt.

In Bild 6- 21, Bild 6- 22 und Bild 6- 23 sind die vertikalen Verformungen der Prüfkörper Q01 – Q23, die maximalen Verformungen aus den zugehörigen Simulationen und die berechneten Verformungen bei einer Last von 2,0 kN pro Einzelprüfzylinder abgetragen.

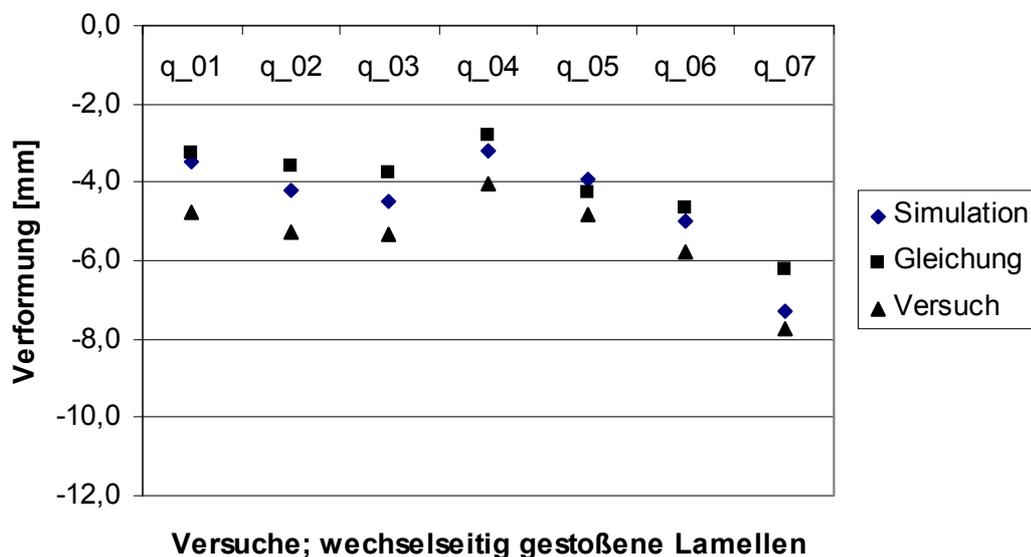


Bild 6- 21 Vertikale Verformungen aus Versuch, Simulation und Gleichung bei 2,0 kN pro Einzelprüfzylinder, wechselseitig gestoßene Lamellen

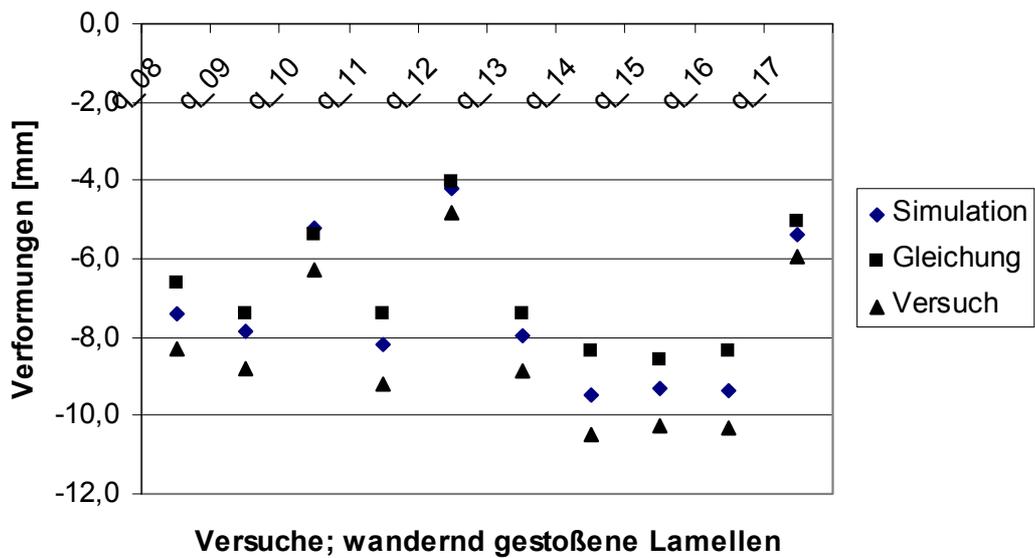


Bild 6- 22 Vertikale Verformungen aus Versuch, Simulation und Gleichung bei 2,0 kN pro Einzelprüfzylinder, wandernd gestoßene Lamellen

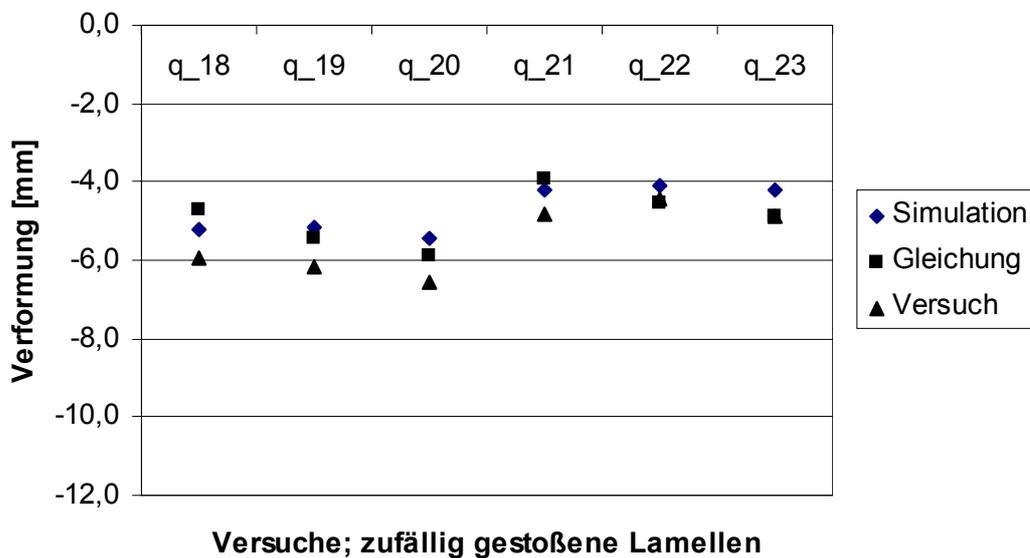


Bild 6- 23 Vertikale Verformungen aus Versuch, Simulation und Gleichung bei 2,0 kN pro Einzelprüfzylinder, zufällig gestoßene Lamellen

7 Vereinfachungen für die Praxis

Mit den in Abschnitt 5 dargestellten Gleichungen können die elastischen Verformungen von Brettstapelelementen, die Biegerandspannungen der Lamellen und die Nagelbeanspruchungen auf Abscheren berechnet werden. Es werden für jede Beanspruchungssituation, zentrische Einzellast und gleichförmige Flächenlast sowie für jede Stoßvariante (ungestoßene, wechselseitig gestoßene, wandernd gestoßene und zufällig gestoßene Lamellen im Brettstapelelement) entsprechende Gleichungen angegeben. Eine Bemessung von Brettstapelelementen ist mit diesen Gleichungen möglich, dennoch ist es angebracht, die Gleichungen zusammenzufassen, um vereinfachte Bemessungsgleichungen für Brettstapelelemente für die praktische Anwendung aufzubereiten.

7.1 Bemessungskonzept

Derzeit werden zwei unterschiedliche Sicherheitskonzepte für die Bemessung von Bauteilen in Holzkonstruktionen angewandt. In der derzeit gültigen Bemessungsnorm DIN 1052, Ausg. 1988 [30] sind globale Sicherheitsfaktoren berücksichtigt, mit denen u.a. zulässige Spannungen der Baustoffe bestimmt wurden. Über Lastkombinationen und Einsatzbereiche der Bauteile werden die zulässigen Spannungen noch mittels Erhöhungs- oder Abminderungsfaktoren modifiziert [63]. Die europäischen Bemessungsnormen im Bauwesen, die Eurocodes, und auch der Entwurf der nationalen Bemessungsnorm E DIN 1052 (zur Zeit im Gelbdruck) [64] basieren auf der Grundlage der Teilsicherheitsbeiwerte, welches nachfolgend kurz erläutert wird.

Die für eine Bemessung eines Bauteiles relevanten Parameter sind die Einwirkungen, die geometrischen Größen der Bauteile sowie die Bauteileigenschaften. Für diese stochastisch unabhängigen Parameter liegen üblicherweise statistische Verteilungsfunktionen vor, über die Mittelwerte und charakteristische Werte bestimmt werden können. Die charakteristischen Werte werden dabei als Fraktile der Verteilungen festgelegt. Für zeitlich veränderliche Einwirkungen werden üblicherweise obere Fraktile (S_{98}), für die Widerstandsseite untere Fraktile (R_{05}) verwendet. In Bild 7- 1 ist die idealisierte Wahrscheinlichkeitsdichte von Einwirkungen (S) und Bauteilwiderstand (R) dargestellt.

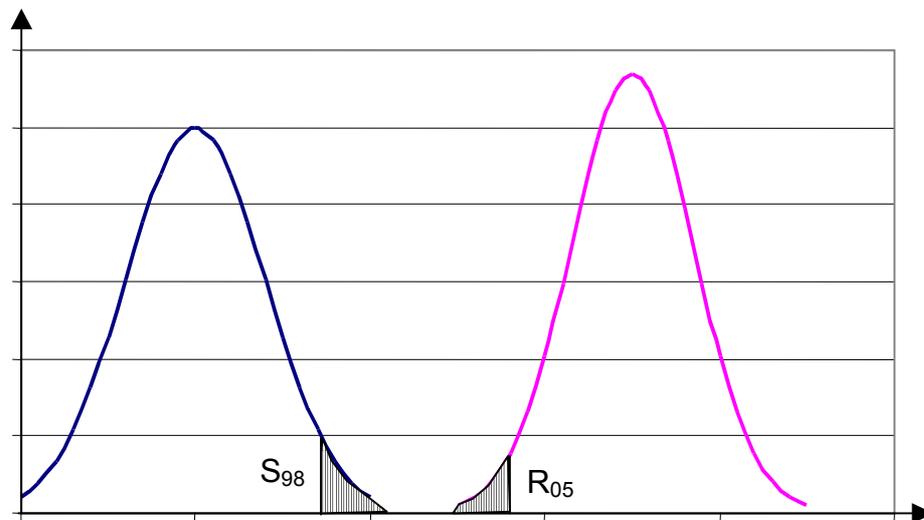


Bild 7- 1 Wahrscheinlichkeitsdichte der Einwirkung (S) und Bauteilwiderstand (R)

Eine niedrige Versagenswahrscheinlichkeit von Bauteilen wird bei dem Bemessungskonzept der Teilsicherheitsbeiwerte dadurch erreicht, dass die charakteristischen Einwirkungen mittels Teilsicherheitsbeiwerten erhöht und die Bauteilwiderstände mittels Teilsicherheitsbeiwerten abgemindert werden. Es werden Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit nachgewiesen. Es muss sichergestellt sein, dass der Bemessungswert der Einwirkung S_d (charakteristischer Wert multipliziert mit Teilsicherheitsbeiwerten) kleiner oder gleich dem Bemessungswert des Bauteilwiderstandes R_d (charakteristischer Wert dividiert durch Teilsicherheitsbeiwerte) ist:

$$S_d \leq R_d \quad (7- 1)$$

Da die vereinfachten Bemessungsgleichungen für Brettstapelelemente an das neue Bemessungskonzept der Teilsicherheitsbeiwerte angepasst sind, wurden die Simulationsergebnisse auf der Grundlage von Fraktil- und Mittelwerten ausgewertet. Die Gleichungen für Nachweise der Biegefestigkeit der Lamellen und der Nageltragfähigkeit wurden mit den 98%-Fraktilwerten der Simulationsergebnisse erarbeitet, da es sich hierbei um den Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit handelt. Die Gleichungen für den Nachweis der elastischen Verformung von Brettstapelelementen (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit) wurden über die Mittelwerte der Simulationsergebnisse bestimmt. Diese Annahme scheint gerechtfertigt, da beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ein geringeres Sicherheitsniveau angestrebt wird als beim

Nachweis der Tragfähigkeit. Die Teilsicherheitsbeiwerte auf der Einwirkungsseite werden beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit gleich 1,0 gesetzt, d.h. die charakteristischen Werte der Einwirkung werden nicht erhöht.

Für die Berechnung der elastischen Verformungen von Brettstapelelementen darf in Anlehnung an E DIN 1052 (Gelbdruck), Abschnitt 7.2 - Absatz 1, [64] ein mittlerer Elastizitätsmodul von $E_{\text{mean}} = 12600 \text{ N/mm}^2$ angesetzt werden. Der Betrag des mittleren Elastizitätsmoduls E_{mean} stellt den Mittelwert der mittleren Elastizitätsmoduln von 936 Lamellen dar, die im Rahmen der Prüfkörperherstellung für diese Arbeit untersucht wurden (vgl. Abschnitt 6.1.4). Die 936 untersuchten Lamellen werden als repräsentative Stichprobe zur Bestimmung des mittleren Elastizitätsmoduls zur Berechnung der Gebrauchstauglichkeit von Brettstapelelementen angesehen.

Alle 936 untersuchten Lamellen entsprachen nach visueller Sortierung mindestens der Sortierklasse S 10 nach DIN 4074 [21]. In DIN EN 338 [82] findet sich der Mittelwert des Elastizitätsmoduls $E_{\text{mean}} = 11000 \text{ N/mm}^2$ für Hölzer der Festigkeitsklasse C 24 (entspricht der Sortierklasse S 10 nach DIN 4074).

7.2 Bemessungsgleichungen

Bei den vereinfachten Bemessungsgleichungen wurde in Anlehnung an die derzeitige Bemessungspraxis von Verbindungen mit Dübeln besonderer Bauart [77] die Grundgleichung zur Berechnung der jeweiligen Beanspruchung gegeben. Die Einflussparameter auf die zu berechnende Größe werden über gestaffelte Werte von Faktoren (Tabellenwerte) oder über Gleichungen eingerechnet. So kann z.B. die Biegeandspannung der Lamellen infolge einer zentrischen Einzellast über Gleichung (7- 2) berechnet werden.

$$\sigma_B = \frac{M}{W_{2\text{Lam}} \cdot \kappa} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (7- 2)$$

Hierin bedeuten:

M	Biegemoment nach der technischen Biegelehre
$W_{2\text{Lam}}$	Widerstandsmoment eines Rechteckquerschnittes mit der Breite von zwei Lamellen nach der technischen Biegelehre
κ	Faktor zur Berücksichtigung der Einflussparameter [/]

Der Faktor κ zur Berücksichtigung der Einflussparameter auf die Biegerandspannung der Lamellen berechnet sich durch Multiplikation von Einzelfaktoren κ_i , deren Beträge sich in Tabellen finden. Es werden Einzelfaktoren zur Berücksichtigung des l/h -Verhältnisses, der Nagelabstände a_1 oder der Stoßvariante der Lamellen angegeben.

Die Beträge der Faktoren κ wurden in Abhängigkeit der Einflussparameter bestimmt [78]. Hierdurch ergab sich eine Abhängigkeit der Faktoren κ von den Werten der Einflussparameter. Diese Abhängigkeit wurde entweder durch schrittweise veränderliche Geraden (Treppenform -> Tabellenwerte) oder durch eine Gleichung angenähert.

Bei den vereinfachten Bemessungsgleichungen für Brettstapelelemente werden gestoßene Lamellen innerhalb eines Brettstapelelementes nur pauschal berücksichtigt. Dies bedeutet, dass bei der vereinfachten Bemessung nur die Herstellungsart "ungestoßene Lamellen" oder "gestoßene Lamellen" berücksichtigt wird. Das Stoßmuster der Lamellen hat auf die Ergebnisse der vereinfachten Bemessung keinen Einfluss. Durch diese Vorgehensweise wird das Trag- und Verformungspotential der Brettstapelelemente in einigen Bereichen nicht ausgenutzt. Der wesentliche Vorteil bei der pauschalen Berücksichtigung der Stoßmuster der Lamellen im Brettstapelelement liegt darin, dass Tragwerksplaner den Herstellern von Brettstapelelementen lediglich die Stoßvariante „gestoßen“ bzw. „ungestoßen“ vorgeben müssen. Hierdurch wird die Fehlerwahrscheinlichkeit bei der Herstellung von Brettstapelelementen und die Herstellungskosten solcher Elemente reduziert.

Für die Anwendung der vereinfachten Gleichungen gelten die im Abschnitt 3.4.2.1 ff dargestellten Randbedingungen über Lage und Anordnung der Lamellenstöße im Brettstapelelement.

7.3 Vereinfachte Bemessungsgleichungen für Brettstapelelemente unter zentrischer Einzellast

Für die vereinfachten Gleichungen zur Berechnung der Biegerandspannungen der Lamellen und der elastischen Verformung der Brettstapelelemente wurde das Widerstandsmoment W und das Flächenmoment 2. Grades I über die Breite von zwei Lamellen (vgl. Abschnitt 4.4.1.1) berechnet.

7.3.1 Biegerandspannung

Die maximalen Biegerandspannungen von Lamellen in Brettstapelelementen unter zentrischer Einzellast können über Gleichung (7- 3) berechnet werden.

$$\sigma_B = \frac{M}{W_{2Lam} \cdot K_{WF}} \quad [N/mm^2] \quad (7- 3)$$

Hierin bedeuten:

M	Biegemoment nach der technischen Biegelehre [Nmm]
W_{2Lam}	Widerstandsmoment eines Rechteckquerschnittes mit der Breite von zwei Lamellen nach der technischen Biegelehre [mm ³]
K_{WF}	Faktor zur Berechnung der Biegerandspannung der Lamellen infolge zentrischer Einzellasten [/]

Der Faktor zur Berechnung der Biegerandspannung der Lamellen unter Berücksichtigung der Einflussparameter kann mit Gleichung (7- 4) berechnet werden:

$$K_{WF} = K_{WF,R} \cdot K_{WF,a_1} \cdot K_{WF,S} \quad [/] \quad (7- 4)$$

Hierin bedeuten:

$K_{WF,R}$	Faktor zur Berücksichtigung des ℓ/h - Verhältnisses [/]
K_{WF,a_1}	Faktor zur Berücksichtigung der Nagelabstände a_1 [/]
$K_{WF,S}$	Faktor zur Berücksichtigung der Stoßvarianten [/]

Die Werte des Faktors $K_{WF,R}$ zur Berücksichtigung des ℓ/h - Verhältnisses werden über Gleichung (7- 5) berechnet.

$$K_{WF,R} = 0,17 \cdot \left(\frac{\ell}{h} \right) \quad [/] \quad (7- 5)$$

Gleichung (7- 5) gilt für einen Wertebereich des ℓ/h -Verhältnisses von

$$15 \leq \ell/h \leq 35 .$$

Der Faktor κ_{WF,a_1} zur Berücksichtigung der Nagelabstände a_1 ergibt sich zu:

$$\kappa_{WF,a_1} = \begin{cases} 1,0 & \text{für } a_1 = 75 \text{ mm} \\ 0,8 & \text{für } a_1 = 150 \text{ mm} \\ 0,7 & \text{für } a_1 = 225 \text{ mm} \end{cases}$$

Der Faktor $\kappa_{WF,S}$ zur Berücksichtigung der Stoßvarianten ergibt sich zu:

$$\kappa_{WF,S} = \begin{cases} 1,00 & \text{für ungestoßene Lamellen} \\ 0,73 & \text{für gestoßene Lamellen} \end{cases}$$

In Bild 7- 2 ist exemplarisch für Brettstapelelemente mit ungestoßenen Lamellen und unter zentrischer Einzellast das Verhältnis der Ergebnisse der Biegerandspannungen der Lamellen aus den Gleichungen aus Abschnitt 5.1.1 zu den korrespondierenden Ergebnissen der vereinfachten Bemessungsgleichung dargestellt. Hierfür wurden als weitere Parameter eine Lamellendicke $t_{Lam} = 30 \text{ mm}$ und eine Stützweite $\ell = 3,60 \text{ m}$ gewählt.

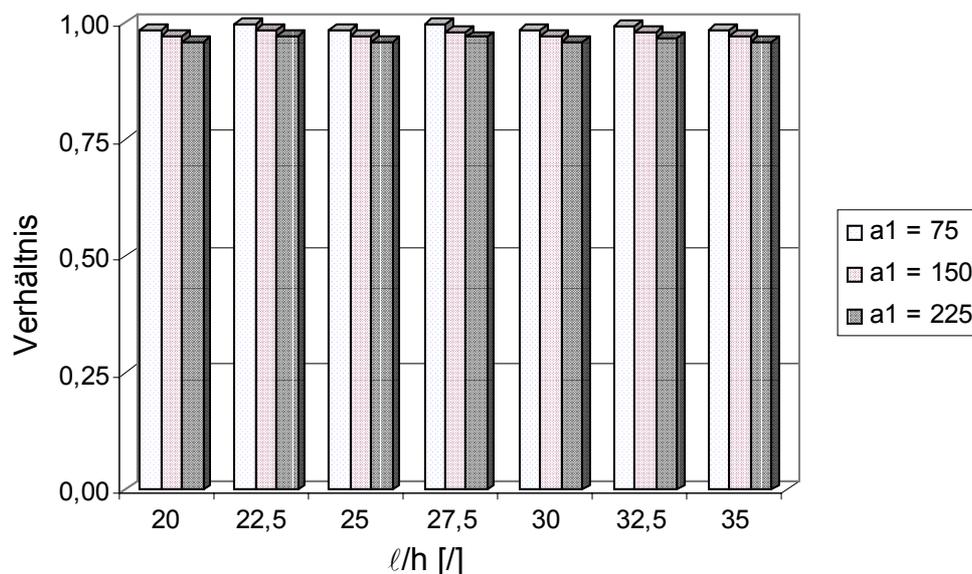


Bild 7- 2 Verhältnis der Biegerandspannungen aus den Gleichungen aus Abschnitt 5.1.1 zu den Ergebnissen aus der vereinfachten Bemessung für Brettstapelelemente mit ungestoßenen Lamellen

7.3.2 Elastische Verformung

Die elastische Verformung v von Brettstapelelementen unter zentrischer Einzellast kann über Gleichung (7- 6) berechnet werden.

$$v = \frac{V_{2Lam}}{\kappa_{IF}} \text{ [mm]} \quad (7- 6)$$

Hierin bedeuten:

V_{2Lam}	elastische Verformung eines Trägers mit Rechteckquerschnitt mit der Breite von zwei Lamellen nach der technischen Biegelehre
κ_{IF}	Faktor zur Berechnung der elastischen Verformung von Brettstapelelementen (zentrische Einzellasten)

Der Faktor zur Berechnung der elastischen Verformung unter Berücksichtigung der Einflussparameter kann mit Gleichung (7- 7) berechnet werden:

$$\kappa_{IF} = \kappa_{IF,R} \cdot \kappa_{IF,a_1} \cdot \kappa_{IF,S} \quad [/] \quad (7- 7)$$

Hierin bedeuten:

$\kappa_{IF,R}$	Faktor zur Berücksichtigung des ℓ/h -Verhältnisses [/]
κ_{IF,a_1}	Faktor zur Berücksichtigung der Nagelabstände a_1 [/]
$\kappa_{IF,S}$	Faktor zur Berücksichtigung der Stoßvarianten. [/]

Die Werte des Faktors $\kappa_{IF,R}$ zur Berücksichtigung des ℓ/h - Verhältnisses werden über Gleichung (7- 8) berechnet.

$$\kappa_{IF,R} = 0,36 \cdot \left(\frac{\ell}{h} \right) \text{ [/]} \quad (7- 8)$$

Gleichung (7- 8) gilt für einen Wertebereich des ℓ/h -Verhältnisses von

$$15 \leq \ell/h \leq 35 .$$

Der Faktor κ_{IF, a_1} zur Berücksichtigung der Nagelabstände a_1 ergibt sich zu:

$$\kappa_{IF, a_1} = \begin{cases} 1,0 & \text{für } a_1 = 75 \text{ mm} \\ 0,75 & \text{für } a_1 = 150 \text{ mm} \\ 0,64 & \text{für } a_1 = 225 \text{ mm} \end{cases}$$

Der Faktor $\kappa_{IF, S}$ zur Berücksichtigung der Stoßvarianten ergibt sich zu:

$$\kappa_{IF, S} = \begin{cases} 1,00 & \text{für ungestoßene Lamellen} \\ 0,71 & \text{für gestoßene Lamellen} \end{cases}$$

In Bild 7- 3 ist analog zu Bild 7- 2 das Verhältnis der Ergebnisse der elastischen Verformungen der Elemente aus den Gleichungen aus Abschnitt 5.1.2 den korrespondierenden Ergebnissen der vereinfachten Bemessung dargestellt. Es gelten die gleichen Voraussetzungen wie in Abschnitt 7.3.1.

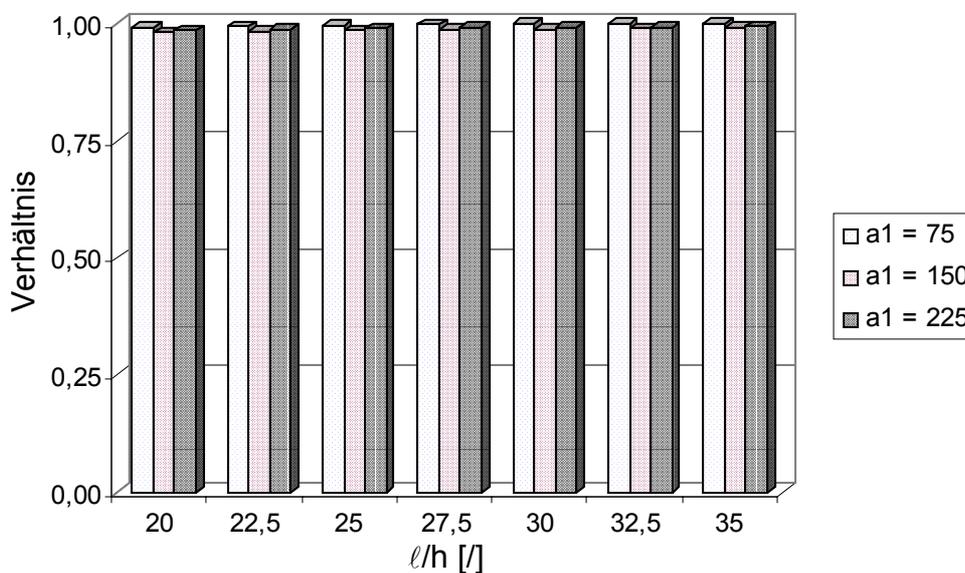


Bild 7- 3 Verhältnis der Beträge der Verformungen aus den Gleichungen aus Abschnitt 5.1.2 zu den Ergebnissen aus der vereinfachten Bemessung für Brettstapelelemente mit ungestoßenen Lamellen

7.3.3 Nagelbeanspruchung

Die maximale Beanspruchung eines Nagels auf Abscheren in einem Brettstapelelement unter zentrischer Einzellast kann über Gleichung (7- 9) berechnet werden.

$$F_{Na} = F \cdot \kappa_{NF} \quad [\text{N}] \quad (7- 9)$$

mit

F zentrische Einzellast [N]

κ_{NF} Faktor zur Berechnung der maximalen Beanspruchung eines Nagels

Der Faktor zur Berechnung der maximalen Beanspruchung eines Nagels auf Abscheren unter Berücksichtigung der Einflussparameter kann mit Gleichung (7- 10) berechnet werden:

$$\kappa_{NF} = \kappa_{NF,R} \cdot \kappa_{NF,a_1} \cdot \kappa_{NF,S} \quad [/] \quad (7- 10)$$

Hierin bedeuten:

$\kappa_{NF,R}$ Faktor zur Berücksichtigung des ℓ/h -Verhältnisses [/]

κ_{NF,a_1} Faktor zur Berücksichtigung der Nagelabstände a_1 [/]

$\kappa_{NF,S}$ Faktor zur Berücksichtigung der Stoßvarianten [/]

Die Werte des Faktors $\kappa_{NF,R}$ zur Berücksichtigung des ℓ/h - Verhältnisses werden über Gleichung (7- 11) berechnet.

$$\kappa_{NF,R} = \frac{\left(\frac{\ell}{h}\right)^{0,7}}{300} \quad [/] \quad (7- 11)$$

Gleichung (7- 11) gilt für einen Wertebereich des ℓ/h -Verhältnisses von

$$15 \leq \ell/h \leq 35 .$$

Der Faktor κ_{NF,a_1} zur Berücksichtigung der Nagelabstände a_1 ergibt sich zu:

$$\kappa_{NF,a_1} = \begin{cases} 1,0 & \text{für } a_1 = 75 \text{ mm} \\ 1,75 & \text{für } a_1 = 150 \text{ mm} \\ 2,50 & \text{für } a_1 = 225 \text{ mm} \end{cases}$$

Der Faktor $\kappa_{N,S}$ zur Berücksichtigung der Stoßvarianten ergibt sich zu:

$$\kappa_{N,S} = \begin{cases} 1,0 & \text{für ungestoßene Lamellen} \\ 2,0 & \text{für gestoßene Lamellen} \end{cases}$$

In Bild 7- 4 ist analog zu Bild 7- 2 und Bild 7- 3 das Verhältnis der Ergebnisse der Nagelbeanspruchungen auf Abscheren berechnet mit den Gleichungen aus Abschnitt 5.1.3 den korrespondierenden Ergebnissen der vereinfachten Bemessung dargestellt. Es gelten die gleichen Voraussetzungen wie in Abschnitt 7.3.1.

