

Klassifizierung von Brettschichtholzbalken mit Hilfe der Parameteridentifikation

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
im Fachbereich Bauingenieurwesen
der Universität Gesamthochschule Kassel

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Michael Siemers
aus Breitenfelde

Kassel 1998

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Michael Siemers

Klassifizierung von Brettschichtholzbalken mit Hilfe der Parameteridentifikation

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsschutzgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

ISBN 3- 933146-15-1

© Kassel University Press GmbH, 1998

Referent:
Korreferent:

Prof. Dr.-Ing. M. Link
Prof. Dr.-Ing. F. Thiele

Tag der Einreichung:
Tag der mündlichen Prüfung:

22. Juni 1998
06. August 1998

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Mechanik/Holzbau des Fachbereichs Bauingenieurwesen der Universität Gesamthochschule Kassel.

An dieser Stelle danke ich herzlich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Link, der aufgrund seiner langjährigen Erfahrung auf dem Gebiet der Strukturmechanik und der Systemidentifikation sowie seiner Bereitschaft zu kritischen Diskussionen einen entscheidenden Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet hat.

Herrn Professor Dr.-