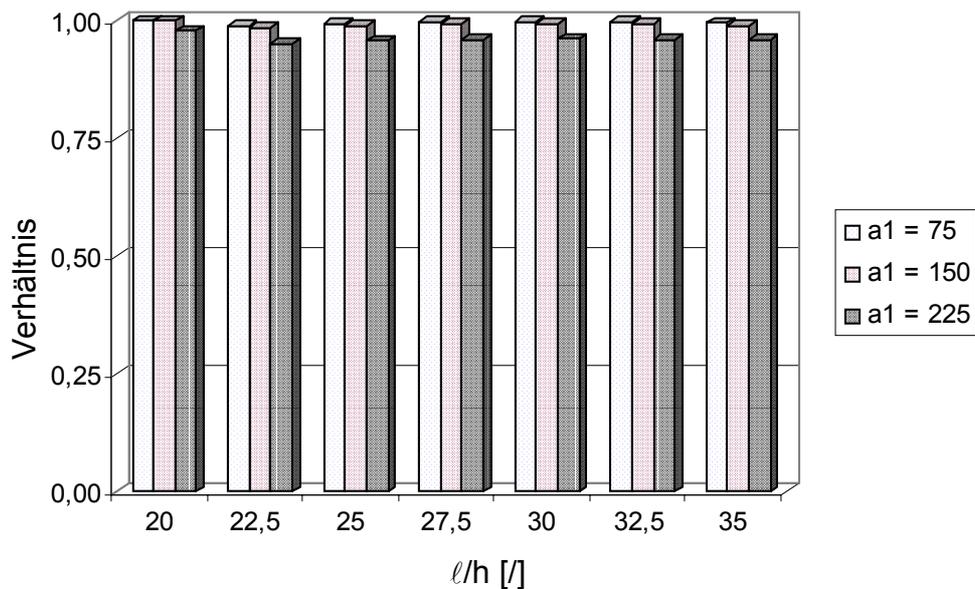


Bild 7- 4 Verhältnis Nagelbeanspruchungen aus den Gleichungen aus Abschnitt 5.1.3 zu den Ergebnissen aus der vereinfachten Bemessung für Brettstapelelemente mit ungestoßenen Lamellen

7.4 Vereinfachte Bemessungsgleichungen für Brettstapelelemente unter gleichförmiger Flächenlast

Bei der Herleitung der vereinfachten Bemessungsgleichungen für Brettstapelelemente unter gleichförmiger Flächenlast wurde für die Berechnung der Widerstandsmomente W und der Flächenmomente 2. Grades I ein Querschnitt eines Brettstapelelementes mit einer Breite $b = 1,0$ m angesetzt. Diese Querschnittswerte werden analog zum vorherigen Abschnitt mit Faktoren multipliziert, mit deren Hilfe die Einflussparameter auf die zu berechnenden Beanspruchungen berücksichtigt werden.

Für die Gültigkeit der vereinfachten Gleichungen zur Berechnung der Biegegrandspannungen von Lamellen, der elastischen Verformungen der Elemente und der Beanspruchungen der Nägel von Brettstapelelementen unter gleichförmigen Flächenlasten liegen die in Abschnitt 5.2 dargestellten Voraussetzungen zugrunde.

7.4.1 Biegegrandspannung

Die Biegegrandspannungen von Lamellen in Brettstapelelementen unter gleichförmiger Flächenlast können über Gleichung (7- 12) berechnet werden.

$$\sigma_B = \frac{M}{W_{1m} \cdot \kappa_{Wq}} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (7- 12)$$

Hierin bedeuten:

M	Biegemoment nach der technischen Biegelehre [Nmm]
W_{1m}	Widerstandsmoment eines Rechteckquerschnittes nach der technischen Biegelehre, bezogen auf 1,0 m Breite [mm^3]
κ_{Wq}	Faktor zur Berechnung der Biegegrandspannung der Lamellen (Flächenlast)

Der Faktor zur Berechnung der Biegeendspannung der Lamellen unter Berücksichtigung der Einflussparameter ergibt sich zu:

$$\kappa_{Wq} = \begin{cases} 1,0 & \text{für ungestoßene Lamellen} \\ 0,35 & \text{für gestoßene Lamellen} \end{cases}$$

7.4.2 Elastische Verformung

Die elastischen Verformungen von Brettstapelelementen unter gleichförmiger Flächenlast können vereinfacht über Gleichung (7- 13) berechnet werden.

$$v = \frac{V_{1m}}{\kappa_{Iq}} \text{ [mm]} \quad (7- 13)$$

Hierin bedeuten:

- v_{1m} elastische Verformung eines Trägers mit Rechteckquerschnitt mit der Breite von $b = 1,0$ m nach der technischen Biegelehre
- κ_{Iq} Faktor zur Berechnung der elastischen Verformung der Elemente (Flächenlast) [/]

Der Faktor zur Berechnung der elastischen Verformung von Brettstapelelementen unter Berücksichtigung der Einflussparameter ergibt sich zu

$$\kappa_{Iq} = 1,0 \text{ für ungestoßene Lamellen}$$

bzw. für Brettstapelelemente mit gestoßenen Lamellen zu

$$\kappa_{Iq} = \begin{cases} 0,62 & \text{für } a_1 = 75 \text{ mm} \\ 0,56 & \text{für } a_1 = 150 \text{ mm} \\ 0,5 & \text{für } a_1 = 225 \text{ mm.} \end{cases}$$

7.4.3 Nagelbeanspruchung

Die maximale Beanspruchung eines Nagels auf Abscheren in einem Brettstapelelement mit gestoßenen Lamellen unter gleichförmiger Flächenlast kann vereinfacht über Gleichung (7- 14) berechnet werden.

$$F_{Na} = q \cdot d_N^{1,5} \cdot \kappa_{Nq} \text{ [N]} \quad (7- 14)$$

Hierin bedeuten:

q	gleichförmige Streckenlast, bezogen auf 1,0 m [kN/m]
d _N	Durchmesser der Nägel [mm]
κ _{Nq}	Faktor zur Berechnung der maximalen Beanspruchung eines Nagels (Flächenlast) [/]

Der Faktor zur Berechnung der Beanspruchung der Nägel in Brettstapelelementen unter Berücksichtigung der Nagelabstände ergibt sich zu:

$$\kappa_{Nq} = \begin{cases} 10 & \text{für } a_1 = 75 \text{ mm} \\ 16 & \text{für } a_1 = 150 \text{ mm} \\ 21 & \text{für } a_1 = 225 \text{ mm.} \end{cases}$$

8 Zusammenfassung

Brettstapelelemente bestehen aus hochkant nebeneinander gestellten, fortlaufend miteinander vernagelten Massivholzbrettern (Lamellen) und werden vorwiegend als Decken- und Wandelemente eingesetzt. Weiterhin werden Brettstapelelemente für Holz-Beton-Verbundkonstruktionen, als Dachelemente und als Träger für Treppenkonstruktionen verwendet. Durch die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten hat sich die Brettstapelbauweise im Bereich des Holzhausbaus und der Altbausanierung etabliert. Die Lamellen können im Brettstapelelement gestoßen werden, da die Länge der Lamellen üblicherweise nicht mit der Länge der Brettstapelelemente übereinstimmt. Abhängig von der Länge der Lamellen werden die Stumpfstoße im Brettstapelelement regelmäßig oder zufällig verteilt angeordnet. Durch dieses Herstellungsprinzip können beliebig lange und beliebig breite, flächige Bauteile hergestellt werden, die diskontinuierliche Steifigkeitseigenschaften sowohl in Spannrichtung der Elemente als auch quer zur Spannrichtung aufweisen. Werden Brettstapelelemente als plattenförmige Bauteile verwendet und durch eine Einzellast beansprucht, beteiligen sich mehrere Lamellen an der Abtragung der Einzellast. Der Grad der Lastverteilung von Einzellasten hängt von der Art und Anordnung der Verbindungsmittel, den geometrischen Größen des Brettstapelelemente, den Steifigkeitseigenschaften der Lamellen und der Stoßanordnung ab. Ziel dieser Arbeit war es, Gleichungen zur Bestimmung der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit von Brettstapelelementen unter Plattenbeanspruchung zu bestimmen. Die Verformungen von Brettstapelelementen und die Beanspruchungen der Lamellen und der Nägel hängen u.a. von der Geometrie des Brettstapelelementes, der Anordnung der Lamellenstoße, der Art und Anordnung der Nägel und den Materialeigenschaften der Lamellen ab. Infolge der Vielzahl der Einflussparameter auf das Trag- und Verformungsverhalten von Brettstapelelementen ist eine analytische Vorgehensweise zur Bestimmung der Beanspruchungen und der Verformungen von Brettstapelelementen kaum möglich. Aus diesem Grund wurden die Näherungsgleichungen zur Berechnung der Verformungen von Brettstapelelementen, den Biegegrandspannungen der Lamellen und der Beanspruchung der Nägel auf Abscheren durch Simulationen bestimmt.

Die Simulationen wurden mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode unter Berücksichtigung der streuenden Steifigkeitseigenschaften der Lamellen und des streuenden nichtlinearen Last-Verschiebungs-Verhaltens von genagelten Holz-Holz-Verbindungen durchgeführt.

Eine wesentliche Grundlage der Simulationen der Brettstapelelemente war die realistische Simulation der Materialeigenschaften der Lamellen. Die realistische Streu-

ung der Materialeigenschaften der Lamellen wurde sowohl innerhalb der Lamellen als auch der Lamellen untereinander berücksichtigt. Die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften der Lamellen wurden auf der Grundlage von Untersuchungen von Lamellen für Brettschichtholzträger simuliert. Hierzu wurden die Lamellen mit einer Länge von $\ell = 4,5$ m in 30 Segmente unterteilt und den Segmenten wurden über Regressionsgleichungen autokorrelierte Materialeigenschaften zugewiesen. Jedem dieser 30 Lamellensegmente wurden autokorrelierte Beträge der Ästigkeit (Knot-Area-Ratio) und des Elastizitätsmoduls parallel zur Faserrichtung zugewiesen. Die Rohdichte der Lamellen wurde als gleichförmig über die Lamelle verteilt angenommen. Vergleiche der Beträge der mittleren simulierten Materialeigenschaften der Lamellen mit gemessenen Beträgen von Materialeigenschaften von Lamellen zeigten, dass die Simulationen realitätsnahe Ergebnisse der mittleren Materialeigenschaften liefern. Für die Herstellung von Brettstapelelementen sollten Lamellen verwendet werden, die mindestens der Sortierklasse S 10 nach DIN 4074 entsprechen.

Neben der realistischen Simulation der Beträge der Steifigkeitseigenschaften der Lamellen wurde das realistische Trag- und Verformungsverhalten von genagelten zweischnittigen Holz-Holz-Verbindungen in die Simulationen implementiert. Die Beträge der Parameter zur Beschreibung einer Last-Verschiebungs-Kurve einer zweischnittigen genagelten Holz-Holzverbindung und deren statistische Verteilungen wurden durch Versuche ermittelt. Die Lamellen der Prüfkörper für die Versuche wurden mit unterschiedlichen Nagelgrößen kraftschlüssig verbunden. Weiterhin wurde nach der Beanspruchungsrichtung der Lamellen durch den Nagel (parallel oder rechtwinklig zur Faser) unterschieden. Die Nagelverbindungen, die parallel zur Faserrichtung beansprucht waren, zeigten signifikant höhere Anfangssteifigkeitseigenschaften als die rechtwinklig zur Faser beanspruchten Nagelverbindungen. Die realistisch streuenden Beträge der Parameter zur Beschreibung einer Last-Verschiebungs-Kurve wurden auf der Grundlage der Versuchsergebnisse generiert. Hierfür wurde ein Verfahren verwendet, welches auf der Transformation der multivariaten Normalverteilung beruht. Dieses Verfahren bietet den Vorteil, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der jeweiligen Parameter beibehalten werden und dass die Korrelationsstruktur der einzelnen Parameter untereinander sehr gut approximiert wird. Mit den virtuell generierten Beträgen der Parameter zur Beschreibung einer Last-Verschiebungs-Kurve einer zweischnittigen Holz-Holz-Nagelverbindung konnten unter Verwendung einer dreiparametrischen Exponentialfunktion beliebige Last-Verschiebungs-Kurven generiert werden. Um die generierten Last-Verschiebungs-Kurven einfach in das Finite-Elemente-Modell einbauen zu können, wurden die Kurven über Polygonzüge angenähert. Für jede Simulation wurden 1800

autokorrelierte Last-Verschiebungs-Kurven generiert und durch Polygonzüge angenähert.

Bei den Simulationen wurden die Geometrie der Brettstapelelemente (Breite/Höhe), die Nagelabstände, die Nageldurchmesser, die Stoßanordnungen (ungestoßene, wechselseitig, wandernd und zufällig gestoßene Lamellen) sowie die Belastung durch eine zentrische Einzellast und durch eine gleichförmige Flächenlast variiert. Die Beträge der Simulationsparameter, wie z.B. die Nagelabstände oder die Lamellenhöhen bezogen auf die Stützweite der Brettstapelelemente, wurden nach praktischen Erfordernissen gewählt, da aus den Simulationsergebnissen Näherungsgleichungen zur Berechnung der Beanspruchungen und Verformungen von Brettstapelelementen abgeleitet werden sollten. Verstärkungsmaßnahmen im Stoßbereich der Lamellen wurden nicht als Simulationsparameter aufgenommen, da durch den Vergleich der Beträge der wirksamen Biegesteifigkeiten von Lamellensträngen mit und ohne verstärkter Stoßnagelung mit den Beträgen der Biegesteifigkeit ungestoßener Lamellen gezeigt wurde, dass mit einer verstärkten Stoßnagelung die wirksame Biegesteifigkeit von Brettstapelelementen in Spannrichtung nicht wesentlich erhöht werden kann. Der unwesentliche Einfluss verstärkter Stoßnagelungen auf die wirksame Biegesteifigkeit von Brettstapelelementen wurde durch Versuche bestätigt. Andere Verstärkungsmaßnahmen der Lamellenstöße waren nicht praxisrelevant und wurden deswegen verworfen.

Aus den Simulationsergebnissen wurden Näherungsgleichungen zur Berechnung der Biegerandspannungen der Lamellen, der elastischen Verformung der Brettstapelelemente und der Beanspruchung der Nägel auf Abscheren abgeleitet. Die Näherungsgleichungen wurden auf der Grundlage des Sicherheitskonzeptes der Teilsicherheitsbeiwerte bestimmt. Beim Nachweis der Tragfähigkeit werden nach dem Sicherheitskonzept der Teilsicherheitsbeiwerte 98%-Fraktilwerte der Einwirkung verwendet, beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit werden Mittelwerte der Einwirkung verwendet. Folglich wurden die Simulationsergebnisse der Biegerandspannungen der Lamellen und die Nagelbeanspruchungen auf Abscheren nach den 98%-Fraktilwerten und die Verformungen der Brettstapelelemente nach den Mittelwerten hin ausgewertet. Weiterhin wurden für Brettstapelelemente unter zentrischen Einzelasten und gestoßenen Lamellen Gleichungen zur Berechnung von Proportionalitätslasten bestimmt. Nach Überschreiten der Proportionalitätslast stellen sich nichtlineare Effekte im Brettstapelelement ein, so dass die Näherungsgleichungen keine Gültigkeit mehr besitzen. Die Biegerandspannungen der Lamellen und die elastische Verformung der Brettstapelelemente sollen mit Hilfe der Gleichungen der technischen Biegelehre berechnet werden können. Die o.g. Berechnungsgrößen werden

auf der Grundlage der Gleichungen der technischen Biegelehre mit wirksamen Querschnittswerten, die auf der Grundlage der Simulationsergebnisse unter Berücksichtigung der Einflussparameter abgeleitet wurden, berechnet. Die Näherungsgleichungen zur Berechnung der Nagelbeanspruchungen und zur Berechnung der Proportionalitätslasten wurden mittels Regressionsgleichungen über die Simulationsergebnisse hergeleitet.

Um die Simulationen und die daraus abgeleiteten Gleichungen zu bestätigen, wurden 43 Prüfkörper entworfen und geprüft. Hierfür wurden von insgesamt 936 Lamellen die mittleren Elastizitätsmoduln, die mittleren Rohdichten sowie die maximalen Ästigkeiten bestimmt. Bei der Herstellung der Prüfkörper wurde die Lage jeder Lamellen notiert, so dass die Prüfkörper realistisch simuliert werden konnten. Jeder der 43 Versuche wurde im Vorfeld simuliert, um eine Aussage über die Qualität der Simulationsergebnisse treffen zu können. Die Versuchsergebnisse und die Simulationsergebnisse zeigten eine gute Übereinstimmung.

Beim Entwurf der Prüfkörper wurden die Einflussparameter auf die Beanspruchungen der Brettstapelelemente mitberücksichtigt. Es wurden 24 Prüfkörper hergestellt, die unter einer angenäherten gleichförmigen Flächenlast geprüft wurden. Alle 24 Prüfkörper wiesen gestoßene Lamellen auf, da Brettstapelelemente unter einer gleichförmigen Flächenlast und mit ungestoßenen Lamellen nach der technischen Biegelehre berechnet werden können. Von den 19 Prüfkörpern unter zentrischen Einzellasten wiesen 6 Prüfkörper ungestoßene Lamellen auf, um die Lastausbreitung im Brettstapelelement untersuchen zu können. Unabhängig von der Beanspruchungsart der Prüfkörper wurden die Stoßvarianten der Lamellen, die Nageldurchmesser und die Nagelabstände und die Geometrie der Elemente entsprechend der Simulationsparameter variiert.

Die aus den Simulationsergebnissen abgeleiteten Näherungsgleichungen zur Berechnung der Biegegrandspannungen der Lamellen, der Beanspruchungen der Nägel auf Abscheren und der Verformungen der Brettstapelelemente wurden zu praxisgerechten, vereinfachten Bemessungsgleichungen zusammengefasst. Nach den vereinfachten Bemessungsgleichungen werden die Beanspruchungen der Lamellen oder die Verformungen der Elemente nach der technischen Biegelehre berechnet. Die Einflussparameter auf die zu berechnende Größe werden über gestaffelte Werte von Faktoren (Tabellenwerte) oder über Gleichungen eingerechnet. Die Berechnung der Beanspruchungen der Nägel erfolgt über empirische Gleichungen.

9 Literatur

- [1] Schlichtherle, H., 1997: Pfahlbauten rund um die Alpen. - Sonderheft der Zeitschrift „Archäologie in Deutschland“, Konrad Theiss Verlag GmbH: Stuttgart
- [2] Jung, P., 1998: Die Brettstapelbauweise – Standortbetrachtung zu einer wiederentdeckten Holzbauweise. Fachtagung für Ingenieure, Fachverlag Holz: Düsseldorf
- [3] Kress, F., 1959: Der Zimmerpolier. 11. Auflage, Otto Maier Verlag: Ravensburg
- [4] Ruske, W., 1996: Die Brettstapelbauweise. – Bauhandwerk Ausgabe 6, Bertelsmann Fachzeitschriften GmbH: Gütersloh
- [5] Referenzliste der Fa. Bois Consult Natterer S.A., Etoy-Village, Schweiz, Mai 1996
- [6] Holzzentralblatt, 1996, Nummer 128, DRW- Verlag: Leinfelden Echterdingen
- [7] Schweizer Holzbau, 1998, Ausgabe 7, AG Verlag Hoch- und Tiefbau: Zürich
- [8] Holzzentralblatt, 2000, Nummer 128, DRW- Verlag: Leinfelden Echterdingen
- [9] Bauen mit Holz, Heft 3/2001, Bruderverlag, Albert Bruder GmbH & Co. KG: Karlsruhe
- [10] Natterer, J., 1997: Feuchtigkeitsverhalten von Decken- und Wandelementen in Brettstapelementen, Forschungsbericht IEZ
- [11] Haller, P., 1998: Structural and physical behaviour of nailed laminated timber. World Timber Engineering Conference: Lausanne
- [12] Natterer, J., 1999: Brettstapelbauweise: Teil 2: Tragverhalten von Konstruktionselementen in Brettstapelbauweise. Forschungsbericht 2-1999, Internationales Entwicklungszentrum für Holzkonstruktionen und Ingenieurbüro: Saulburg

-
- [13] Blaß, H.J., Krämer, V., 2001: Lastverteilung, Tragwirkung und Verformungsverhalten für nachgiebig miteinander verbundene Brettstapelelemente. Forschungsbericht, Universität Karlsruhe (TH)
- [14] Blaß, H.J. et al., 1995: Trag- und Verformungsverhalten von Holz- Beton- Verbundkonstruktionen. Forschungsbericht, Universität Karlsruhe (TH)
- [15] Braun, H.J. et al., 1998: Der Brettstapel als Verbundelement – Vorschlag für einen Berechnungsansatz. - Bautechnik 75, Heft 8, Verlag Ernst & Sohn: Berlin
- [16] Informationsdienst Holz, 1994: Holz - ein Rohstoff der Zukunft. - Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V.: München
- [17] Waldgesetz für Baden- Württemberg (Landeswaldgesetz – LwaldG), 8. Juni 1995
- [18] Hoadley, B. R., 1990: Holz als Werkstoff. Ravensburger Buchverlag Otto Maier GmbH: Ravensburg
- [19] Blaß, et al., 1995: STEP 1: Holzbauwerke, Bemessung und Baustoffe. - Informationsdienst Holz, Arbeitsgemeinschaft Holz e.V.: Düsseldorf
- [20] DIN 52182: Prüfung von Holz; Bestimmung der Rohdichte. Ausgabe September 1976
- [21] DIN 4074-1: Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit – Nadelschnittholz. Ausgabe September 1989
- [22] Aßfalg, W. et al., 1997: hiwo-massiv, Handbuch für Architekten, Ingenieure, Holzbaubetriebe. - hiwo, Holzindustrie Waldburg GmbH & Co. KG, Grimmenstein 10, 88364 Wolfegg
- [23] DIN 68252-1: Begriffe für Schnittholz; Form und Maße. Ausgabe Januar 1978
- [24] Skript Waldmessenlehre.; Universität Freiburg, Abteilung für forstliche Biometrie; Sommersemester 2001
- [25] Niemz, P., 1993: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. RW- Verlag

- [26] DIN 68256: Gütemerkmale von Schnittholz; Begriffe. Ausgabe April 1976
- [27] Braun, et al., 1994: Hochkant Breitgestapelt. - Bauen mit Holz Heft 1, Bruderverlag, Albert Bruder GmbH & Co. KG: Karlsruhe
- [28] Gerold, et al., 1997: Brettstapel als Konstruktionselement. - Bauen mit Holz Heft 1, Bruderverlag, Albert Bruder GmbH & Co. KG: Karlsruhe
- [29] Informationsdienst Holz, 1998: Brettstapelbauweise. - Holzbauhandbuch, Reihe 1, Teil 17, Folge 1; Arbeitsgemeinschaft Holz e.V.: Düsseldorf
- [30] DIN 1052-1: Holzbauwerke- Berechnung und Ausführung. Ausgabe April 1988
- [31] Becker, K., et al., 1998: Brettstapelbauweise - Konstruktionsübersichten, Bemessung, Bauphysik, Details. - VBZ- Verlagsgemeinschaft: Neu-Isenburg
- [32] Haller, P., 1999: Beiträge zur Statik und Bauphysik von Brettstapeldecken und Brettstapelwänden. - Institut für Baukonstruktionen und Holzbau, TU Dresden; Fachtagung am 16.04.1999
- [33] Groß, Hauger, Schnell, 1995: Technische Mechanik 1- Statik. 5. Auflage, Springer Verlag
- [34] Groß, Hauger, Schnell, 1995: Technische Mechanik 2- Elastostatik. 5. Auflage, Springer Verlag
- [35] Wolf, Schäfer, 1999: The bending stiffness of nail-laminated timber elements in transverse direction. - CIB- W18/32-12-1; Meeting 32, Graz Austria, August 1999
- [36] DIN 1143: Maschinenstifte- rund, lose. Ausgabe August 1982
- [37] Görlacher, R.; Klassifizierung von Brettschichtholzlamellen durch Messung von Longitudinalschwingungen; Dissertation; Karlsruhe, Universität (TH); 1990
- [38] Colling, F., 1990: Tragfähigkeit von Biegeträgern aus Brettschichtholz in Abhängigkeit von den festigkeitsrelevanten Einflussgrößen. Dissertation, Universität (TH) Karlsruhe

-
- [39] Ehlbeck, J. et al., 1985: Einfluss keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern. - Holz als Roh- und Werkstoff 43, Springer Verlag
- [40] United Nations, Economic Commission for Europe, 1982: ECE recommended standard for stress grading of coniferous sawn timber. - Timber Bull. for Europe, Vol XXXIV, Suppl. 16: 1 – 17, Genf, Schweiz
- [41] Colling, F und Dinort, R., 1987: Die Ästigkeit des in Leimbaubetrieben verwendeten Schnittholzes. - Holz als Roh- und Werkstoff 45, Springer Verlag
- [42] Colling, F und Görlacher, R., 1989: Eigenschaften des in Leimbaubetrieben verarbeiteten Schnittholzes. - Bauen mit Holz Heft 5, Bruderverlag, Albert Bruder GmbH & Co. KG: Karlsruhe
- [43] Glos, P., 1978: Zur Bestimmung des Festigkeitsverhaltens von Brettschichtholz bei Druckbeanspruchung. - Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke Heft 35, SFB 96: München
- [44] Glos, P. und Burger, N., 1997: Maschinelle Festigkeitssortierung von frisch eingeschnittenem Schnittholz. - Bericht Nr. 95507, AIF Abschlussbericht, Universität München
- [45] Glos, P. und Henrici, D., 1993: Klassifizierung von Brettlamellen für den Holzleimbau. - Bericht Nr. 91509, Abschlussbericht, Universität München
- [46] E DIN 1052-1: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. Derzeit im Gelbdruck
- [47] Widmann, R. und Meierhofer, U., 1998: Brücken aus verschraubten Brettstapeln. – Holzzentralblatt Nummer 121, DRW- Verlag: Leinfelden Echterdingen
- [48] Johansen, K. W., 1949: Theory of Timber Connections. International Association of Bridge and Structural Engineering: Bern
- [49] DIN EN 26891: Holzbauwerke- Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln. Ausgabe 1991

- [50] Ehlbeck, J., 1979: Nailed Joints in Wood Structures. - No. 166, Virginia Polytechnic Institute
- [51] Larsen, H.J., 1975: Determination of Load-Slip Curves for Bolts and Nails. - Paper 3, International Union of Forestry Research Organisation: Delft
- [52] Jorissen, A., 1998: Double Shear Timber Connections with Dowel-Type Fasteners. Dissertation Delft University Press
- [53] Foschi, R.O., 1974: Load-Slip Characteristics of Nails. - Wood Science, Vol 7, No. 1
- [54] Blaß, H.J., 1990: Untersuchungen über die Variation des Last-Verschiebungsverhaltens in Nagelverbindungen. - Holz als Roh- und Werkstoff Nr. 48, Springer Verlag
- [55] Taylor, S. und Bender, D., 1989: A Method for Simulating multiple correlated Lumber Properties. - Forest Products Journal, Vol 39, No. 7/8
- [56] Law, A.M. und Kelton, W.D., 1982: Simulation Modelling and Analysis. McGraw- Hill Book Co.: New York
- [57] Geißler, H. und Ortseifen, C., 1995: SAS-Makro-Programmierung - Eine Einführung. - Skript, Universitätsrechenzentrum Heidelberg
- [58] Blaß, H.J., 1991: Traglastberechnung von Nagelverbindungen. - Holz als Roh- und Werkstoff Nr.49, Springer Verlag
- [59] Riemensperger, D., 2001: Genauere Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Nägeln in Brettstapelelementen. Vertieferarbeit (unveröffentlicht) Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe (TH)
- [60] DIN V ENV 1991: Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 2: Einwirkungen auf Tragwerke. Ausgabe Dezember 1995
- [61] Plate, E., 1993: Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure. Verlag für Architektur und technische Wissenschaften: [Berlin](#)
- [62] Haberer, M., 2000: Die Querverteilung von Lasten an Brettstapelelementen. Vertieferarbeit (unveröffentlicht) Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe (TH)

-
- [63] Informationsdienst Holz, 1995: Eurocode 5 - Holzbauwerke Bemessungsgrundlagen und Beispiele. - Holzbauhandbuch, Reihe 2: Tragwerksplanung, Arbeitsgemeinschaft Holz e.V.
- [64] E DIN 1052: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. Ausgabe November 1999
- [65] Blaß, H.J., Krämer, V., 2001: Brettstapel als plattenförmige Bauteile. Fachtagung Holzbau für Ingenieure, Fachverlag Holz: Düsseldorf
- [66] SAS User's Guide, 1985: Statistics. Version 5 Edition, SAS Institute Inc.: Cary, New York
- [67] Kreyszig, E., 1985: Statistische Methoden und ihre Anwendungen. 7. Auflage, 2. Nachdruck, Verlag Vandenhoeck & Ruprecht
- [68] Ehlbeck, J., 1979: Load- Carrying Capacity and Deformation Characteristics of Nailed Joints. - CIB- Paper 12-7-1: Bordeaux, France
- [69] Norèn, B., 1968: Nailed Joints- Their Strength and Rigidity under short Term and long Term Loading. Report No. 22, The National Swedish Institute for Building Research
- [70] ASTM, E 399 – 90: Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of metallic Materials. Reapproved 1997
- [71] Denzler, J., 2000: Wirklichkeitsnahe Darstellung und Simulation statisch unbestimmter Flächentragwerke im direkten Vergleich zu Laborergebnissen. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe (TH)
- [72] Möhler, K., und Herröder, W., 1979: Obere und untere Reibbeiwerte von sägerauhem Fichtenholz. - Holz als Roh- und Werkstoff Nr.37, Springer Verlag
- [73] DIN 52183: Prüfung von Holz; Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes. Ausgabe November 1977
- [74] DIN 52186: Prüfung von Holz; Biegeversuch. Ausgabe Juni 1978

- [75] Görlacher, R., 1984: Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz. - Holz als Roh- und Werkstoff Nr.42, Springer Verlag
- [76] Görlacher, R., 1990: Sortierung von Brettschichtholzlamellen nach DIN 4074 durch Messung von Longitudinalschwingungen. - Bauingenieur 65, Springer Verlag
- [77] Blaß, H.J., Krämer, V., 1997: Sicherheitsrelevante Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von mehreren in Krafrichtung hintereinander liegenden Dübeln besonderer Bauart. Forschungsbericht, Universität Karlsruhe (TH)
- [78] Rößler, J., 2001: Erarbeitung praxisgerechter Bemessungsgleichungen für nachgiebig miteinander verbundene Brettstapelelemente. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe (TH)
- [79] Homepage des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München; Stand: April 2002
- [80] Schickhofer, G. et al., 1998: Entwicklung leistungsfähiger und wirtschaftlicher Bauelemente zur Erhöhung der Wertschöpfung von minderwertigem Schnittholz. Ausgabe März 1998 , Lehrstuhl für Holzbau, TU Graz
- [81] Lämmelin, C., 2001: Vergleichende Betrachtungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Brettstapelelementen mit ungestoßenen Lamellen unter Einwirkung einer zentrisch wirkenden Einzellast. Vertieferarbeit (unveröffentlicht), Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe (TH)
- [82] DIN EN 338: Bauholz für tragende Zwecke, Festigkeitsklassen. Ausgabe Juli 1996
- [83] DIN EN 12512: Prüfverfahren, Zyklische Prüfungen von Anschlüssen mit mechanischen Verbindungsmitteln. Ausgabe August 2002

Tabelle A- 1 Simulationsplan, ungestoßenen Lamellen, zentrische Einzellast Simulationen mit linear elastischem Last-Verformungs-Verhalten der Nagelverbindungen

Nr.	Nagelabstand a_1 [mm]	Lamellenbreite t [mm]	Nagel [1/10mm x mm]	Lamellenhöhe h [mm]
1	75	30	34 x 90	140
2	75	35	38 x 100	140
3	75	40	42 x 120	140
4	75	30	34 x 90	160
5	75	35	38 x 100	160
6	75	40	42 x 120	160
7	75	30	34 x 90	180
8	75	35	38 x 100	180
9	75	40	42 x 120	180
10	150	30	34 x 90	140
11	150	35	38 x 100	140
12	150	40	42 x 120	140
13	150	30	34 x 90	160
14	150	35	38 x 100	160
15	150	40	42 x 120	160
16	150	30	34 x 90	180
17	150	35	38 x 100	180
18	150	40	42 x 120	180
19	225	30	34 x 90	140
20	225	35	38 x 100	140
21	225	40	42 x 120	140
22	225	30	34 x 90	160
23	225	35	38 x 100	160
24	225	40	42 x 120	160
25	225	30	34 x 90	180
26	225	35	38 x 100	180
27	225	40	42 x 120	180
28	300	30	34 x 90	140
29	300	35	38 x 100	140
30	300	40	42 x 120	140
31	300	30	34 x 90	160
32	300	35	38 x 100	160
33	300	40	42 x 120	160
34	300	30	34 x 90	180
35	300	35	38 x 100	180
36	300	40	42 x 120	180

Tabelle A- 2 Simulationsplan, ungestoßenen Lamellen, zentrische Einzellast Simulationen mit nichtlinearem Last-Verformungs-Verhalten der Nagelverbindungen

Nr.	Nagelabstand a_1 [mm]	Lamellenbreite t [mm]	Nagel [1/10mm x mm]	Lamellenhöhe h [mm]
1	75	28	31 x 80	140
2	75	30	34 x 90	140
3	75	40	42 x 120	140
4	75	28	31 x 80	160
5	75	30	34 x 90	160
6	75	40	42 x 120	160
7	75	28	31 x 80	180
8	75	30	34 x 90	180
9	75	40	42 x 120	180
10	150	28	31 x 80	140
11	150	30	34 x 90	140
12	150	40	42 x 120	140
13	150	28	31 x 80	160
14	150	30	34 x 90	160
15	150	40	42 x 120	160
16	150	28	31 x 80	180
17	150	30	34 x 90	180
18	150	40	42 x 120	180
19	225	28	31 x 80	140
20	225	30	34 x 90	140
21	225	40	42 x 120	140
22	225	28	31 x 80	160
23	225	30	34 x 90	160
24	225	40	42 x 120	160
25	225	28	31 x 80	180
26	225	30	34 x 90	180
27	225	40	42 x 120	180

Tabelle A- 3 Simulationsplan, wechselseitig gestoßene Lamellen, zentrische Einzel-
last, Simulationen mit linear elastischem Last-Verformungs-Verhalten
der Nagelverbindungen

Nr.	Lamellenhöhe h [mm]	Lamellenbreite t [mm]	Lamellenlänge [mm]	Nagel [1/10mm x mm]	Nagelabstand a ₁ [mm]	Stoßlage ℓ'
1	160	35	3600	38 x 100	150	1/5
2	160	35	3600	38 x 100	150	1/4
3	160	35	3600	38 x 100	150	1/3
4	160	35	3600	38 x 100	225	1/5
5	160	35	3600	38 x 100	225	1/4
6	160	35	3600	38 x 100	225	1/3
7	160	35	3600	38 x 100	75	1/5
8	160	35	3600	38 x 100	75	1/4
9	160	35	3600	38 x 100	75	1/3
10	140	35	3600	38 x 100	150	1/3
11	140	35	3600	38 x 100	225	1/3
12	140	35	3600	38 x 100	75	1/3
13	180	35	3600	38 x 100	150	1/3
14	180	35	3600	38 x 100	225	1/3
15	180	35	3600	38 x 100	75	1/3
16	160	30	3600	34 x 90	150	1/3
17	160	30	3600	34 x 90	225	1/3
18	160	30	3600	34 x 90	75	1/3
19	160	40	3600	42 x 120	150	1/3
20	160	40	3600	42 x 120	225	1/3
21	160	40	3600	42 x 120	75	1/3

Tabelle A- 4 Simulationsplan, wechselseitig gestoßene Lamellen, zentrische Einzel-
last, Simulationen mit nichtlinearem Last-Verformungs-Verhalten der
Nagelverbindungen

Nr.	Lamellenhöhe h	Lamellenbreite t	Lamellenlänge	Nagel	Nagelabstand a_1	Stoßlage
	[mm]	[mm]	[mm]	[1/10mm x mm]	[mm]	l'
1	180	28	3600	31 x 80	225	1/3
2	180	28	3600	31 x 80	150	1/3
3	180	28	3600	31 x 80	75	1/3
4	160	28	3600	31 x 80	225	1/3
5	160	28	3600	31 x 80	150	1/3
6	160	28	3600	31 x 80	75	1/3
7	140	28	3600	31 x 80	225	1/3
8	140	28	3600	31 x 80	150	1/3
9	140	28	3600	31 x 80	75	1/3
10	180	40	3600	42 x 120	225	1/3
11	180	40	3600	42 x 120	150	1/3
12	180	40	3600	42 x 120	75	1/3
13	160	40	3600	42 x 120	225	1/3
14	160	40	3600	42 x 120	150	1/3
15	160	40	3600	42 x 120	75	1/3
16	140	40	3600	42 x 120	225	1/3
17	140	40	3600	42 x 120	150	1/3
18	140	40	3600	42 x 120	75	1/3
19	180	35	3600	38 x 100	225	1/3
20	180	35	3600	38 x 100	150	1/3
21	180	35	3600	38 x 100	75	1/3
22	160	35	3600	38 x 100	225	1/3
23	160	35	3600	38 x 100	150	1/3
24	160	35	3600	38 x 100	75	1/3
25	140	35	3600	38 x 100	225	1/3
26	140	35	3600	38 x 100	150	1/3
27	140	35	3600	38 x 100	75	1/3

Tabelle A- 5 Simulationsplan, wandernd gestoßene Lamellen, zentrische Einzellast
Simulationen mit linear elastischem Last-Verformungs-Verhalten der
Nagelverbindungen

Nr.	Lamellenhöhe h	Lamellenbreite t	Lamellenlänge	Nagel	Nagelabstand a ₁	$l_{\ddot{u}}^1$
	[mm]	[mm]	[mm]	[1/10 mm x mm]	[mm]	[mm]
1	160	35	3600	38 x 100	150	600
2	160	35	3600	38 x 100	150	900
3	160	35	3600	38 x 100	225	600
4	160	35	3600	38 x 100	225	900
5	160	35	3600	38 x 100	75	600
6	160	35	3600	38 x 100	75	900
7	140	35	3600	38 x 100	150	600
8	140	35	3600	38 x 100	225	600
9	140	35	3600	38 x 100	75	600
10	180	35	3600	38 x 100	150	600
11	180	35	3600	38 x 100	225	600
12	180	35	3600	38 x 100	75	600
13	160	30	3600	34 x 90	150	600
14	160	30	3600	34 x 90	225	600
15	160	30	3600	34 x 90	75	600
16	160	40	3600	42 x 120	150	600
17	160	40	3600	42 x 120	225	600
18	160	40	3600	42 x 120	75	600

¹ $l_{\ddot{u}}$ entspricht der Übergreifungslänge

Tabelle A- 6 Simulationsplan, wandernd gestoßene Lamellen, zentrische Einzellast, Simulationen mit nichtlinearem Last-Verformungs-Verhalten der Nagelverbindungen

Nr.	Lamellenhöhe h	Lamellenbreite t	Lamellenlänge	Nagel	Nagelabstand a ₁	$l_{\bar{u}}^1$
	[mm]	[mm]	[mm]	[1/10 mm x mm]	[mm]	[mm]
1	160	35	3600	38 x 100	150	600
2	160	35	3600	38 x 100	150	900
3	160	35	3600	38 x 100	225	600
4	160	35	3600	38 x 100	225	900
5	160	35	3600	38 x 100	75	600
6	160	35	3600	38 x 100	75	900
7	140	35	3600	38 x 100	150	600
8	140	35	3600	38 x 100	225	600
9	140	35	3600	38 x 100	75	600
10	180	35	3600	38 x 100	150	600
11	180	35	3600	38 x 100	225	600
12	180	35	3600	38 x 100	75	600
13	160	30	3600	34 x 90	150	600
14	160	30	3600	34 x 90	225	600
15	160	30	3600	34 x 90	75	600
16	160	40	3600	42 x 120	150	600
17	160	40	3600	42 x 120	225	600
18	160	40	3600	42 x 120	75	600

¹ $l_{\bar{u}}$ entspricht der Übergreifungslänge

Tabelle A- 7 Simulationsplan, zufällig gestoßene Lamellen, zentrische Einzellast Simulationen mit linear elastischem Last-Verformungs-Verhalten der Nagelverbindungen

Nr.	Lamellenhöhe h	Lamellenbreite t	Lamellenlänge	Nagel	Nagelabstand a ₁
	[mm]	[mm]	[mm]	[1/10 mm x mm]	[mm]
1	160	35	3600	38 x 100	150
2	160	35	3600	38 x 100	75
3	160	35	3600	38 x 100	225
4	140	35	3600	38 x 100	150
5	140	35	3600	38 x 100	75
6	140	35	3600	38 x 100	225
7	180	35	3600	38 x 100	150
8	180	35	3600	38 x 100	75
9	180	35	3600	38 x 100	225
10	160	30	3600	34 x 90	150
11	160	30	3600	34 x 90	75
12	160	30	3600	34 x 90	225
13	160	40	3600	42 x 120	150
14	160	40	3600	42 x 120	75
15	160	40	3600	42 x 120	225

Tabelle A- 8 Simulationsplan, zufällig gestoßene Lamellen, zentrische Einzellast Simulationen mit nichtlinearem Last-Verformungs-Verhalten der Nagelverbindungen

Nr.	Lamellenhöhe h	Lamellenbreite t	Lamellenlänge	Nagel	Nagelabstand a ₁
	[mm]	[mm]	[mm]	[1/10 mm x mm]	[mm]
1	160	35	3600	38 x 100	150
2	160	35	3600	38 x 100	75
3	160	35	3600	38 x 100	225
4	140	35	3600	38 x 100	150
5	140	35	3600	38 x 100	75
6	140	35	3600	38 x 100	225
7	180	35	3600	38 x 100	150
8	180	35	3600	38 x 100	75
9	180	35	3600	38 x 100	225
10	160	30	3600	34 x 90	150
11	160	30	3600	34 x 90	75
12	160	30	3600	34 x 90	225
13	160	40	3600	42 x 120	150
14	160	40	3600	42 x 120	75
15	160	40	3600	42 x 120	225

Tabelle A- 9 Simulationsplan, wechselseitig gestoßene Lamellen, gleichförmige Flächenlast, Simulationen mit linear elastischem Last-Verformungs-Verhalten der Nagelverbindungen

Nr.	Lamellenhöhe h [mm]	Lamellenbreite t [mm]	Lamellenlänge [mm]	Nagel [1/10mm x mm]	Nagelabstand a_1 [mm]	Stoßlage ℓ
1	160	35	3600	38 x 100	150	1/5
2	160	35	3600	38 x 100	150	1/4
3	160	35	3600	38 x 100	150	1/3
4	160	35	3600	38 x 100	225	1/5
5	160	35	3600	38 x 100	225	1/4
6	160	35	3600	38 x 100	225	1/3
7	160	35	3600	38 x 100	75	1/5
8	160	35	3600	38 x 100	75	1/4
9	160	35	3600	38 x 100	75	1/3
10	140	35	3600	38 x 100	150	1/3
11	140	35	3600	38 x 100	225	1/3
12	140	35	3600	38 x 100	75	1/3
13	180	35	3600	38 x 100	150	1/3
14	180	35	3600	38 x 100	225	1/3
15	180	35	3600	38 x 100	75	1/3
16	160	30	3600	34 x 90	150	1/3
17	160	30	3600	34 x 90	225	1/3
18	160	30	3600	34 x 90	75	1/3
19	160	40	3600	42 x 120	150	1/3
20	160	40	3600	42 x 120	225	1/3
21	160	40	3600	42 x 120	75	1/3

Tabelle A- 10 Simulationsplan, wandernd gestoßene Lamellen, gleichförmige Flächenlast, Simulationen mit linear elastischem Last-Verformungsverhalten der Nagelverbindungen

Nr.	Lamellenhöhe h	Lamellenbreite t	Lamellenlänge	Nagel	Nagelabstand a ₁	$l_{\bar{u}}^1$
	[mm]	[mm]	[mm]	[1/10mm x mm]	[mm]	[mm]
1	160	35	3600	38 x 100	150	600
2	160	35	3600	38 x 100	150	900
3	160	35	3600	38 x 100	225	600
4	160	35	3600	38 x 100	225	900
5	160	35	3600	38 x 100	75	600
6	160	35	3600	38 x 100	75	900
7	140	35	3600	38 x 100	150	600
8	140	35	3600	38 x 100	225	600
9	140	35	3600	38 x 100	75	600
10	180	35	3600	38 x 100	150	600
11	180	35	3600	38 x 100	225	600
12	180	35	3600	38 x 100	75	600
13	160	30	3600	34 x 90	150	600
14	160	30	3600	34 x 90	225	600
15	160	30	3600	34 x 90	75	600
16	160	40	3600	42 x 120	150	600
17	160	40	3600	42 x 120	225	600
18	160	40	3600	42 x 120	75	600

¹ $l_{\bar{u}}$ entspricht der Übergreifungslänge

Tabelle A- 11 Simulationsplan, zufällig gestoßene Lamellen, gleichförmige Flächenlast, Simulationen mit linear elastischem Last-Verformungs-Verhalten der Nagelverbindungen

Nr.	Lamellenhöhe h [mm]	Lamellenbreite t [mm]	Lamellenlänge [mm]	Nagel [1/10mm x mm]	Nagelabstand a ₁ [mm]
1	160	35	3600	38 x 100	150
2	160	35	3600	38 x 100	75
3	160	35	3600	38 x 100	225
4	140	35	3600	38 x 100	150
5	140	35	3600	38 x 100	75
6	140	35	3600	38 x 100	225
7	180	35	3600	38 x 100	150
8	180	35	3600	38 x 100	75
9	180	35	3600	38 x 100	225
10	160	30	3600	34 x 90	150
11	160	30	3600	34 x 90	75
12	160	30	3600	34 x 90	225
13	160	40	3600	42 x 120	150
14	160	40	3600	42 x 120	75
15	160	40	3600	42 x 120	225

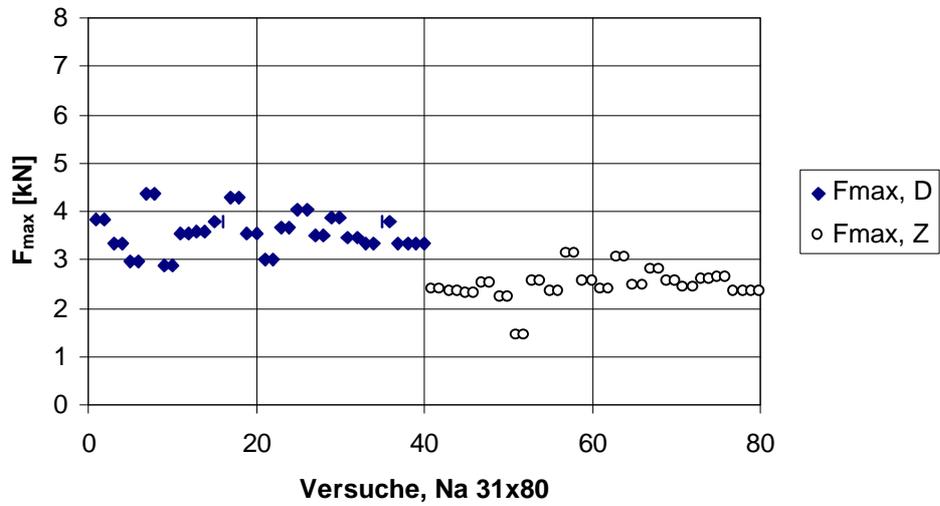


Bild B- 1 Höchstlasten F_{max} der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 31 x 80 [1/10 mm x mm]

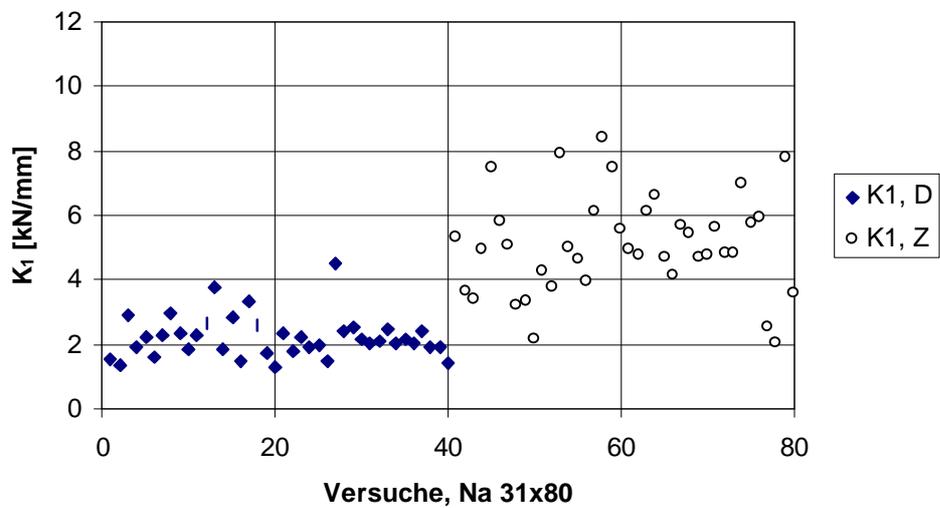


Bild B- 2 Kurvenparameter K_1 der Last-Verschiebungs-Kurven der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 31 x 80 [1/10 mm x mm]

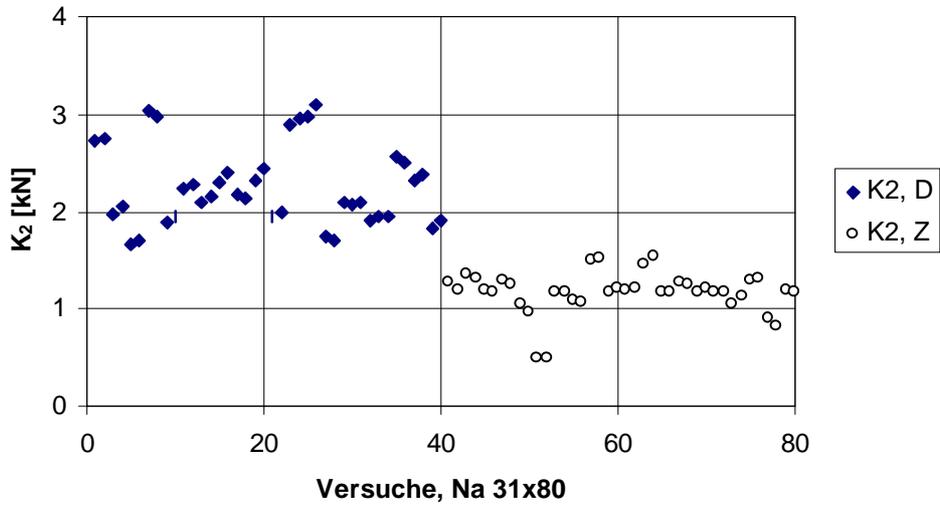


Bild B- 3 Kurvenparameter K_2 der Last-Verschiebungs-Kurven der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 31 x 80 [1/10 mm x mm]

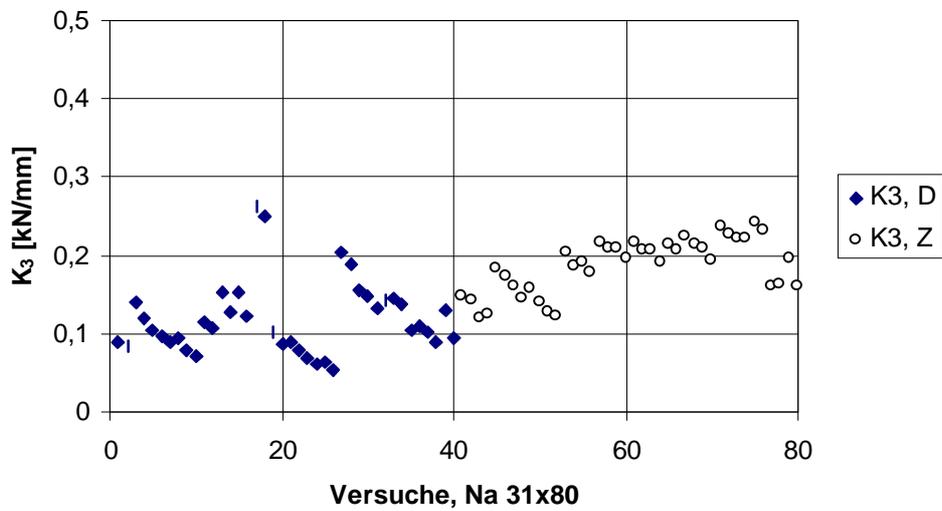


Bild B- 4 Kurvenparameter K_3 der Last-Verschiebungs-Kurven der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 31 x 80 [1/10 mm x mm]

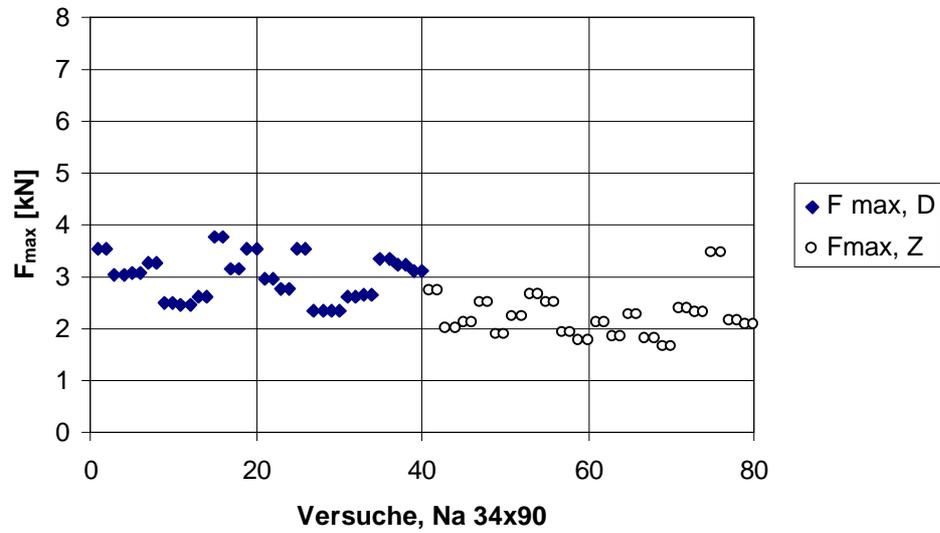


Bild B- 5 Höchstlasten F_{\max} der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 34 x 90 [1/10 mm x mm]

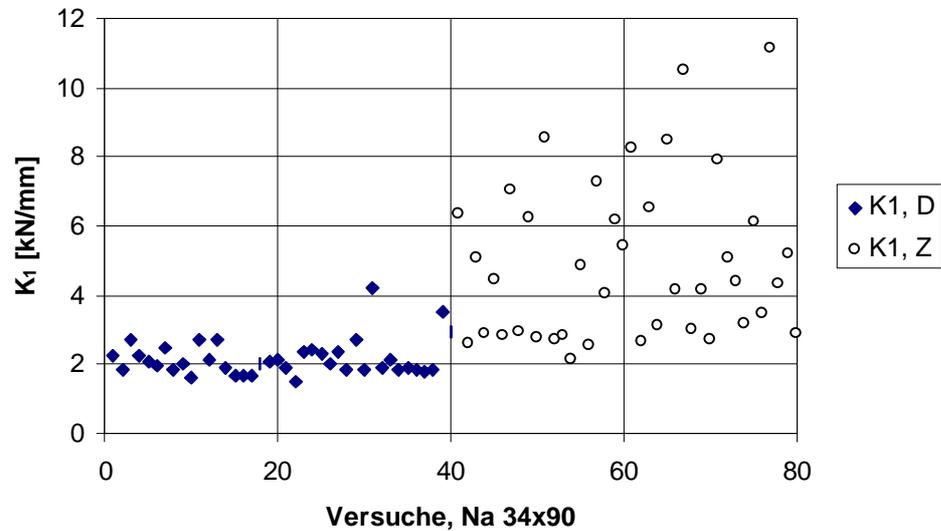


Bild B- 6 Kurvenparameter K_1 der Last-Verschiebungs-Kurven der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 34 x 90 [1/10 mm x mm]

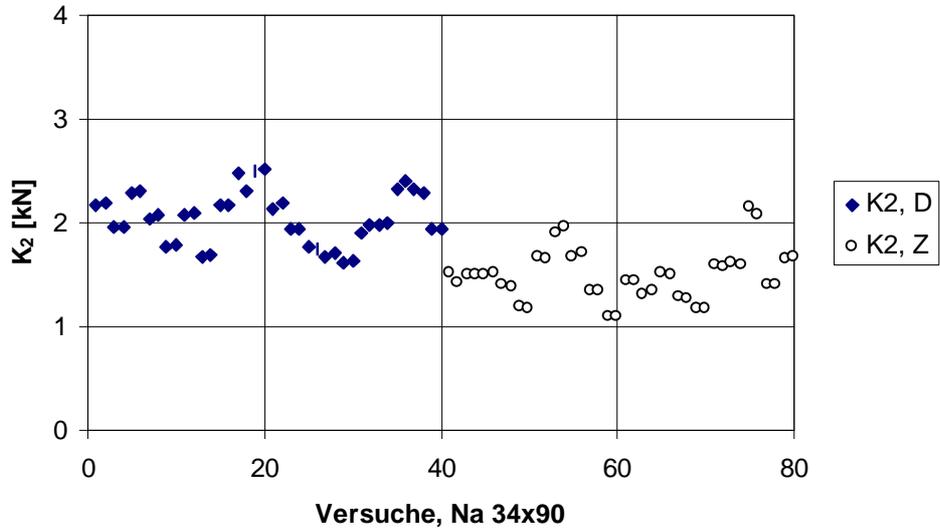


Bild B- 7 Kurvenparameter K_2 der Last-Verschiebungs-Kurven der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 34 x 90 [1/10 mm x mm]

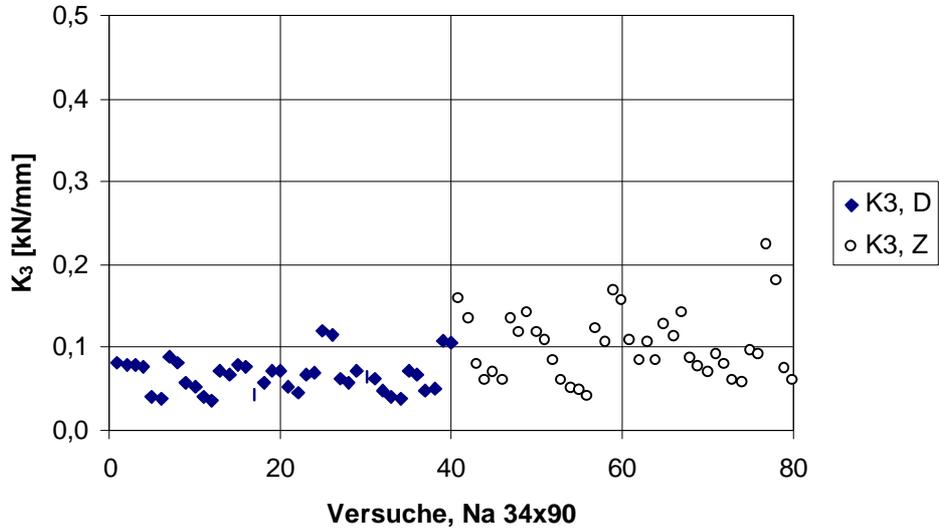


Bild B- 8 Kurvenparameter K_3 der Last-Verschiebungs-Kurven der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 34 x 90 [1/10 mm x mm]

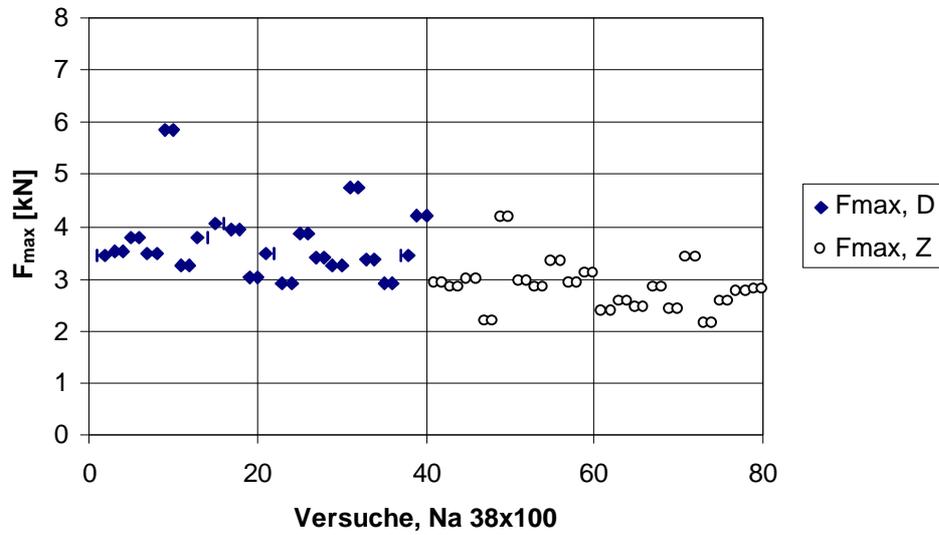


Bild B- 9 Höchstlasten F_{\max} der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 38 x 100 [1/10 mm x mm]

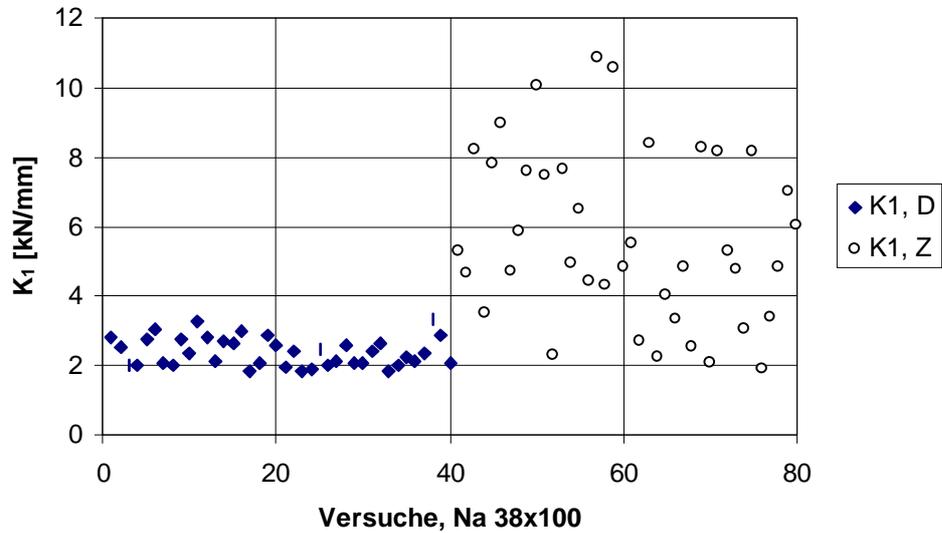


Bild B- 10 Kurvenparameter K_1 der Last-Verschiebungs-Kurven der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 38 x 100 [1/10 mm x mm]

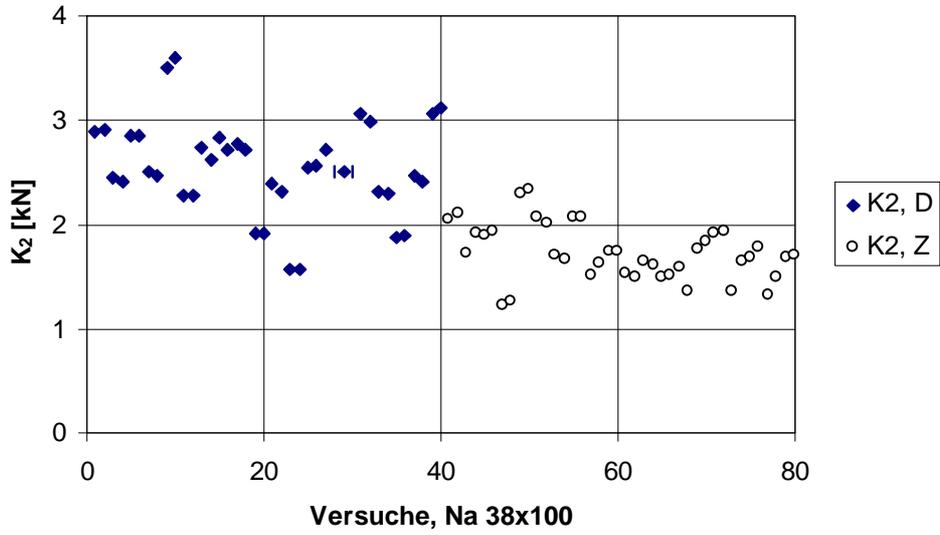


Bild B- 11 Kurvenparameter K_2 der Last-Verschiebungs-Kurven der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 38 x 100 [1/10 mm x mm]

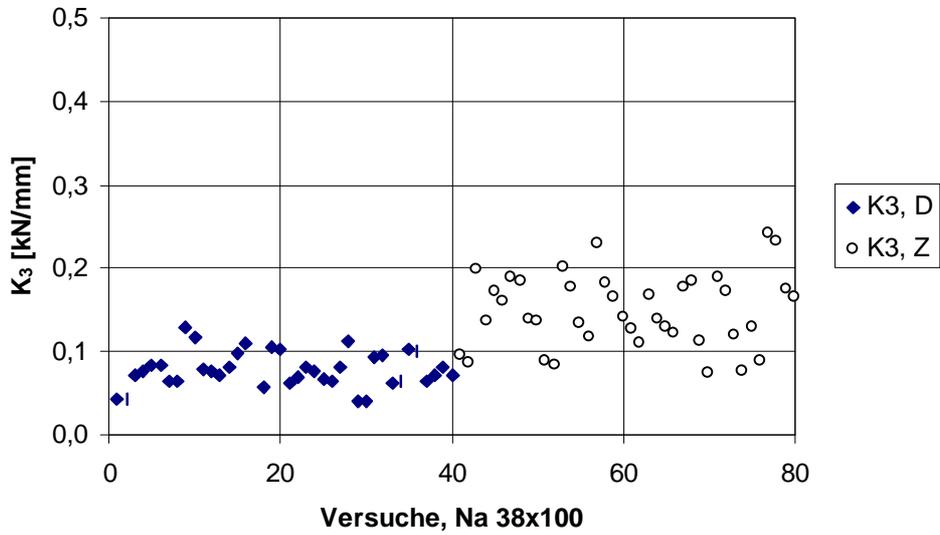


Bild B- 12 Kurvenparameter K_3 der Last-Verschiebungs-Kurven der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 34 x 90 [1/10 mm x mm]

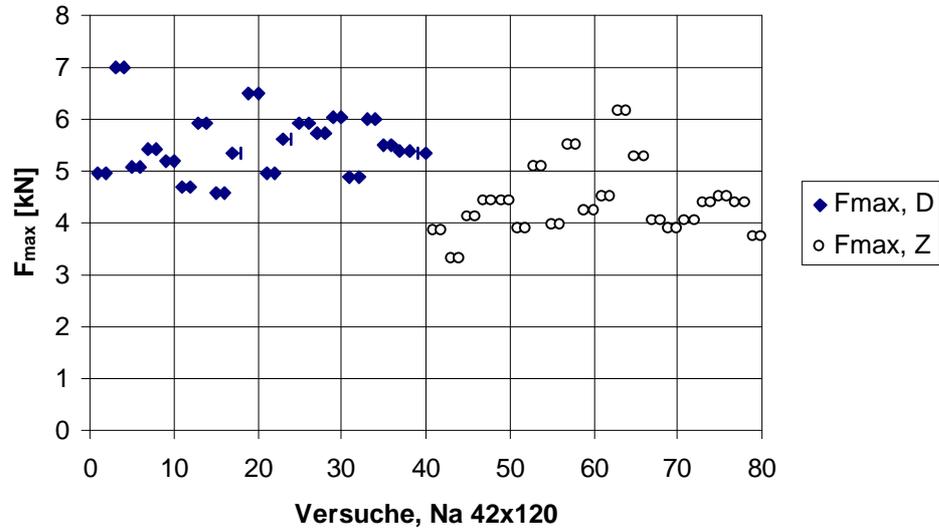


Bild B- 13 Höchstlasten F_{max} der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 42 x 120 [1/10 mm x mm]

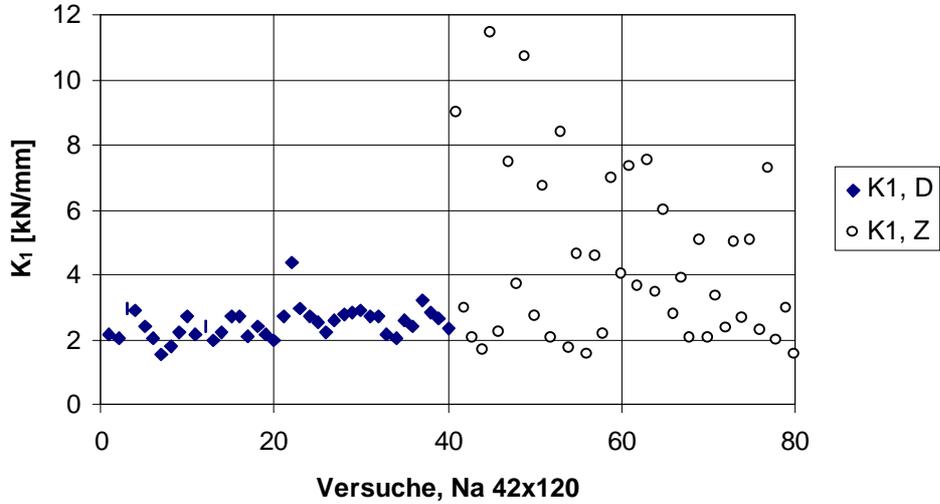


Bild B- 14 Kurvenparameter K_1 der Last-Verschiebungs-Kurven der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 42 x 120 [1/10 mm x mm]

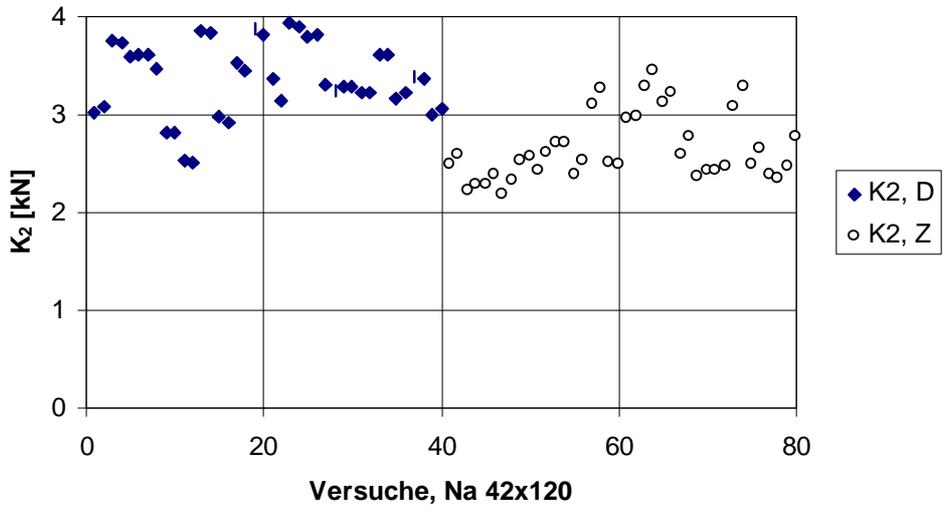


Bild B- 15 Kurvenparameter K_2 der Last-Verschiebungs-Kurven der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 42 x 120 [1/10 mm x mm]

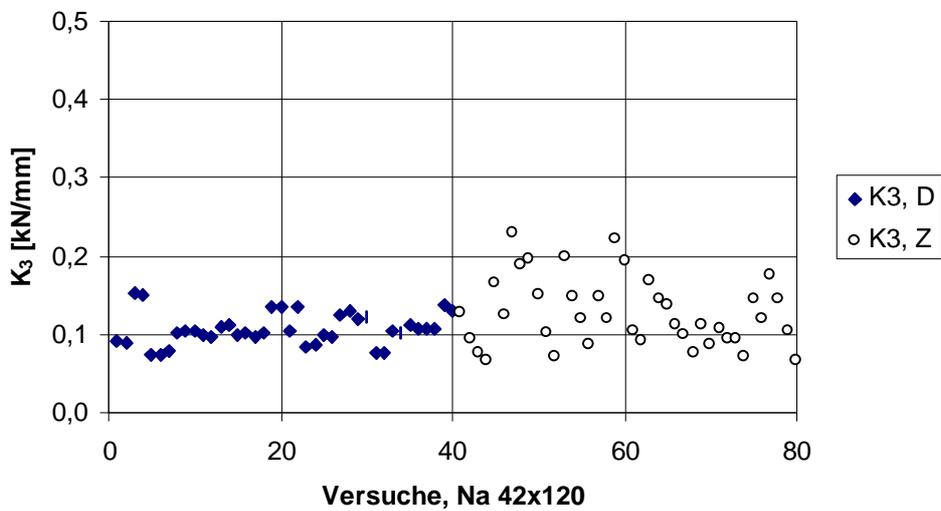


Bild B- 16 Kurvenparameter K_3 der Last-Verschiebungs-Kurven der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 42 x 120 [1/10 mm x mm]

Die Höchstlast F_{\max} und der Kurvenparameter K_1 (Anfangssteigung der Last-Verschiebungs-Kurve) sind die signifikanten Parameter, mit denen die Charakteristik des Trag- und Verformungsverhaltens einer genagelten Holz-Holz-Verbindung näherungsweise beschrieben werden kann. In den folgenden Bildern sind die aus den Versuchsergebnissen bestimmten Normalverteilungsfunktionen (Zug- und Druckscherversuche) der beiden Parameter F_{\max} und K_1 dargestellt.

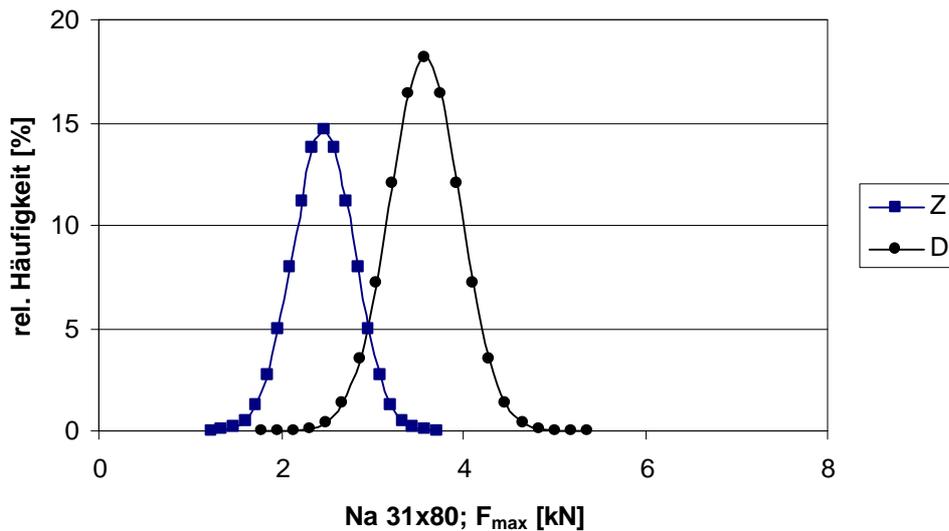


Bild B- 17 Normalverteilungen der Höchstlasten der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 31 x 80 [1/10 mm x mm]

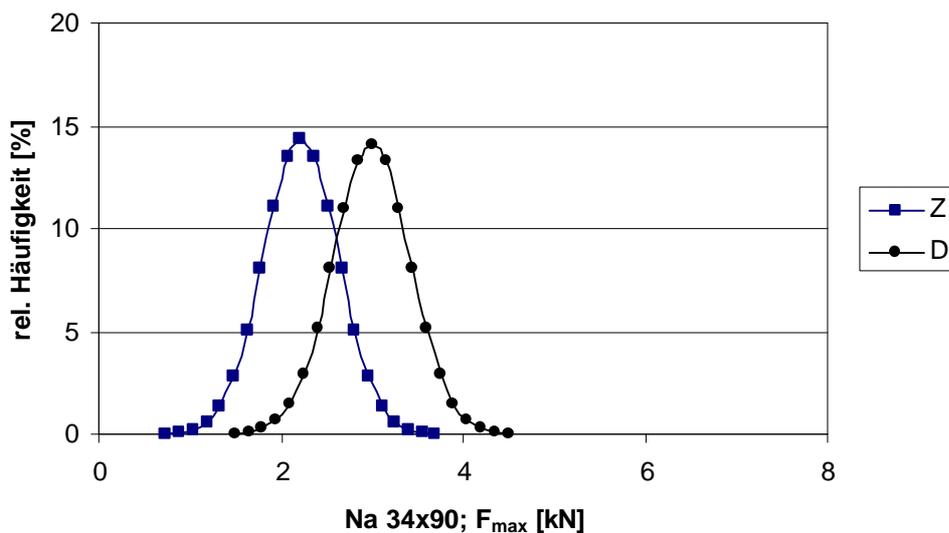


Bild B- 18 Normalverteilungen der Höchstlasten der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 34 x 90 [1/10 mm x mm]

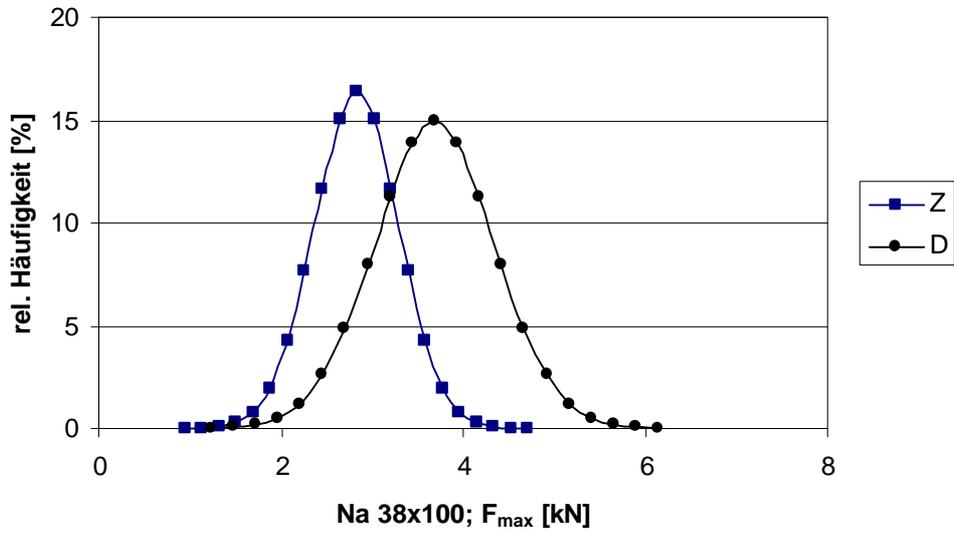


Bild B- 19 Normalverteilungen der Höchstlasten der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 38 x 100 [1/10 mm x mm]

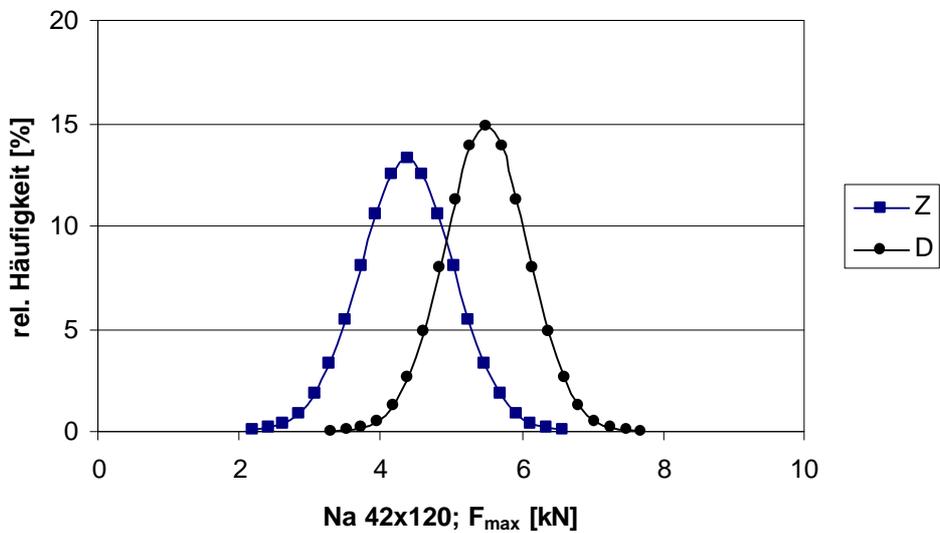


Bild B- 20 Normalverteilungen der Höchstlasten der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 42 x 120 [1/10 mm x mm]

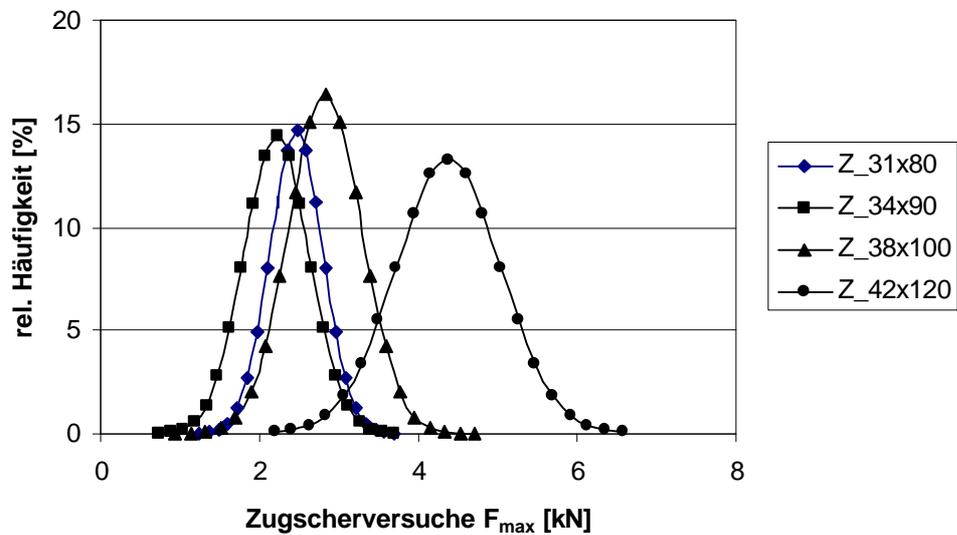


Bild B- 21 Vergleich der Normalverteilungen der Höchstlasten - Zugscherversuche, vier unterschiedliche Nageldurchmesser

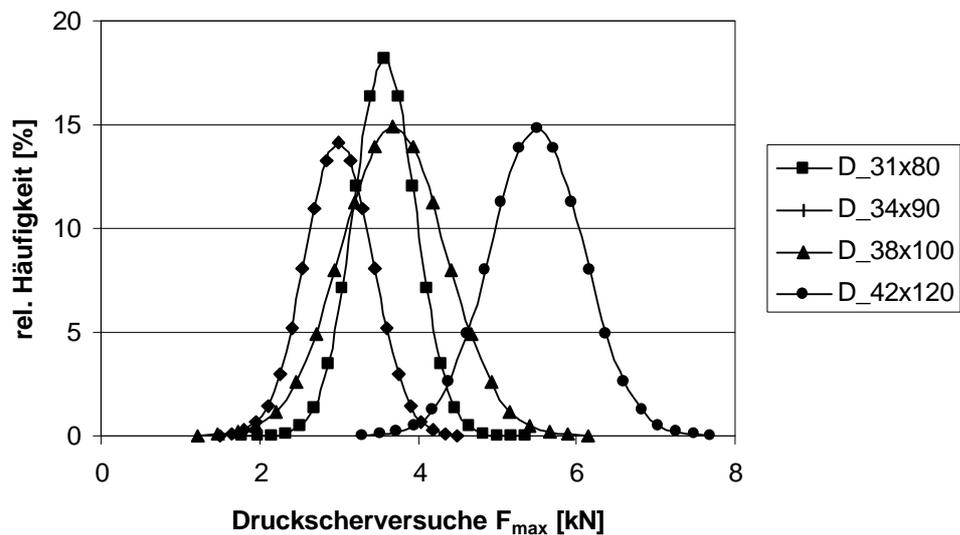


Bild B- 22 Vergleich der Normalverteilungen der Höchstlasten - Druckscherversuche, vier unterschiedliche Nageldurchmesser

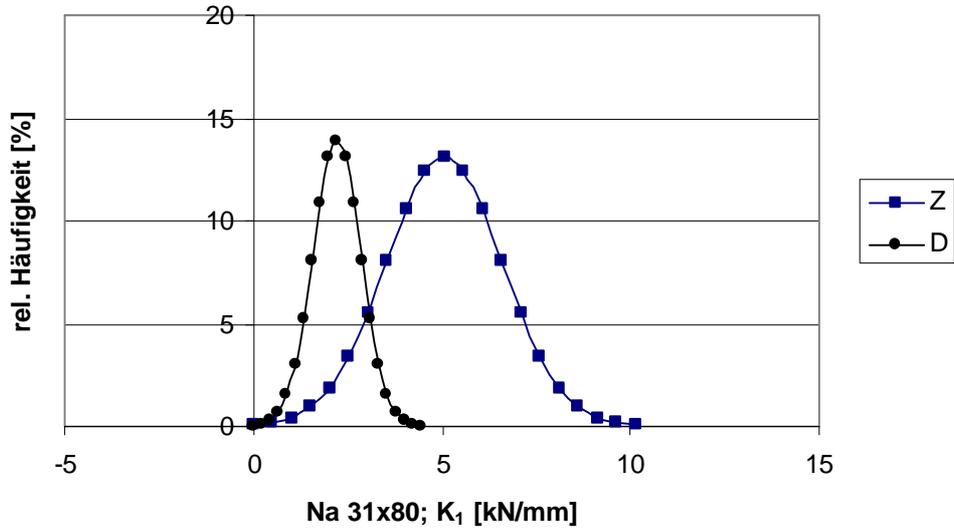


Bild B- 23 Normalverteilungen der Kurvenparameter K_1 der Last-Verschiebungs-Kurven der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 31 x 80 [1/10 mm x mm]

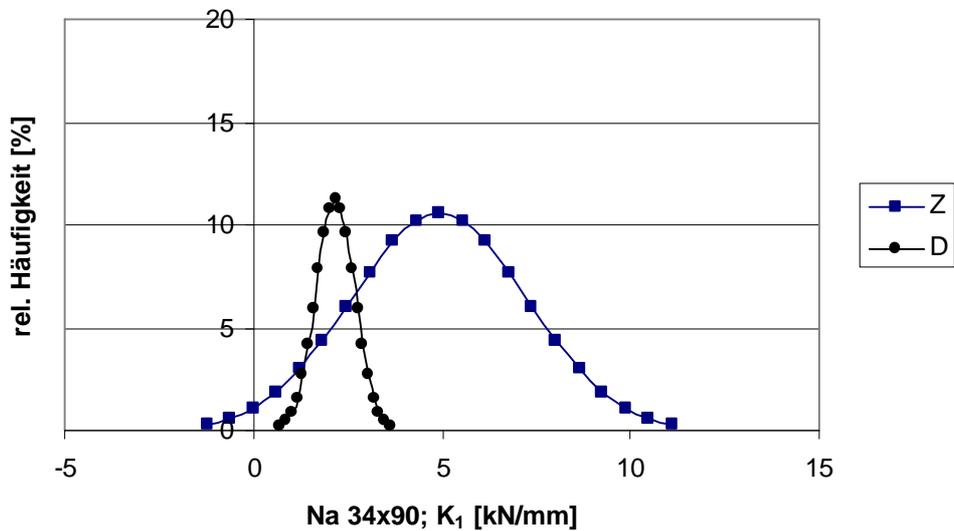


Bild B- 24 Normalverteilungen der Kurvenparameter K_1 der Last-Verschiebungs-Kurven der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 34 x 90 [1/10 mm x mm]

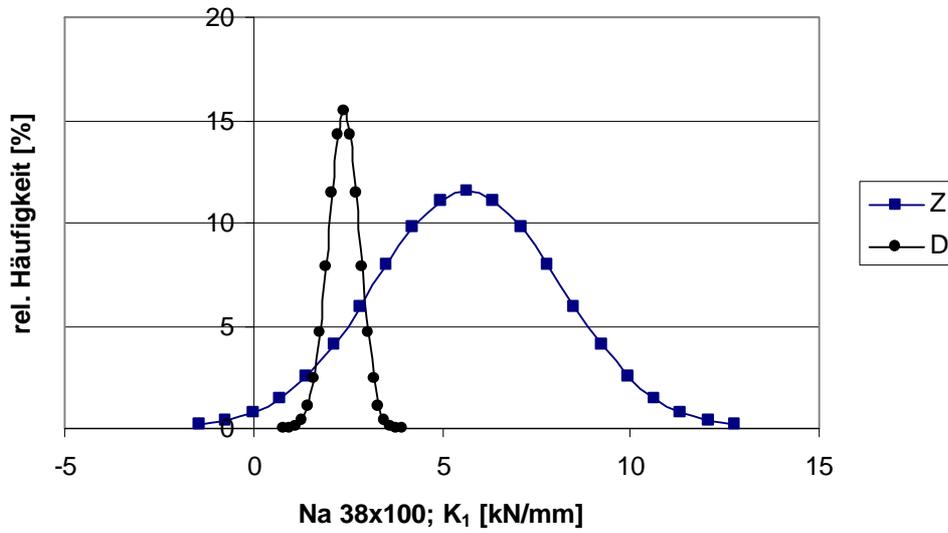


Bild B- 25 Normalverteilungen der Kurvenparameter K_1 der Last-Verschiebungs-Kurven der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 38 x 100 [1/10 mm x mm]

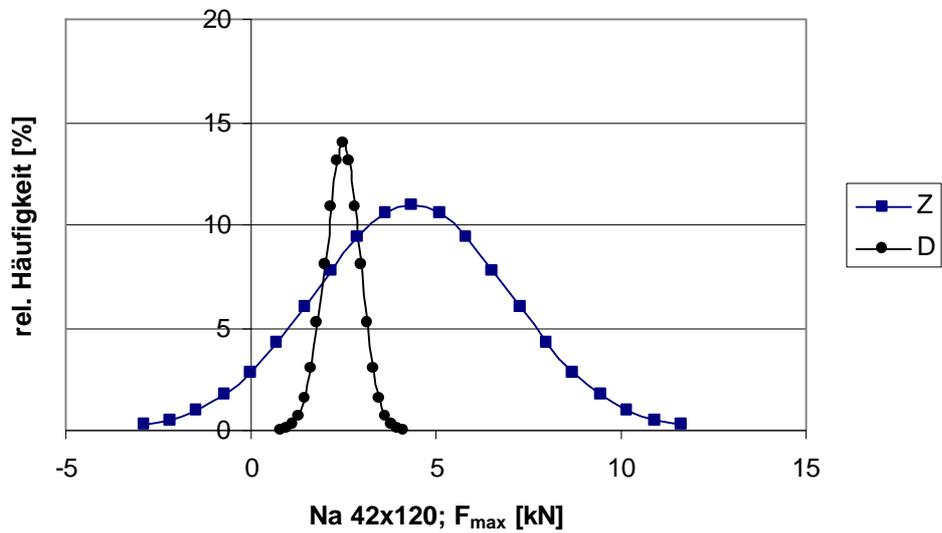


Bild B- 26 Normalverteilungen der Kurvenparameter K_1 der Last-Verschiebungs-Kurven der Prüfkörper der Zug- und Druckscherversuche, Nägel 42 x 120 [1/10 mm x mm]

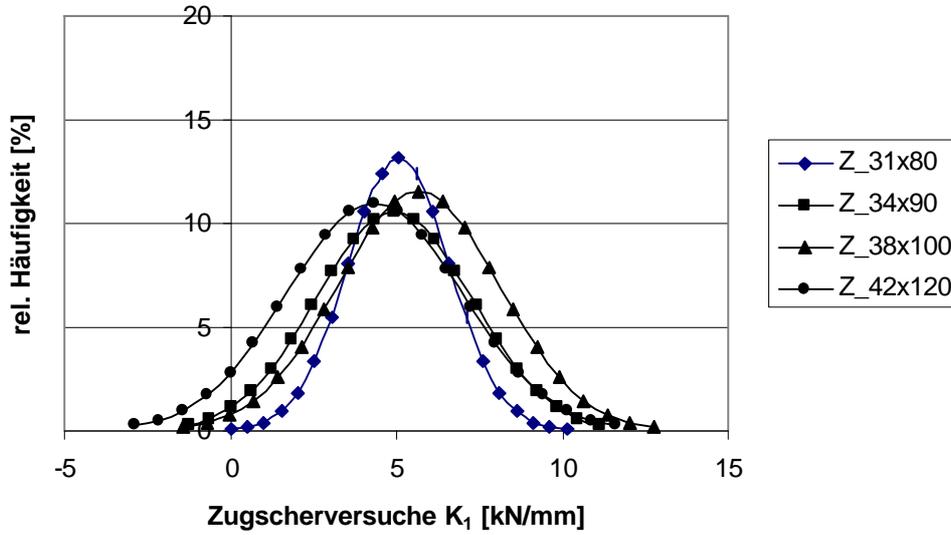


Bild B- 27 Vergleich der Normalverteilungen der Kurvenparameter K_1 der Last-Verschiebungs-Kurven der Prüfkörper; Zugscherversuche, vier unterschiedliche Nageldurchmesser

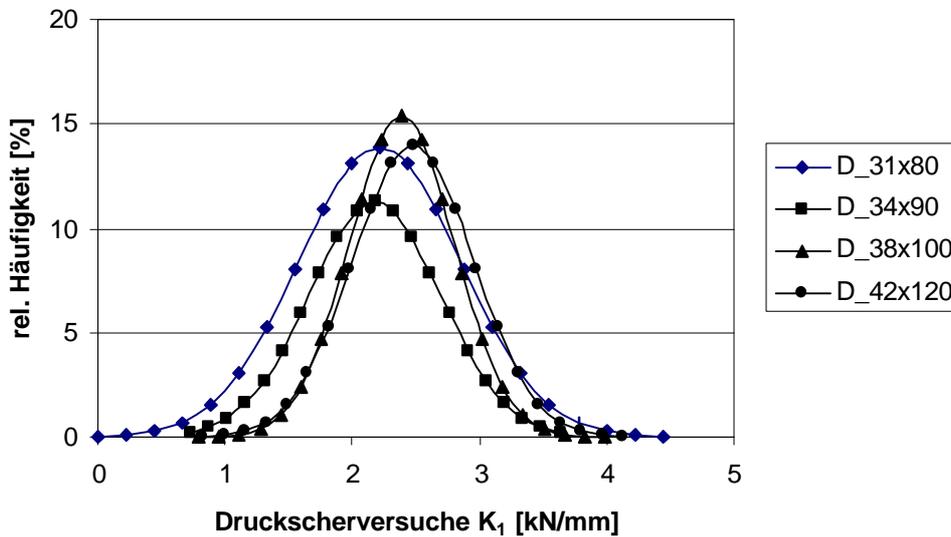


Bild B- 28 Vergleich der Normalverteilungen der Kurvenparameter K_1 der Last-Verschiebungs-Kurven der Prüfkörper; Druckscherversuche, vier unterschiedliche Nageldurchmesser

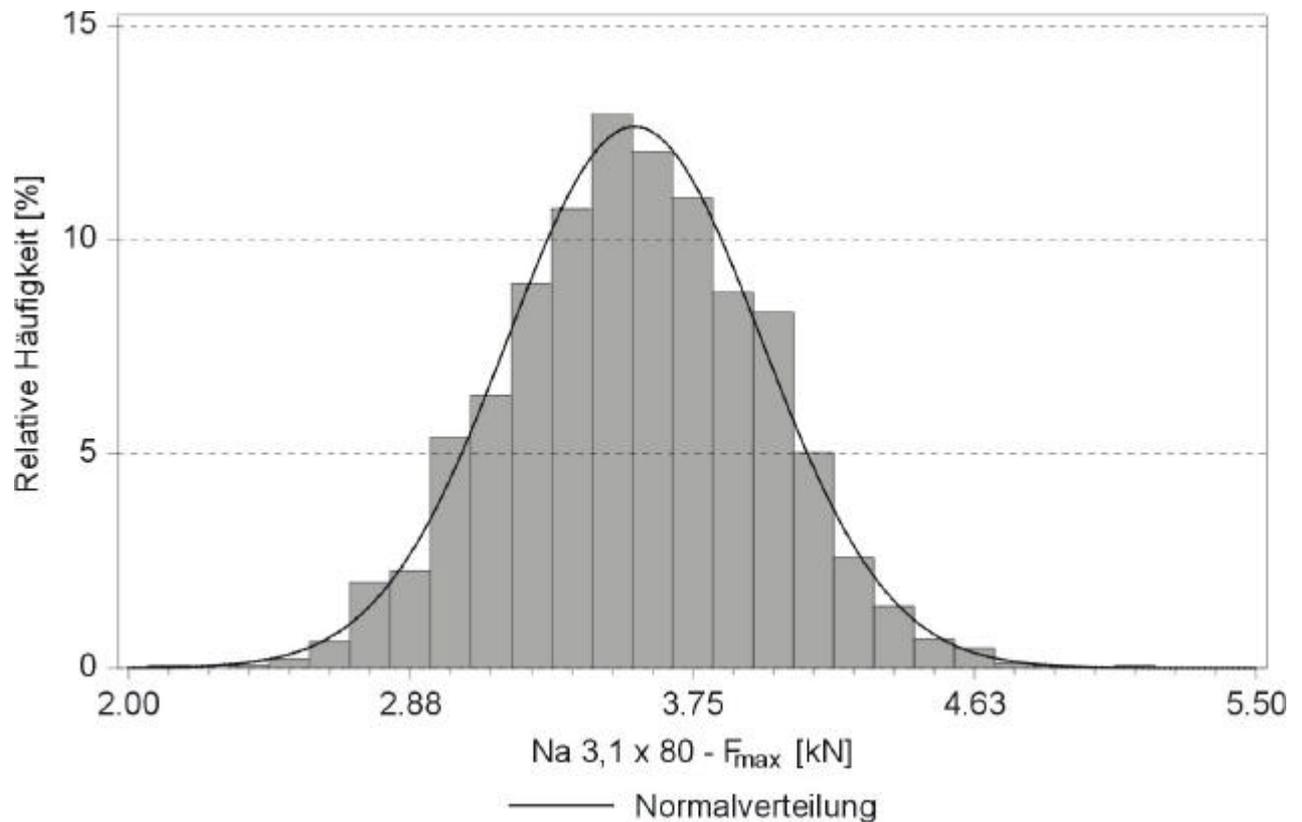


Bild B- 29 Verteilung simulierter Höchstlasten [kN]; zweisechnittige, genagelte Holz-Holz-Verbindung, Na 3,1 x 80 mm, 1950 Werte

Normalverteilung:

μ	Mittelwert	= 3,58 kN
σ	Standardabweichung	= 0,398 kN

(vgl. Gleichung (3- 2))

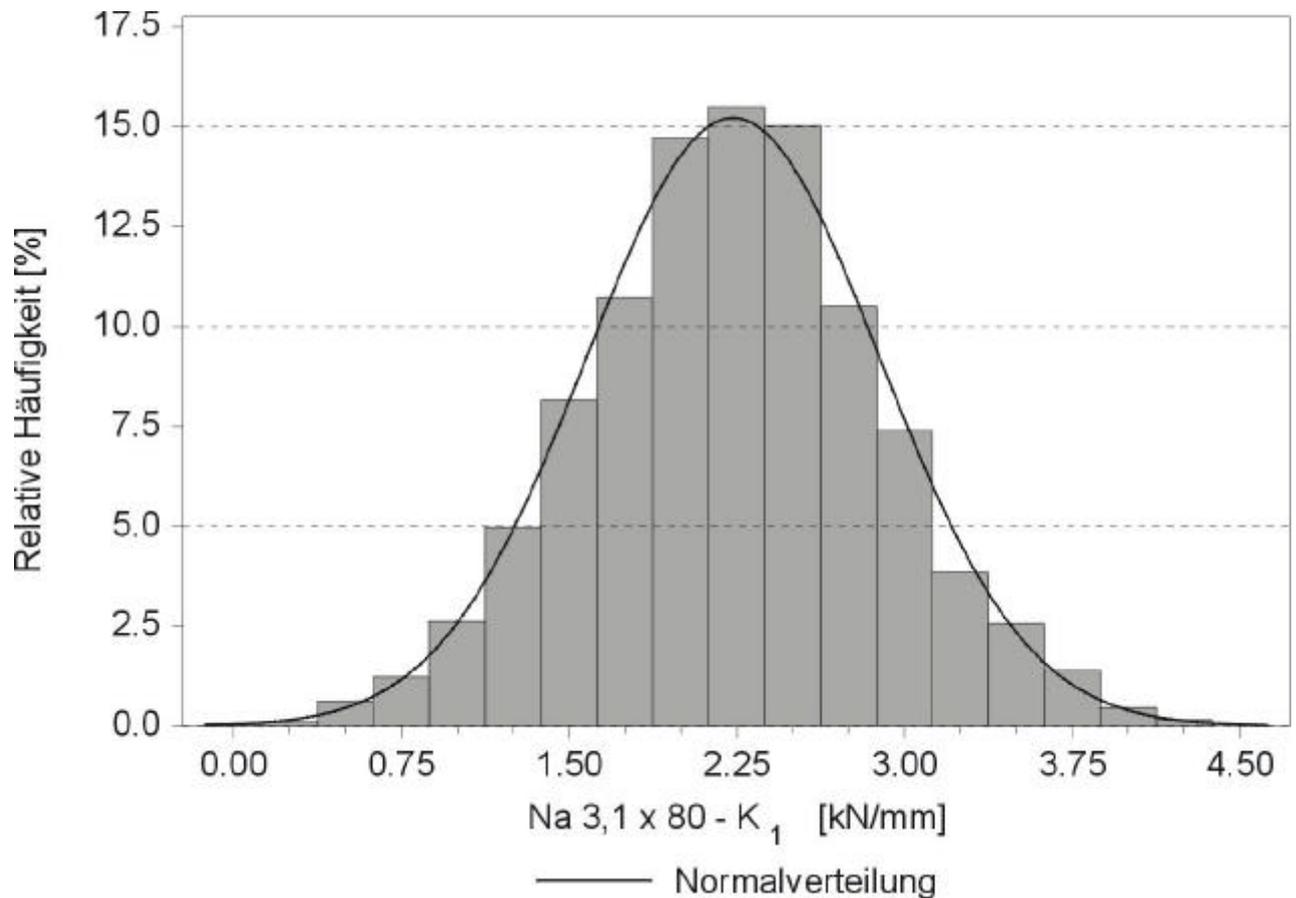


Bild B- 30 Verteilung simulierter Kurvenparameter K_1 [kN/mm] zur Beschreibung einer Last-Verschiebungs-Kurve; zweischnittige, genagelte Holz-Holz-Verbindung, Na 3,1 x 80 mm, 1950 Werte

Normalverteilung:

μ Mittelwert = 2,22 kN/mm

σ Standardabweichung = 0,646 kN/mm

(vgl. Gleichung (3- 2))

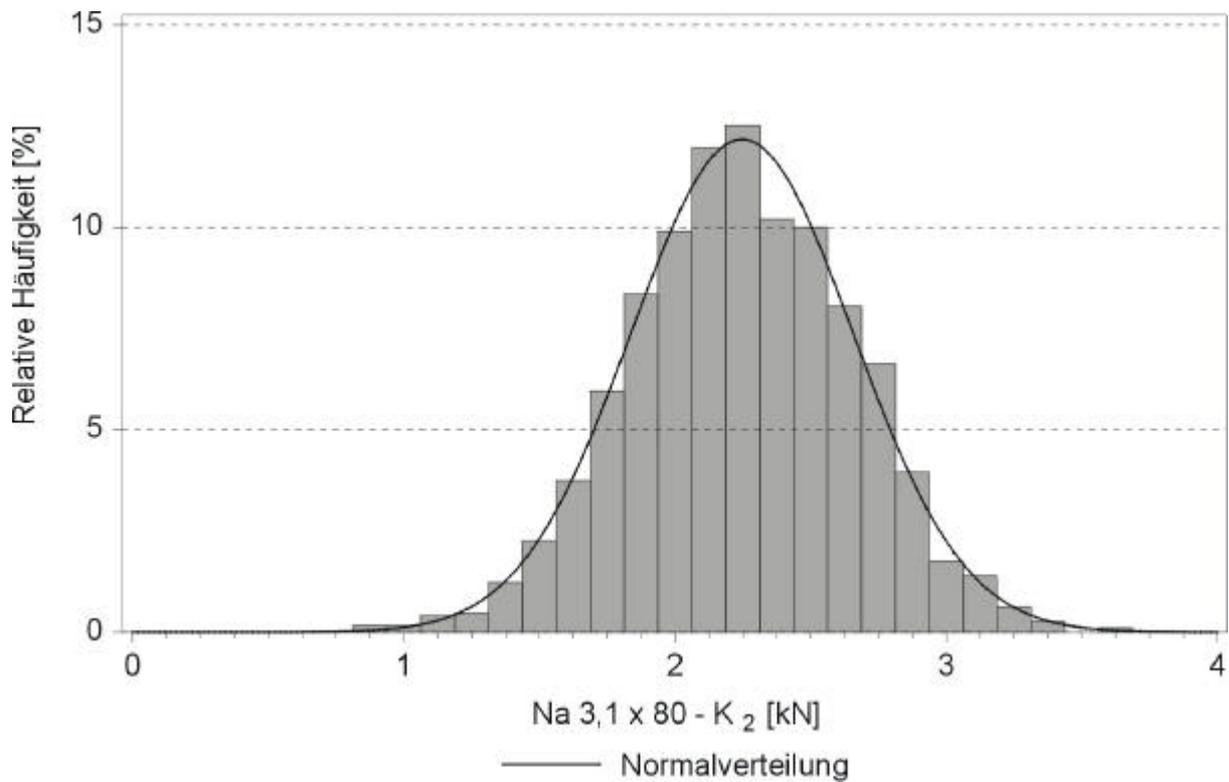


Bild B- 31 Verteilung simulierter Kurvenparameter K_2 [kN] zur Beschreibung einer Last-Verschiebungs-Kurve; zweischnittige, genagelte Holz-Holz-Verbindung, Na 3,1 x 80 mm, 1950 Werte

Normalverteilung:

μ	Mittelwert	= 2,52 kN
σ	Standardabweichung	= 0,405 kN

(vgl. Gleichung (3- 2))

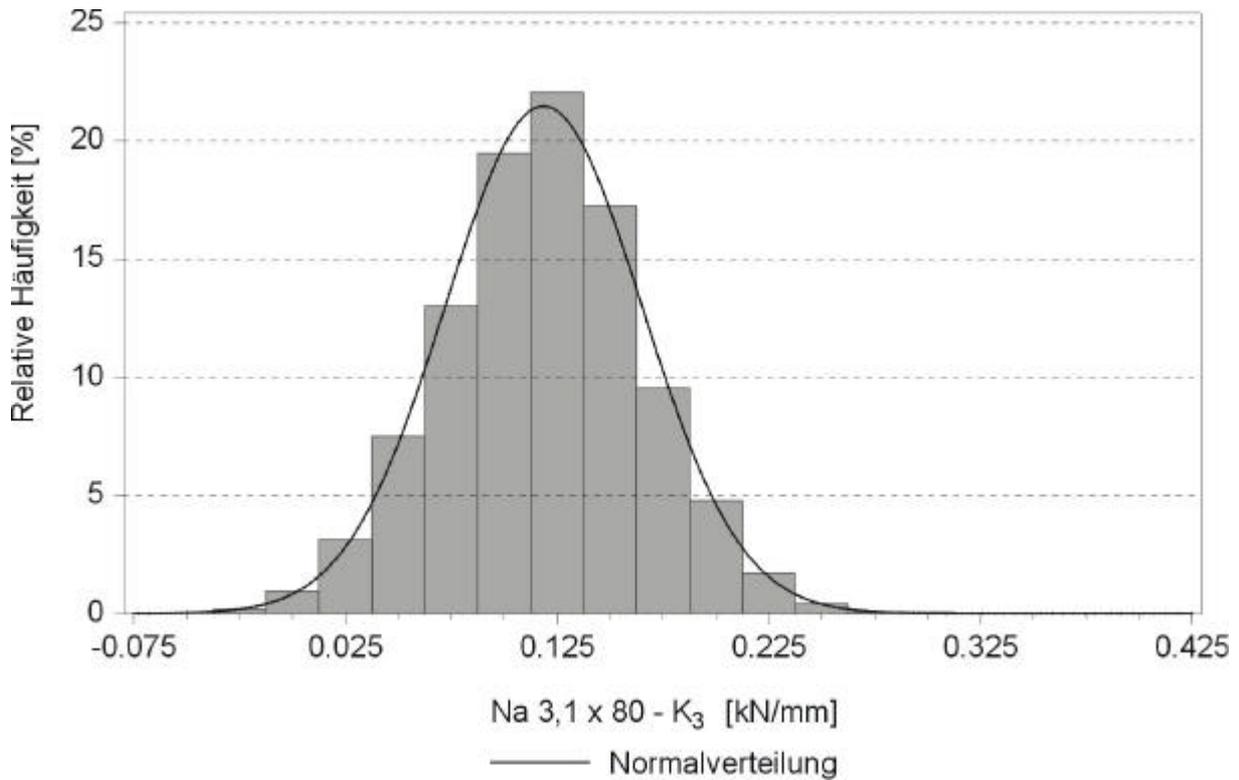


Bild B- 32 Verteilung simulierter Kurvenparameter K_3 [kN/mm] zur Beschreibung einer Last-Verschiebungs-Kurve; zweiseitige, genagelte Holz-Holz-Verbindung, Na 3,1 x 80 mm, 1950 Werte

Normalverteilung:

μ	Mittelwert	= 0,119 kN/mm
σ	Standardabweichung	= 0,0643 kN/mm

(vgl. Gleichung (3- 2))

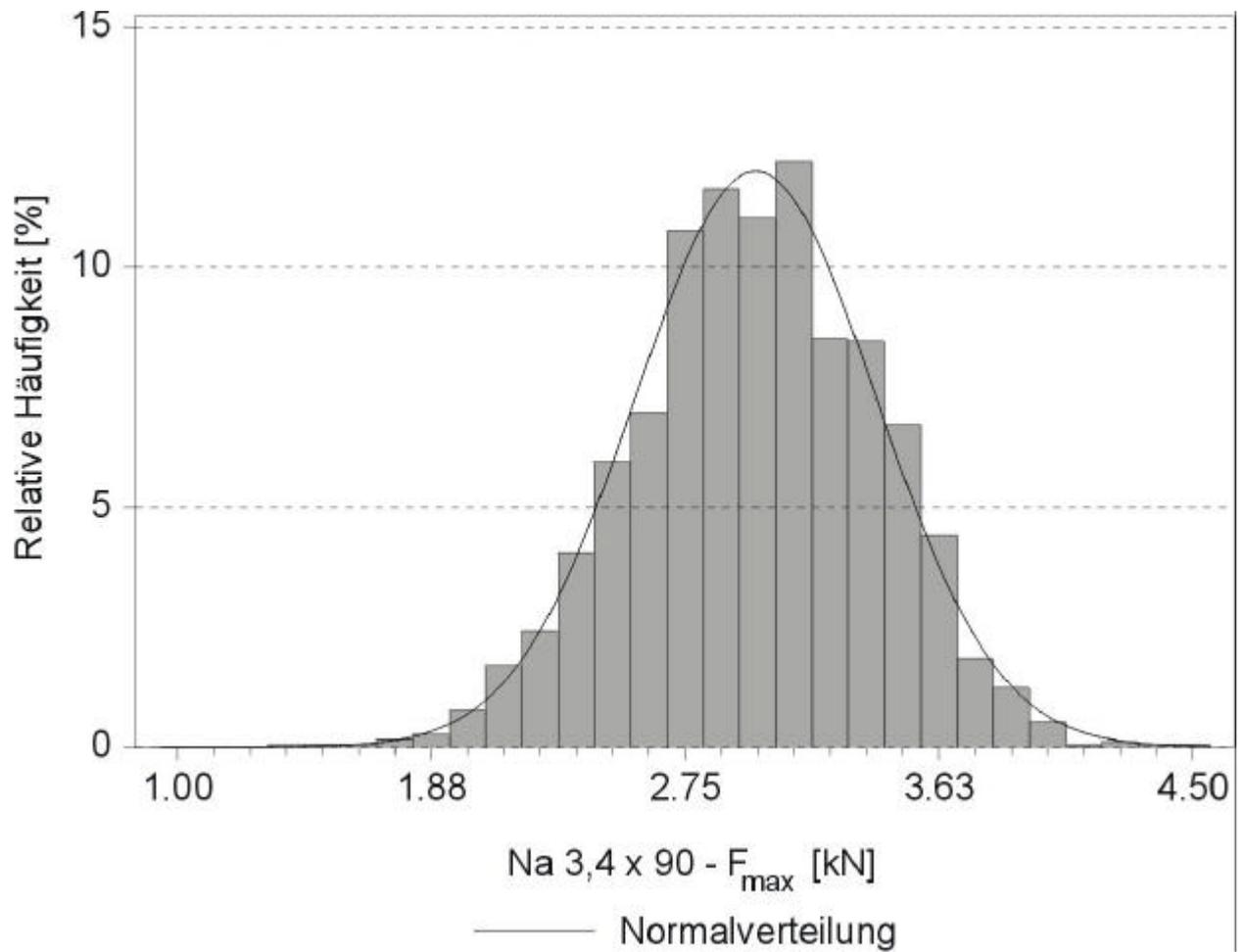


Bild B- 33 Verteilung simulierter Höchstlasten [kN]; zweischnittige, genagelte Holz-Holz-Verbindung, Na 3,4 x 80 mm, 1950 Werte

Normalverteilung:

μ	Mittelwert	= 2,99 kN
σ	Standardabweichung	= 0,429 kN

(vgl. Gleichung (3- 2))

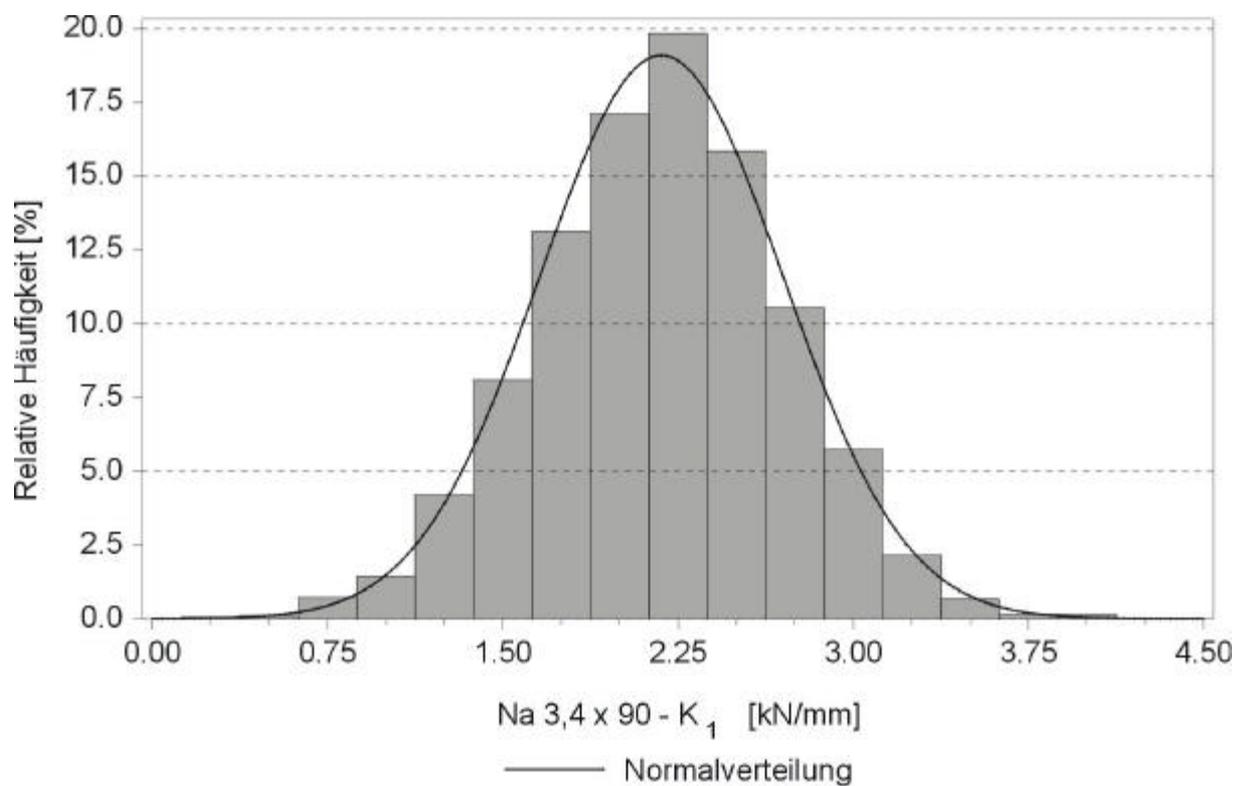


Bild B- 34 Verteilung simulierter Kurvenparameter K_1 [kN/mm] zur Beschreibung einer Last-Verschiebungs-Kurve; zweischichtige, genagelte Holz-Holz-Verbindung, Na 3,4 x 90 mm, 1950 Werte

Normalverteilung:

μ Mittelwert = 2,18 kN/mm

σ Standardabweichung = 0,522 kN/mm

(vgl. Gleichung (3- 2))

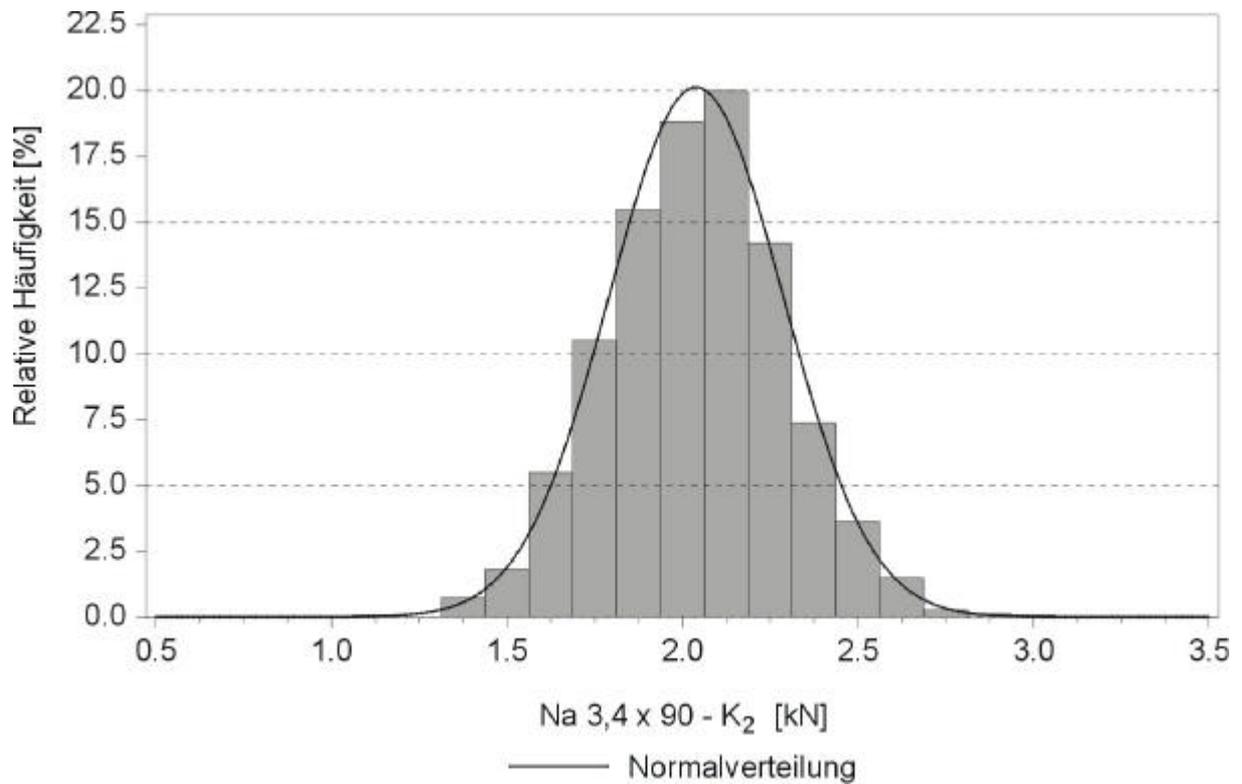


Bild B- 35 Verteilung simulierter Kurvenparameter K_2 [kN] zur Beschreibung einer Last-Verschiebungs-Kurve; zweischnittige, genagelte Holz-Holz-Verbindung, Na 3,4 x 90 mm, 1950 Werte

Normalverteilung:

μ Mittelwert = 2,04 kN
 σ Standardabweichung = 0,254 kN

(vgl. Gleichung (3- 2))

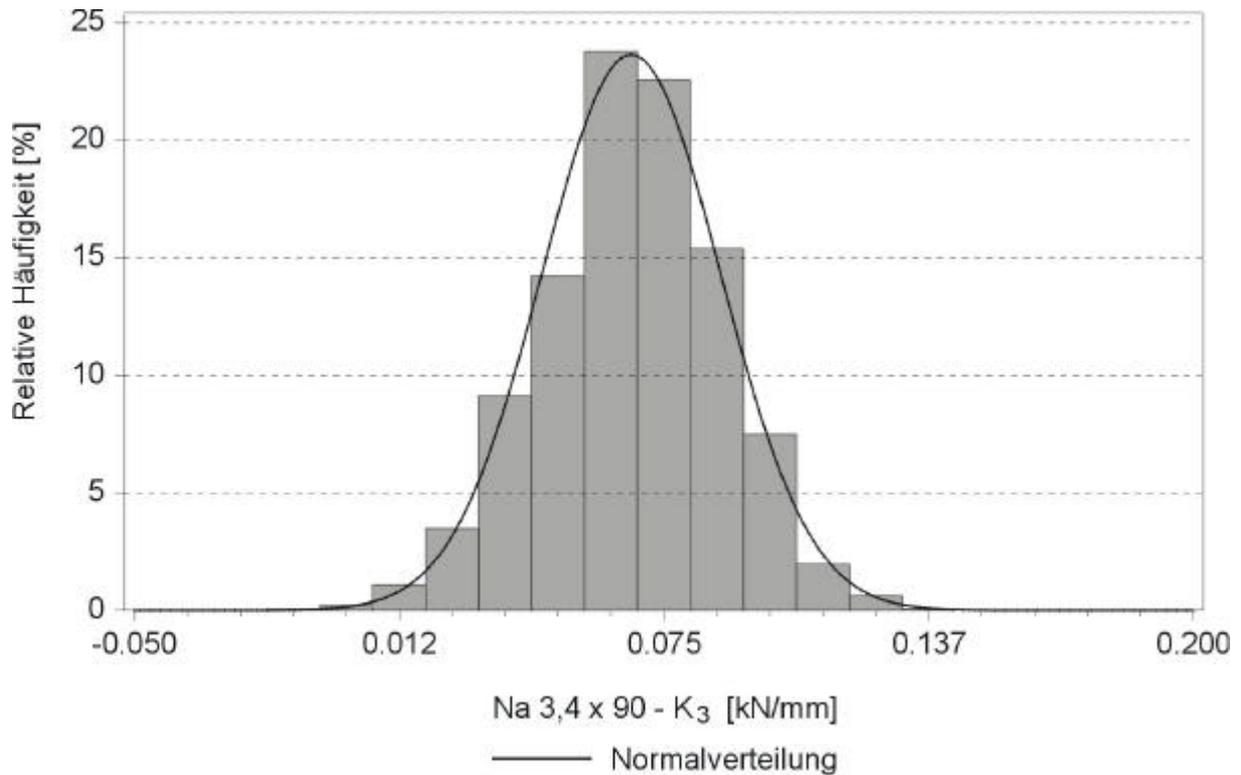


Bild B- 36 Verteilung simulierter Kurvenparameter K_3 [kN/mm] zur Beschreibung einer Last-Verschiebungs-Kurve; zweischnittige, genagelte Holz-Holz-Verbindung, Na 3,4 x 90 mm, 1950 Werte

Normalverteilung:

μ Mittelwert = 0,0669 kN/mm

σ Standardabweichung = 0,0212 kN/mm

(vgl. Gleichung (3- 2))

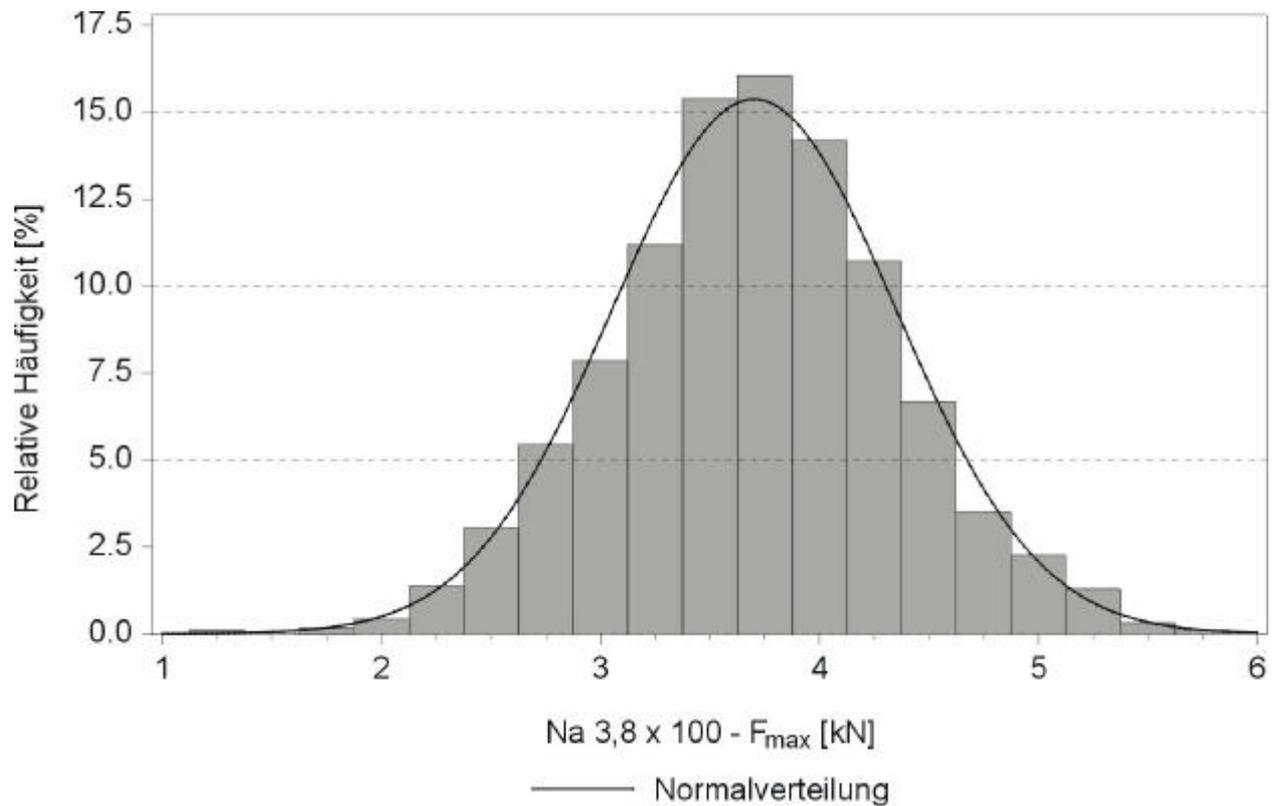


Bild B- 37 Verteilung simulierter Höchstlasten [kN]; zweischrittige, genagelte Holz-Holz-Verbindung, Na 3,8 x 100 mm, 1950 Werte

Normalverteilung:

μ Mittelwert = 3,69 kN
 σ Standardabweichung = 0,665 kN

(vgl. Gleichung (3- 2))

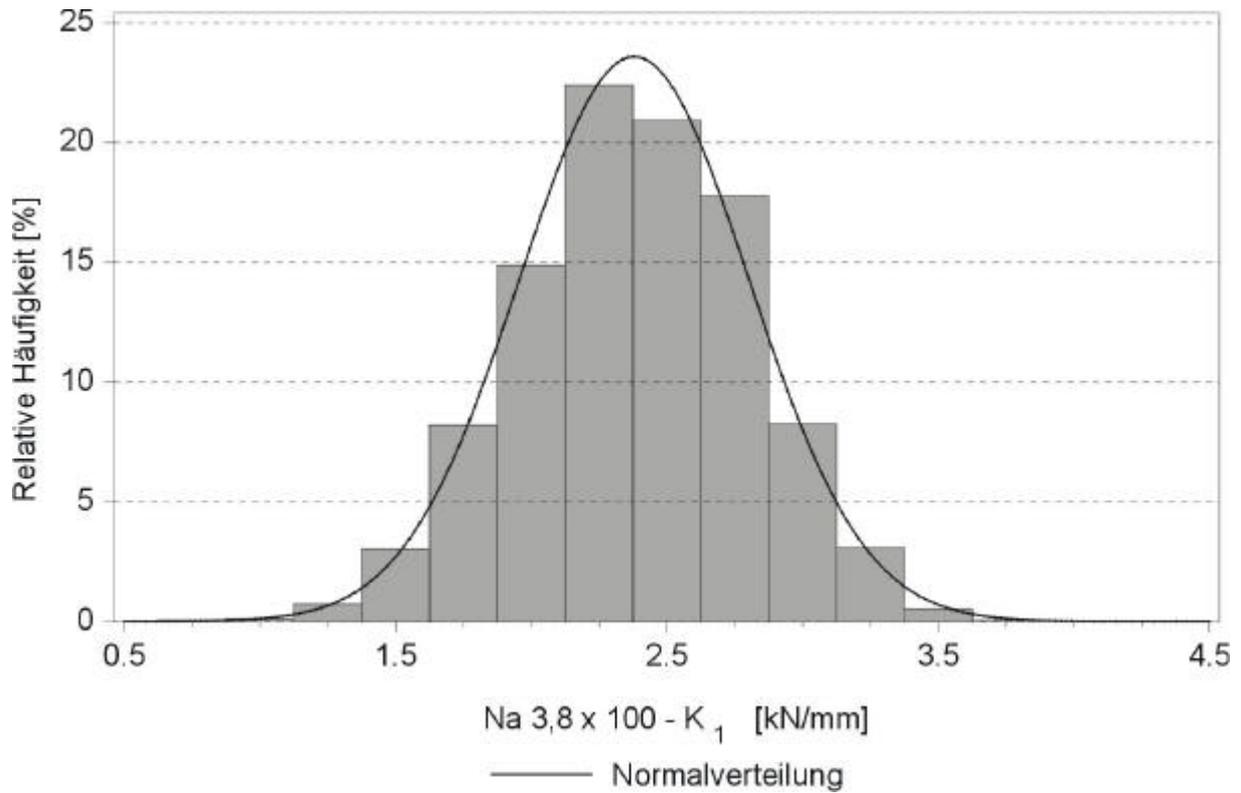


Bild B- 38 Verteilung simulierter Kurvenparameter K_1 [kN/mm] zur Beschreibung einer Last-Verschiebungs-Kurve; zweischnittige, genagelte Holz-Holz-Verbindung, Na 3,8 x 100 mm, 1950 Werte

Normalverteilung:

μ Mittelwert = 2,39 kN/mm

σ Standardabweichung = 0,418 kN/mm

(vgl. Gleichung (3- 2))

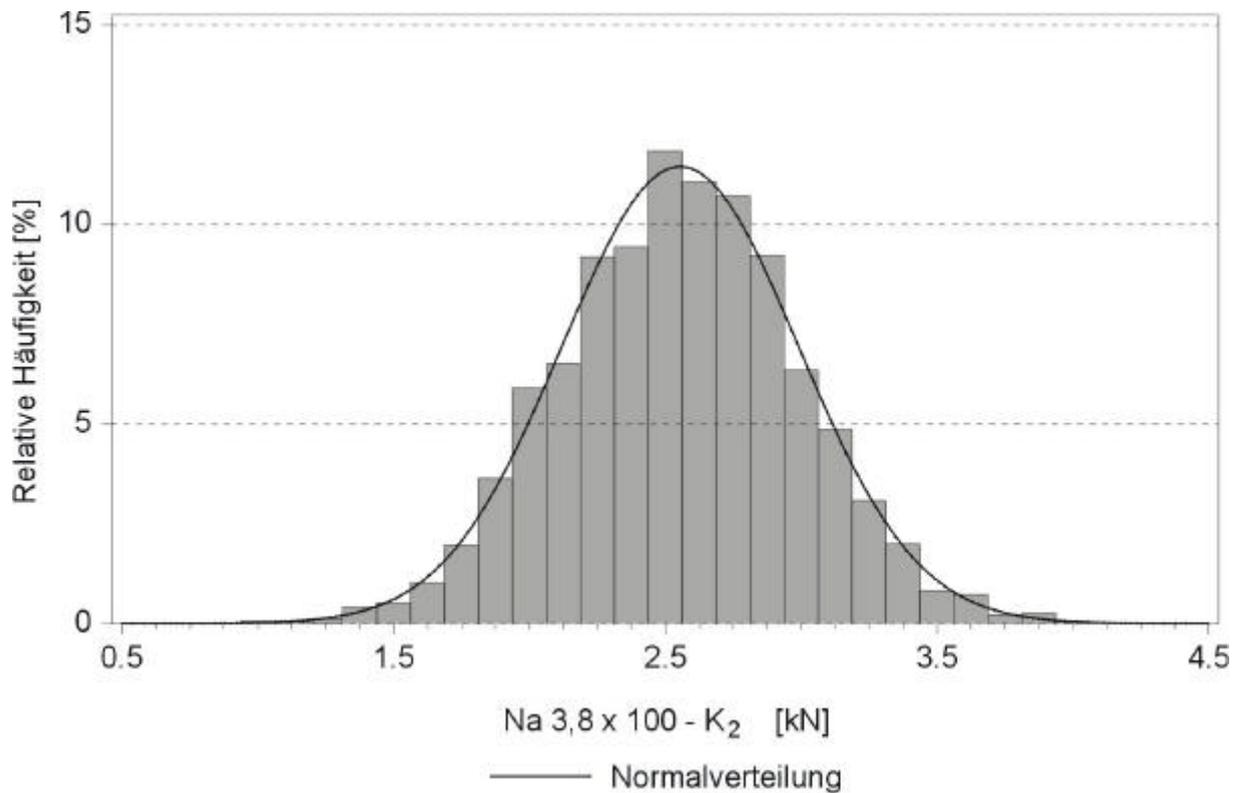


Bild B- 39 Verteilung simulierter Kurvenparameter K₂ [kN] zur Beschreibung einer Last-Verschiebungs-Kurve; zweischnittige, genagelte Holz-Holz-Verbindung, Na 3,8 x 100 mm, 1950 Werte

Normalverteilung:

μ Mittelwert = 2,55 kN
 σ Standardabweichung = 0,446 kN

(vgl. Gleichung (3- 2))

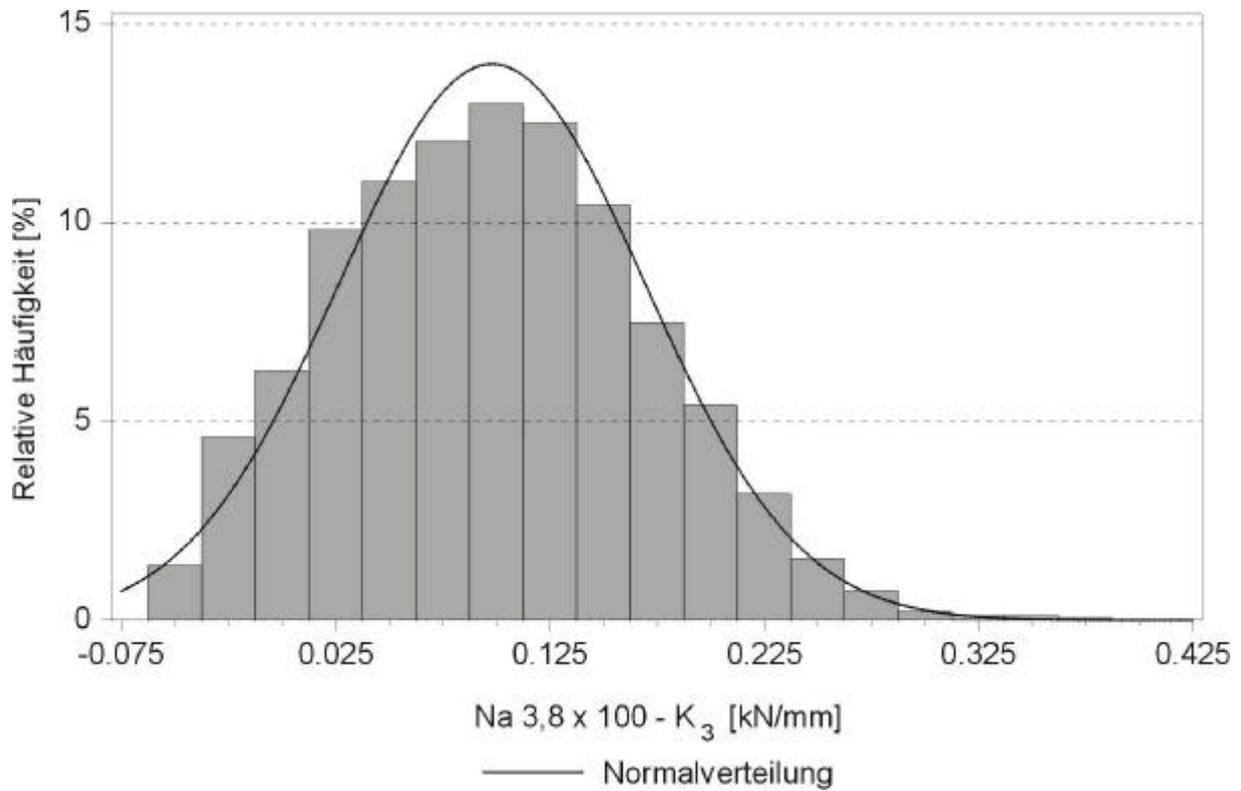


Bild B- 40 Verteilung simulierter Kurvenparameter K_3 [kN/mm] zur Beschreibung einer Last-Verschiebungs-Kurve; zweischnittige, genagelte Holz-Holz-Verbindung, Na 3,8 x 100 mm, 1950 Werte

Normalverteilung:

μ Mittelwert = 0,0904 kN/mm

σ Standardabweichung = 0,0778 kN/mm

(vgl. Gleichung (3- 2))

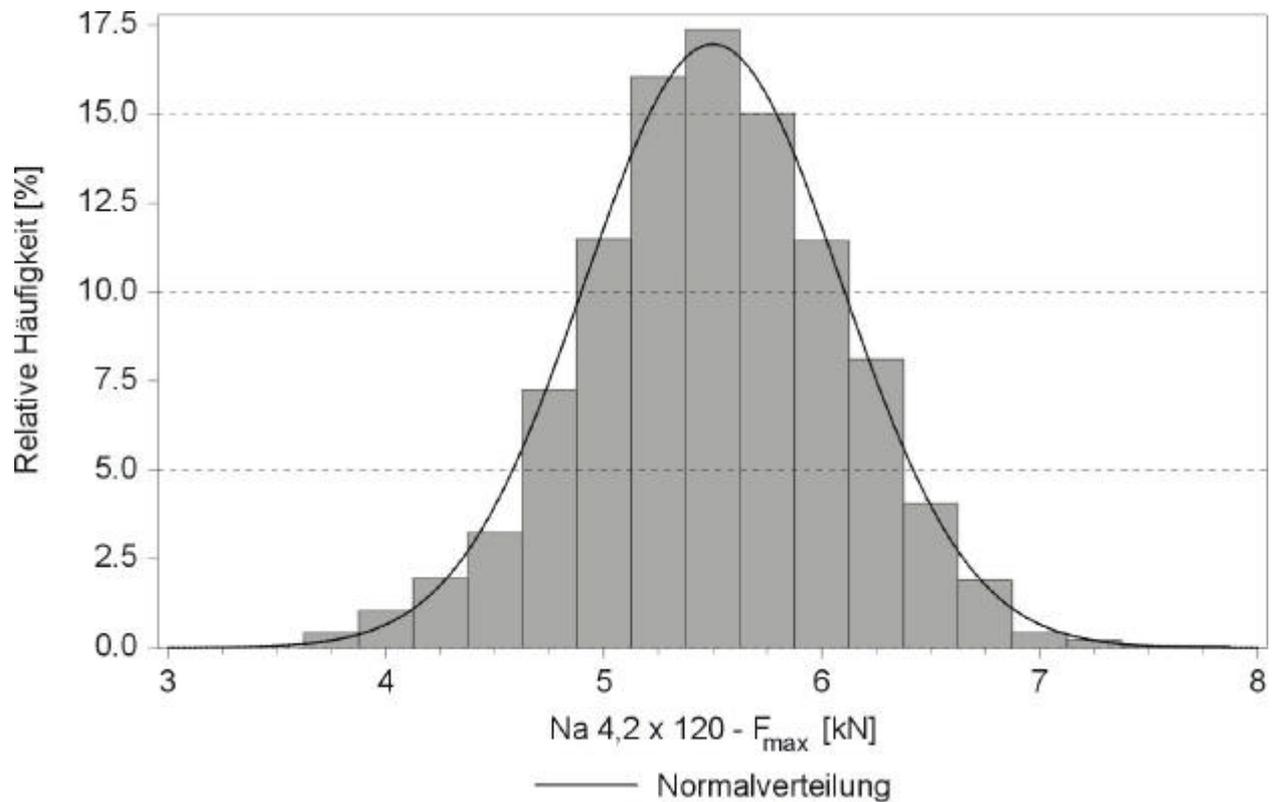


Bild B- 41 Verteilung simulierter Höchstlasten [kN]; zweischnittige, genagelte Holz-Holz-Verbindung, Na 4,2 x 120 mm, 1950 Werte

Normalverteilung:

μ Mittelwert = 5,50 kN
 σ Standardabweichung = 0,598 kN

(vgl. Gleichung (3- 2))

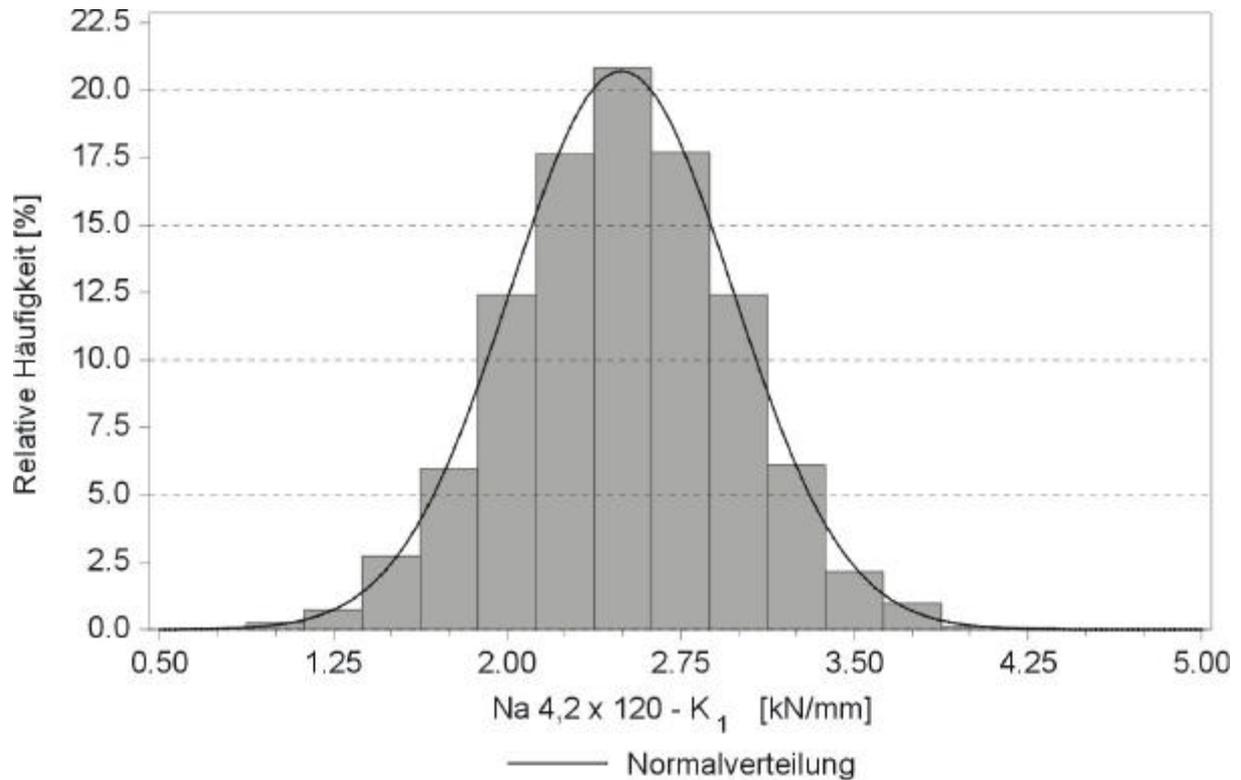


Bild B- 42 Verteilung simulierter Kurvenparameter K_1 [kN/mm] zur Beschreibung einer Last-Verschiebungs-Kurve; zweischnittige, genagelte Holz-Holz-Verbindung, Na 4,2 x 120 mm, 1950 Werte

Normalverteilung:

μ Mittelwert = 2,48 kN/mm

σ Standardabweichung = 0,479 kN/mm

(vgl. Gleichung (3- 2))

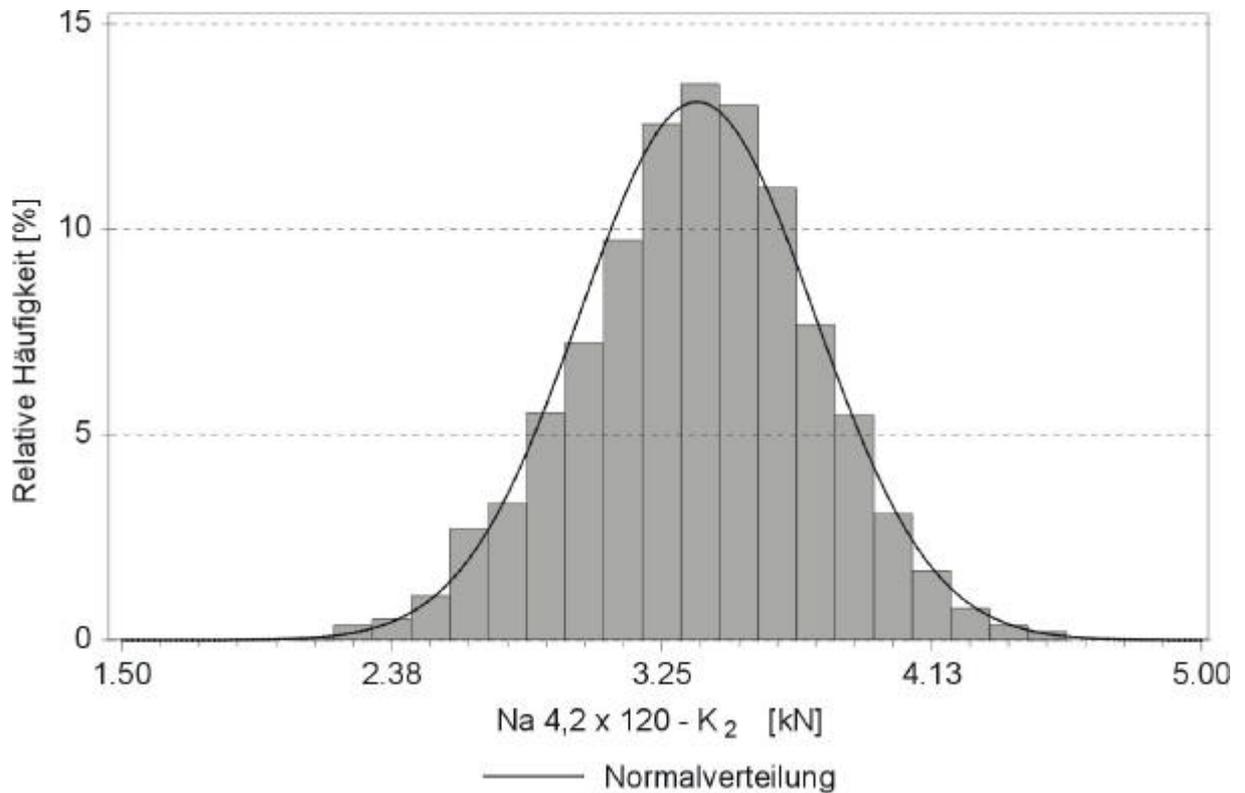


Bild B- 43 Verteilung simulierter Kurvenparameter K_2 [kN] zur Beschreibung einer Last-Verschiebungs-Kurve; zweischnittige, genagelte Holz-Holz-Verbindung, Na 4,2 x 120 mm, 1950 Werte

Normalverteilung:

μ Mittelwert = 3,37 kN
 σ Standardabweichung = 0,378 kN

(vgl. Gleichung (3- 2))

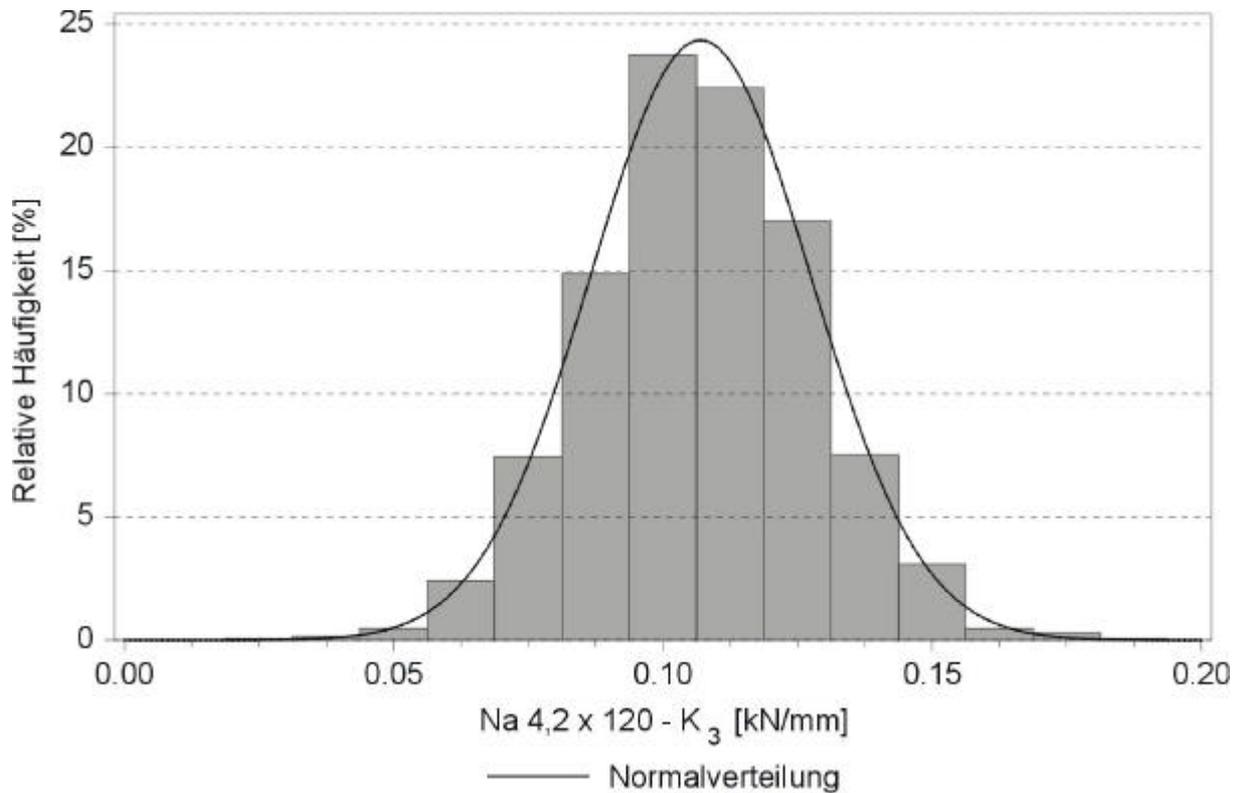


Bild B- 44 Verteilung simulierter Kurvenparameter K_3 [kN/mm] zur Beschreibung einer Last-Verschiebungs-Kurve; zweischnittige, genagelte Holz-Holz-Verbindung, Na 4,2 x 120 mm, 1950 Werte

Normalverteilung:

μ Mittelwert = 0,107 kN/mm

σ Standardabweichung = 0,0204 kN/mm

(vgl. Gleichung (3- 2))

Vergleich der Näherungsgleichungen

Zentrische Einzellasten

Die Näherungsgleichungen zur Berechnung der Biegerandspannungen der Lamellen und der Nagelbeanspruchungen auf Abscheren fußen auf Gleichungen der technischen Biegelehre. Die Einflussparameter auf die zu berechnenden Beanspruchungen werden mittels wirksamer Querschnittswerte berücksichtigt (vgl. Abschnitt 4.4). Wie in Abschnitt 3.4.2 dargestellt, werden Einzellasten auf eine Aufstandsfläche von 5 / 5 cm bezogen, d.h. sie wirken i.d.R. auf zwei Lamellen ein. In den folgenden Bildern werden die Ergebnisse der Näherungsgleichungen (Kapitel 5) mit den Ergebnissen der Gleichungen nach der technischen Biegelehre, bei denen die Querschnittswerte über zwei Lamellen berechnet werden, verglichen. Die maximale Biegerandspannung eines Einfeldträgers mit der Breite von zwei Lamellen unter zentrischer Einzellast berechnet sich nach Gleichung (C- 1).

$$\sigma_B = \frac{M}{W} = \frac{F \cdot \ell}{\frac{4}{2 \cdot t \cdot h^2} \cdot \frac{1}{6}} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (\text{C- 1})$$

Hierin bedeuten:

F	zentrische Einzellast [N]
ℓ	Stützweite des Trägers [mm]
t / h	Breite / Höhe der Lamellen [mm]

Die elastische Verformung eines Einfeldträgers mit der Breite von zwei Lamellen unter zentrischer Einzellast berechnet sich nach Gleichung (C- 2).

$$v = \frac{F \cdot \ell^3}{48 \cdot E \cdot \frac{2 \cdot t \cdot h^3}{12}} \text{ [mm]} \quad (\text{C- 2})$$

Hierin bedeuten:

F	zentrische Einzellast [F]
ℓ	Stützweite des Trägers [mm]
t / h	Breite / Höhe der Lamellen [mm]
E	Elastizitätsmodul des Trägers [N/mm ²]

Infolge der kontinuierlichen Vernagelung der Lamellen in Brettstapelelementen beteiligen sich mehrere Lamellen an der Lastabtragung. Bezogen auf einen Biegeträger mit der Breite von zwei Lamellen stellen sich in einem Brettstapelelement unter zentrischer Einzellast infolge der Lastausbreitung geringere Biegegrandspannungen und Verformungen ein. Die Bilder C- 1 bis C- 5 stellen eine bezogene Verringerung der Beanspruchungen der Brettstapelelemente infolge der Lastausbreitung von Einzellasten unter Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse und der Nageldichte dar. Als Lamellendicke wurde ein konstanter Wert von 30 mm angenommen.

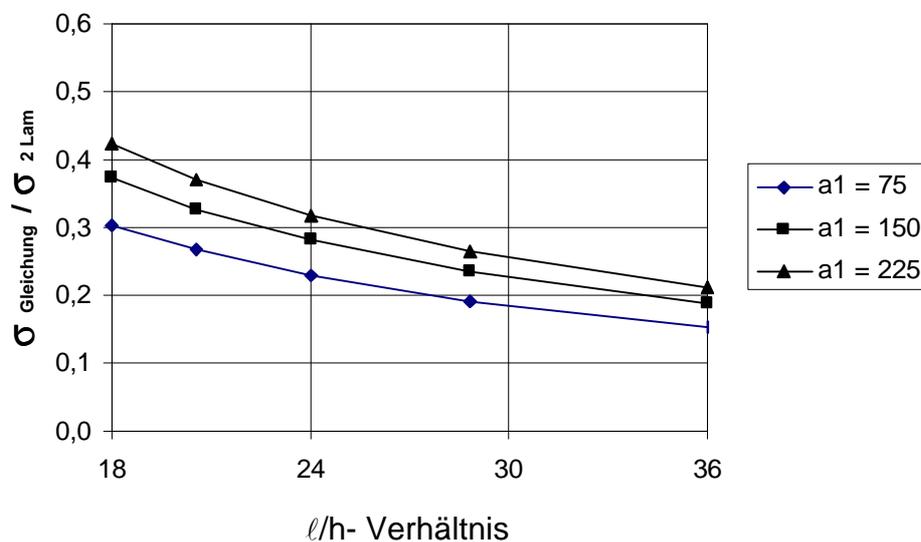


Bild C- 1 Vergleich der maximalen Biegegrandspannungen ermittelt mit dem wirksamen Widerstandsmoment \hat{W} aus Tabelle 5- 1 und Gleichung (C- 1), ungestoßene Lamellen

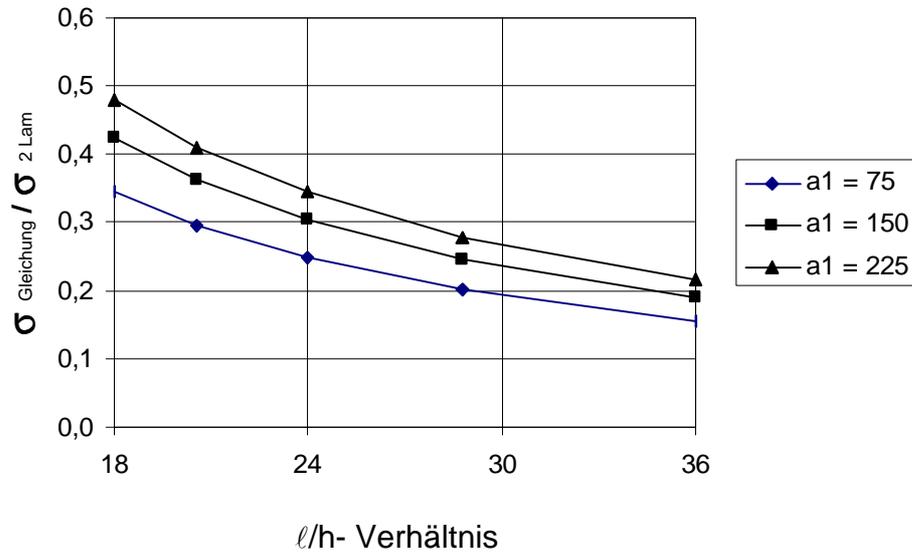


Bild C- 2 Vergleich der maximalen Biegerandspannungen ermittelt mit dem wirksamen Widerstandsmoment \hat{W} aus Tabelle 5- 1 und Gleichung (C- 1), wechselseitig gestoßene Lamellen

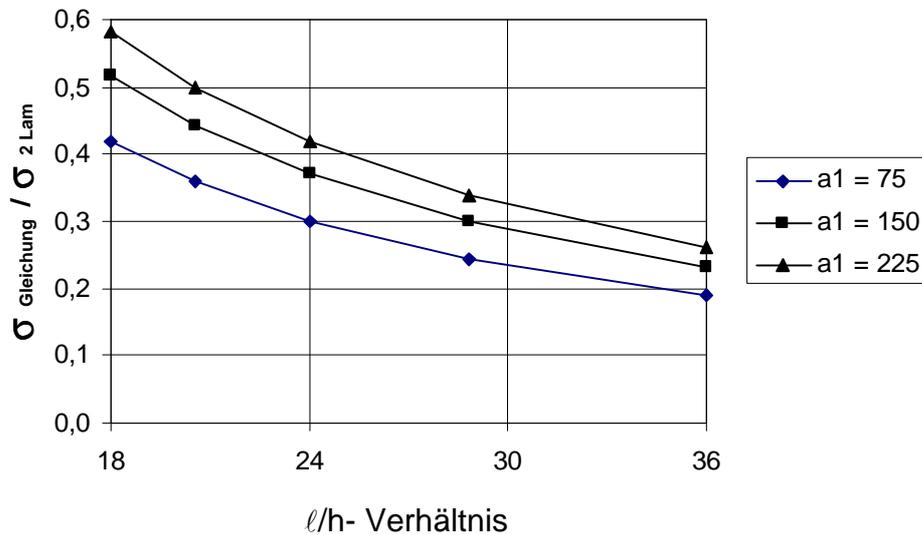


Bild C- 3 Vergleich der maximalen Biegerandspannungen ermittelt mit dem wirksamen Widerstandsmoment \hat{W} aus Tabelle 5- 1 und Gleichung (C- 1), wandernd/zufällig gestoßene Lamellen

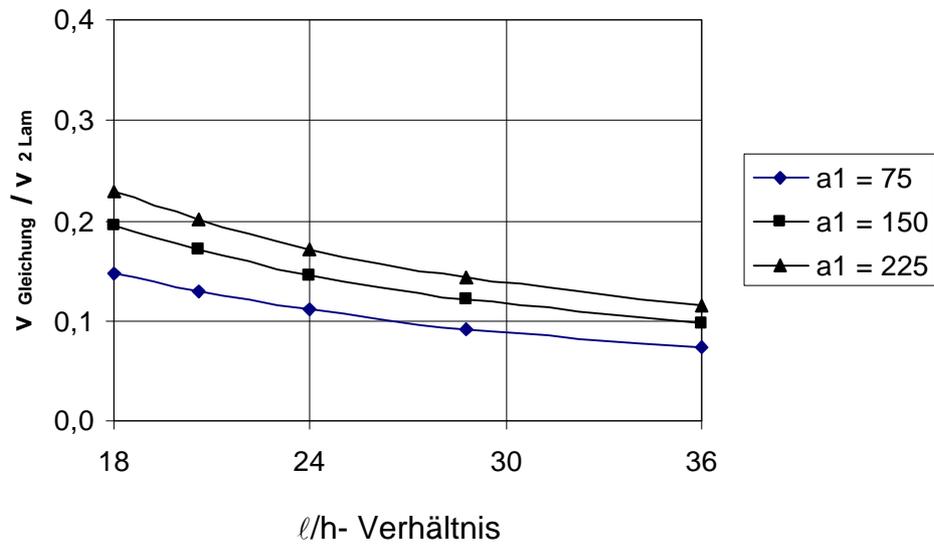


Bild C- 4 Vergleich der elastischen Verformung v ermittelt mit dem wirksamen Flächenmoment 2. Grades \hat{I} aus Tabelle 5-2 und Gleichung (C- 2), ungestoßene Lamellen

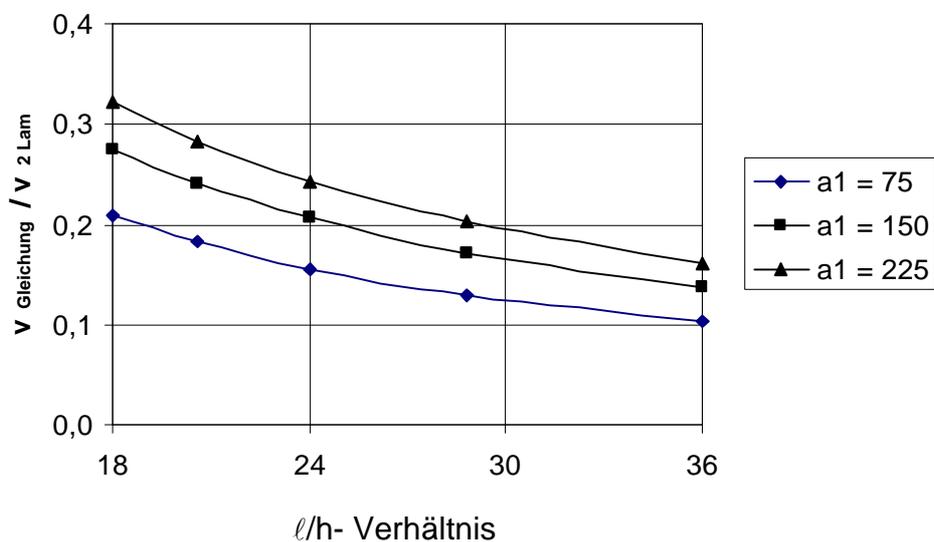


Bild C- 5 Vergleich der elastischen Verformung v ermittelt mit dem wirksamen Flächenmoment 2. Grades \hat{I} aus Tabelle 5-2 und Gleichung (C- 2), wechselseitig/wandernd/zufällig gestoßene Lamellen

Gleichförmige Flächenlasten

Die Näherungsgleichungen zur Bestimmung der Biegerandspannungen der Lamellen, der Nagelbeanspruchungen auf Abscheren und der elastischen Verformung der Brettstapelelemente unter gleichförmiger Flächenlast wurden unter der Annahme einer Einheitsbreite der Brettstapelelemente von 1,0 m abgeleitet (vgl. Abschnitt 4.4). Brettstapelelemente mit ungestoßenen Lamellen können wie ein Einfeldträger mit einer Breite von 1,0 m berechnet werden.

$$\sigma_B = \frac{M}{W} = \frac{q \cdot \ell^2}{\frac{8}{1000 \text{ mm} \cdot h^2} \cdot \frac{6}{6}} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (\text{C- 3})$$

Hierin bedeuten:

q gleichförmige Streckenlast [N/mm]

ℓ Stützweite des Trägers [mm]

h Höhe des Trägers [mm]

Die elastische Verformung von Brettstapelelementen mit ungestoßenen Lamellen kann mit Gleichung (C- 4) berechnet werden.

$$v = \frac{5 \cdot q \cdot \ell^4}{384 \cdot E \cdot \frac{1000 \text{ mm} \cdot h^3}{12}} \quad (\text{C- 4})$$

Hierin bedeuten:

q gleichförmige Flächen- oder Streckenlast [N/mm]

ℓ Stützweite des Trägers [mm]

h Höhe des Trägers [mm]

E mittlerer Elastizitätsmodul der Brettstapelelemente = 12600 N/mm²

Brettstapelelemente mit gestoßenen Lamellen zeigen deutlich größere Verformungen und Biegerandspannungen der Lamellen als entsprechende Brettstapelelemente mit ungestoßenen Lamellen. Die folgenden Bilder (Flächenlasten) zeigen im Gegensatz zu den vorhergehenden Bildern (Einzellasten) eine bezogene Erhöhung der Beanspruchungen.

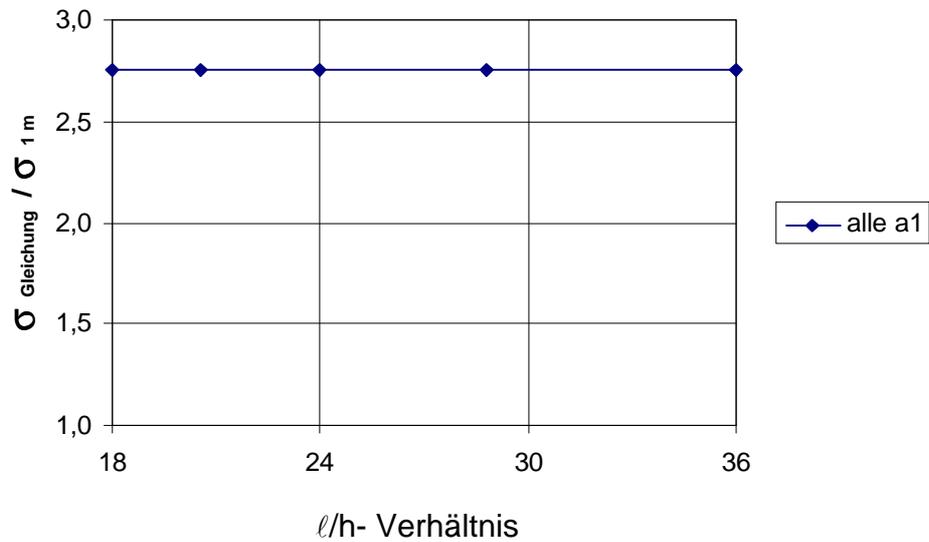


Bild C- 6 Vergleich der maximalen Biege­randspannungen ermittelt mit dem wirksamen Widerstandsmoment \hat{W} aus Tabelle 5- 5 und Gleichung (C- 3), wechselseitig gestoßene Lamellen

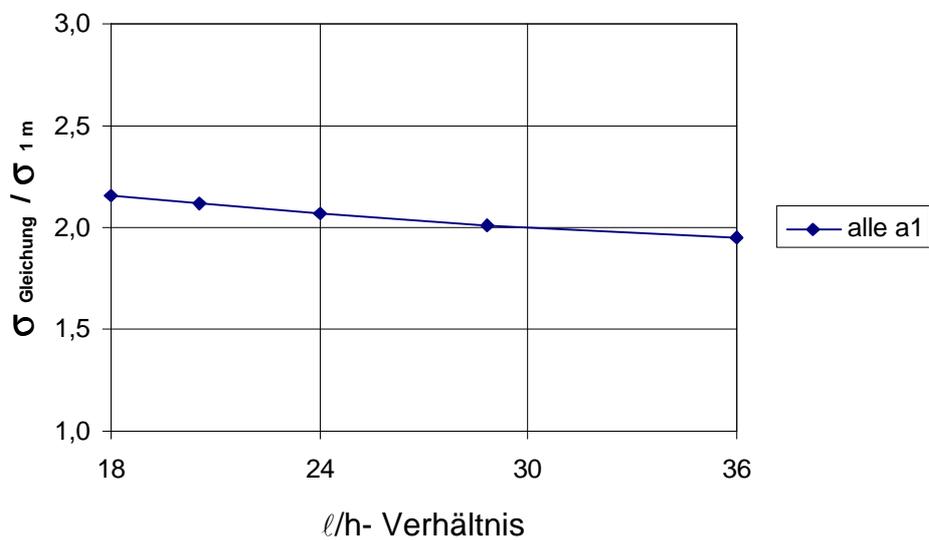


Bild C- 7 Vergleich der maximalen Biege­randspannungen ermittelt mit dem wirksamen Widerstandsmoment \hat{W} aus Tabelle 5- 5 und Gleichung (C- 3), wandernd gestoßene Lamellen

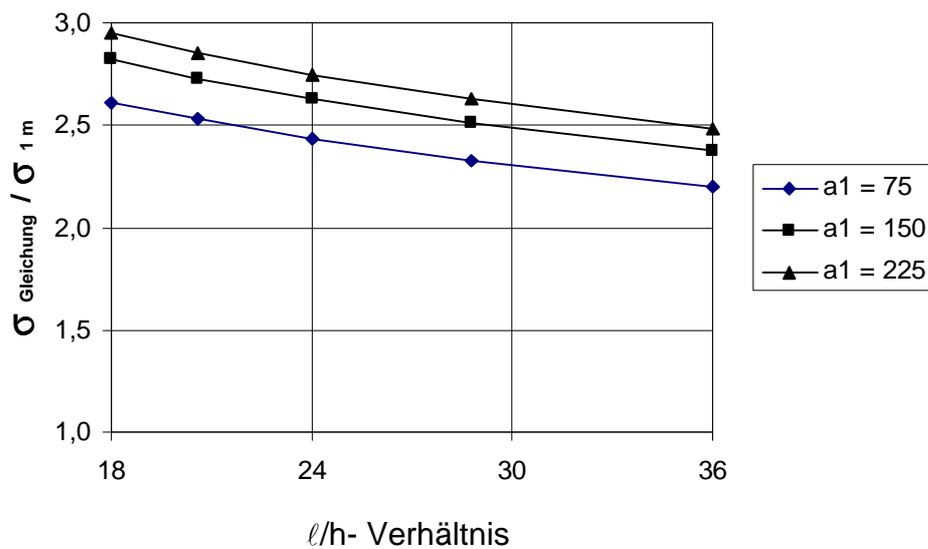


Bild C- 8 Vergleich der maximalen Biegeendspannungen ermittelt mit dem wirksamen Widerstandsmoment \hat{W} aus Tabelle 5- 5 und Gleichung (C- 3), zufällig gestoßene Lamellen

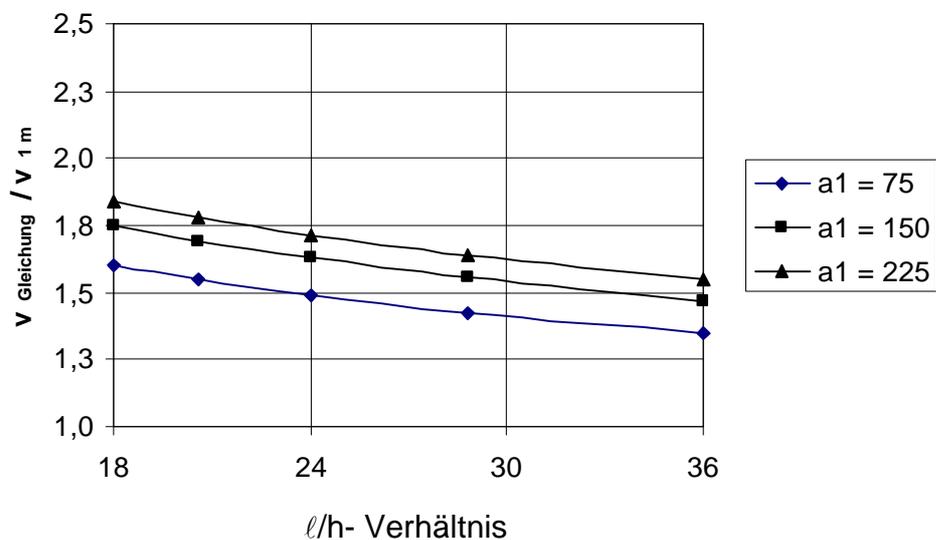


Bild C- 9 Vergleich der elastischen Verformung ermittelt mit dem wirksamen Flächenmoment 2. Grades \hat{I} aus Tabelle 5- 6 und Gleichung (C- 4), wechselseitig gestoßene Lamellen

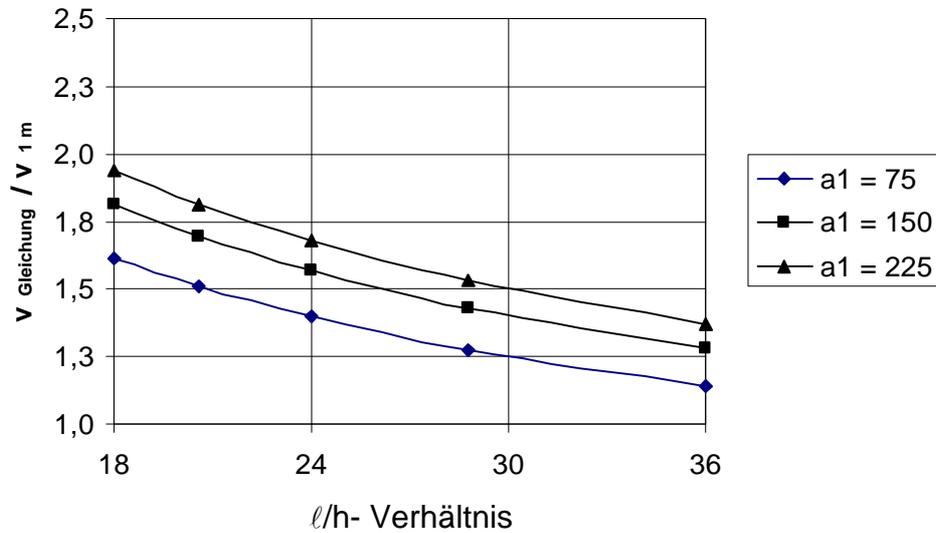


Bild C- 10 Vergleich der elastischen Verformung ermittelt mit dem wirksamen Flächenmoment 2. Grades \hat{I} aus Tabelle 5- 6 und Gleichung (C- 4), wandernd gestoßene Lamellen

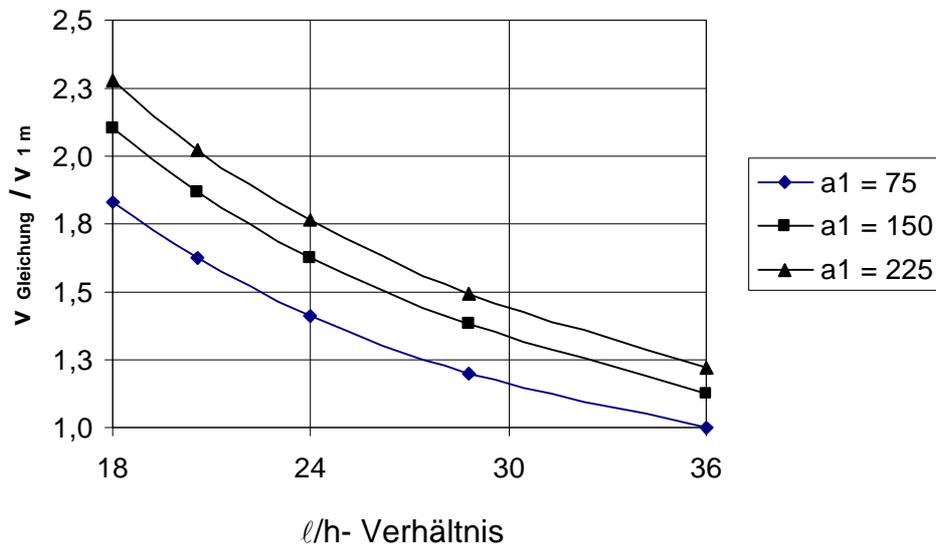


Bild C- 11 Vergleich der elastischen Verformung ermittelt mit dem wirksamen Flächenmoment 2. Grades \hat{I} aus Tabelle 5- 6 und Gleichung (C- 4), zufällig gestoßene Lamellen



Bild D- 1 Prüfkörper in der Holz-Prüfhalle, teilweise mit überstehenden PE-Folien (zwei pro Scherfuge)

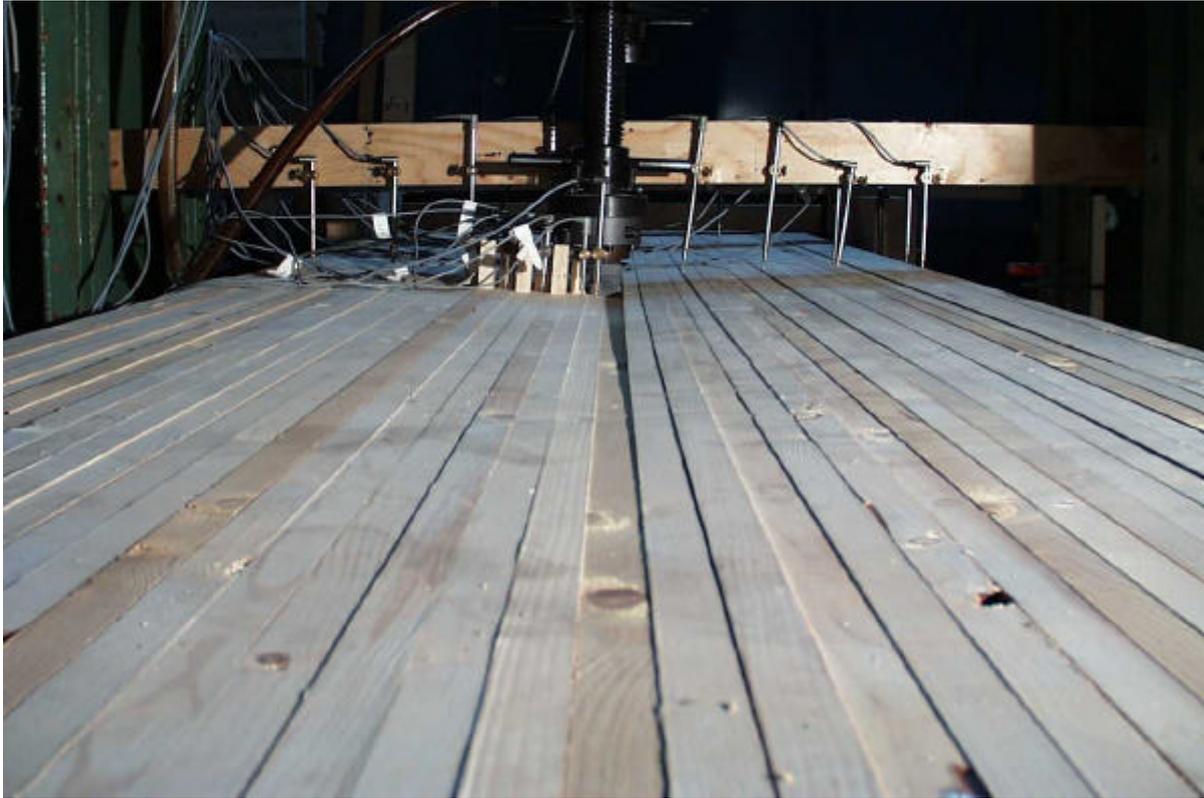


Bild D- 2 Prüfkörper unter Belastung, ungestoßene Lamellen - zentrische Einzellast; neun Wegaufnehmer im Bereich der Lasteinleitung quer zur Spannrichtung



Bild D- 3 Verformter Prüfkörper, ungestoßene Lamellen - zentrische Einzellast



Bild D- 4 Wegaufnehmer im Bereich der Lasteinleitung zum Messen der Relativverschiebungen der Lamellen; Lasteinleitung durch Vierkantstahl



Bild D- 5 Detail Stoßausführung, jeweils 3,0 cm in Längsrichtung



Bild D- 6 Zufällig verteilte Stöße im Brettstapelelement



Bild D- 7 Versagen einer Lamelle durch das Erreichen der Biegefestigkeit, rechts unten eine Druckfalte in der Lamelle

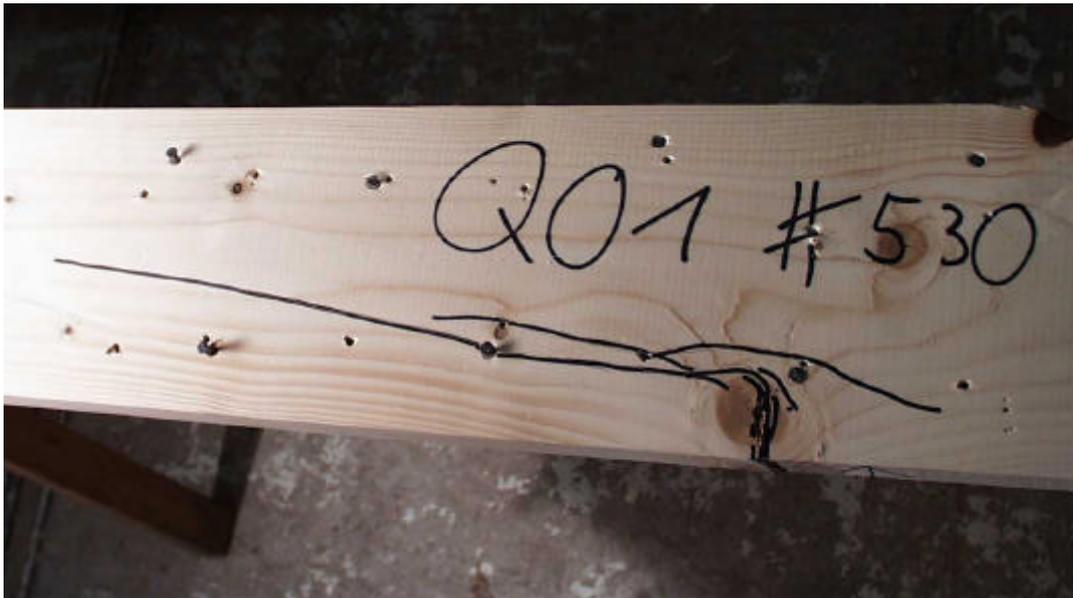


Bild D- 8 Biegeversagen einer Lamelle infolge eines Astes im Biegezugbereich



Bild D- 9 Biegeversagen einer Lamelle infolge eines Astes im Biegezugbereich



Bild D- 10 Aufspalten von Lamellen eines Prüfkörpers entlang der unteren Nagelreihe



Bild D- 11 Kombiniertes Versagen eines Prüfkörpers (Erreichen der Biegefestigkeit und gegenseitiges Abscheren der Lamellen)



Bild D- 12 Gegenseitig abgescherte Lamellen infolge Erreichen der Nageltragfähigkeit



Bild D- 13 Untersicht eines Prüfkörpers mit wechselseitig gestoßenen Lamellen, Versagen durch Erreichen der Nageltragfähigkeit (gegenseitiges Abscheren der Lamellen)



Bild D- 14 Untersicht eines Prüfkörpers mit wandernd gestoßenen Lamellen, Versagen durch Erreichen der Nageltragfähigkeit (lokales Durchstanzen der Lamellen)



Bild D- 15 Untersicht eines Prüfkörpers mit wechselseitig gestoßenen Lamellen, lokales Durchstanzen der Lamellen



Bild D- 16 Untersicht eines Prüfkörpers mit wechselseitig gestoßenen Lamellen, lokales Durchstanzen der Lamellen



Bild D- 17 Geöffneter Prüfkörper, gegenseitig abgescherte Lamellen



Bild D- 18 Deformierte Nägel, Detailaufnahme

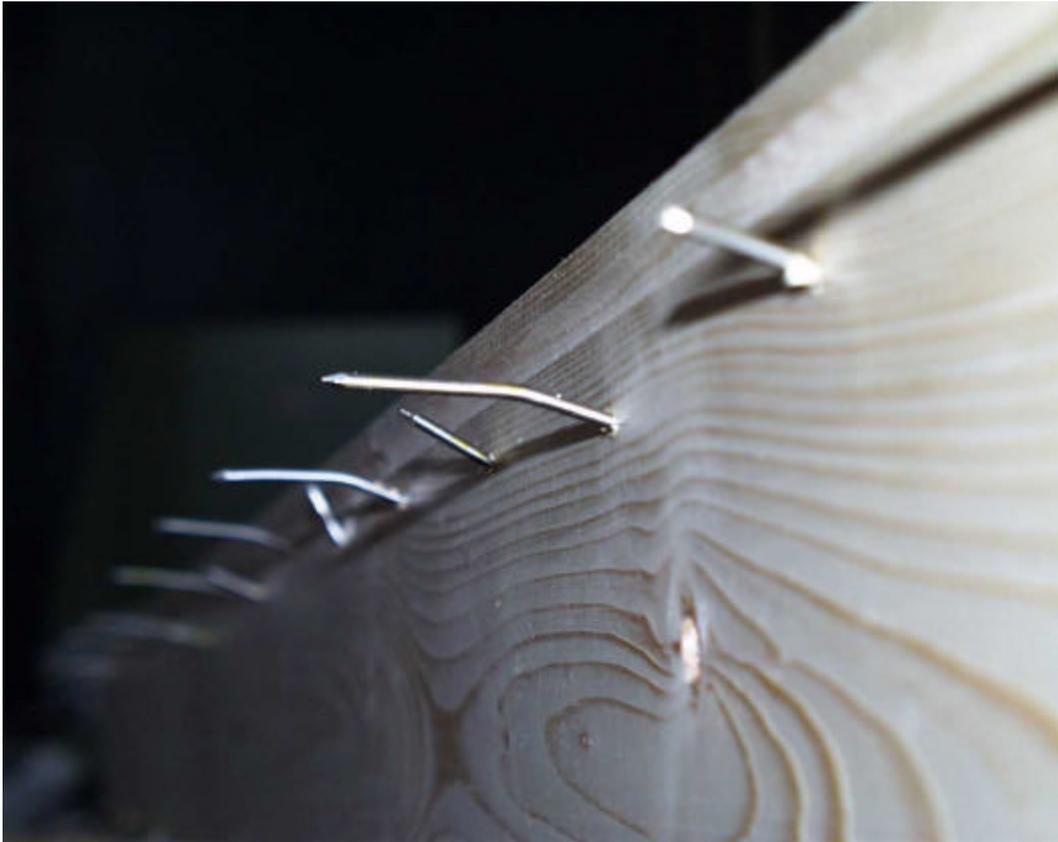


Bild D- 19 Geöffneter Prüfkörper, Nägel im Zick-Zack-Muster, obere Nagelreihe



Bild D- 20 Geöffneter Prüfkörper, Nägel im Zick-Zack-Muster, zwei Nagelreihen

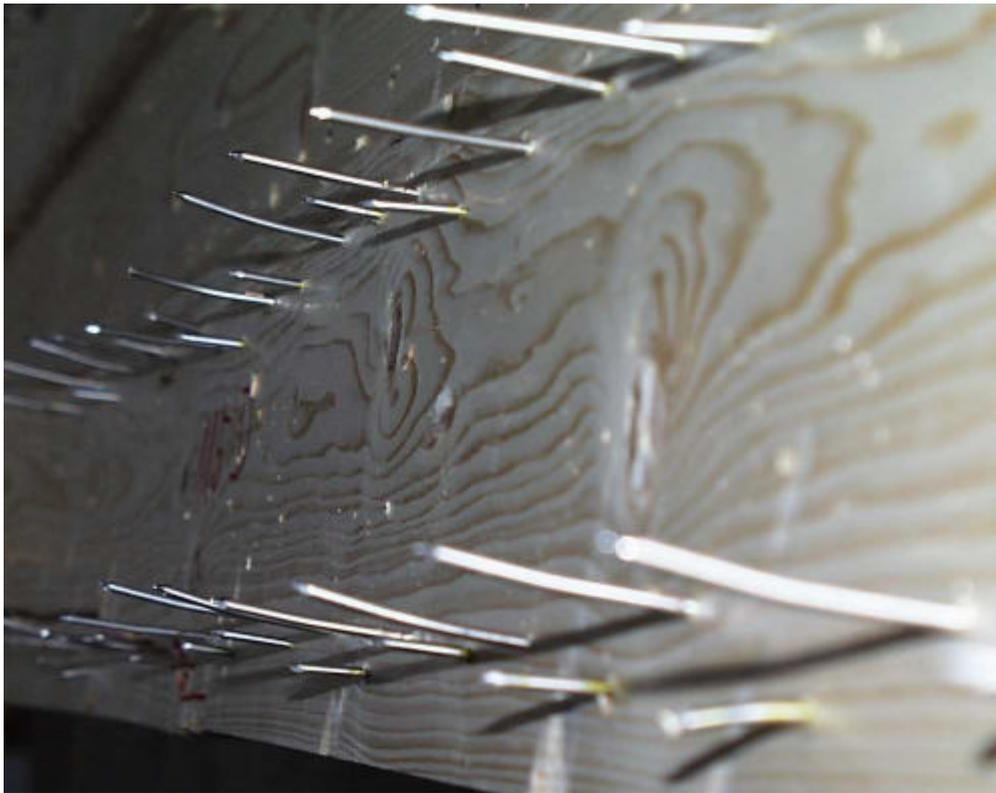


Bild D- 21 Geöffneter Prüfkörper, Nägel im Zick-Zack-Muster, zwei Nagelreihen



Bild D- 22 Detailaufnahme: Erreichen der Lochleibungsfestigkeit einer Lamelle

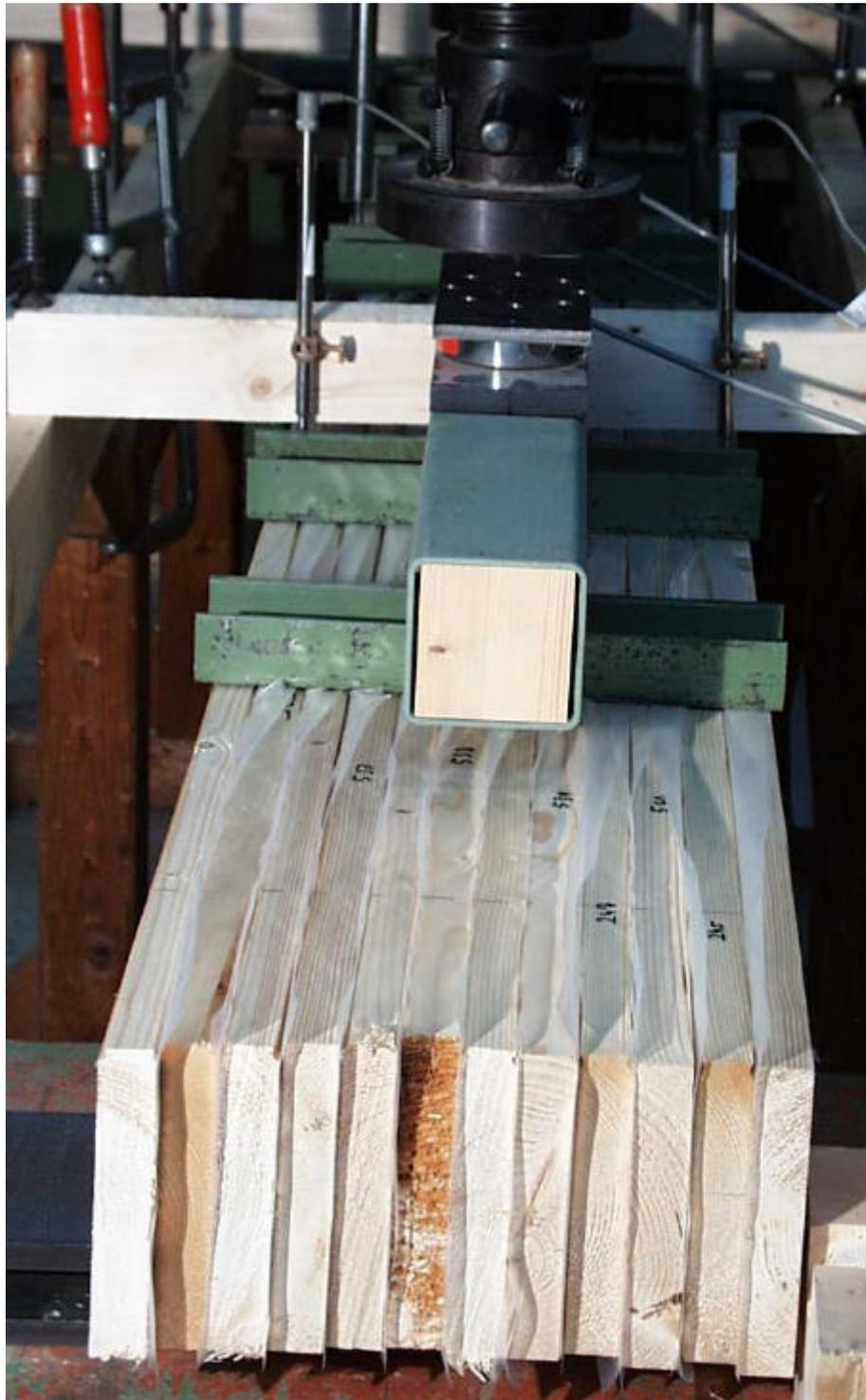


Bild D- 23 Vorderansicht eines eingebauten Prüfkörpers unter simulierter Flächenlast



Bild D- 24 Einbau der acht Quertraversen zur Simulation einer Flächenlast

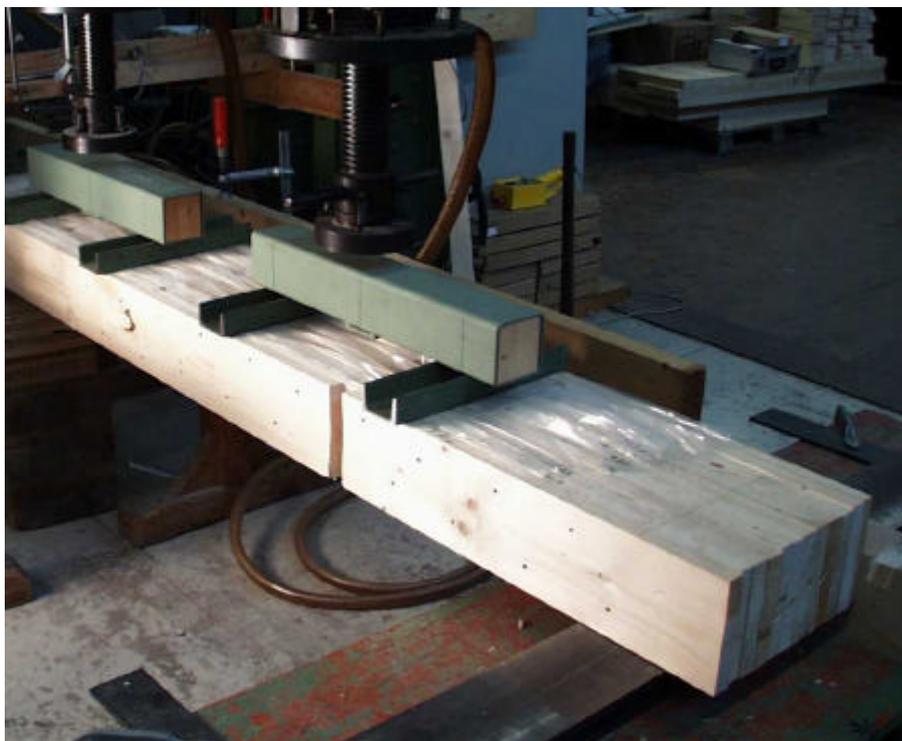


Bild D- 25 Lasteinleitung in Quertraversen über vier gleichgeschaltete Einzelprüfzylinder und zugehörigen Lastverteilern in Längsrichtung

Lebenslauf

03.02.1963	Geboren in Tettngang/Bodensee
1969 – 1978	Volksschule Oberkirch
1978 – 1981	Lehre als Zimmerer
22.08.1981	Gesellenprüfung
1981 – 1985	Gesellenzeit als Zimmerer
1985 – 1987	Akademie für handwerkliche Berufe, Freiburg im Breisgau
26.06.1987	Meisterprüfung im Zimmererhandwerk, Abschluss als Zimmermeister und „Staatlich geprüfter Technischer Fachwirt“
1987 – 1989	Technische Oberschule, Freiburg im Breisgau
30.05.1989	Reifeprüfung
1989 – 1996	Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Karlsruhe
28.03.1996	Diplomhauptprüfung
Seit 09.04.1996	Wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe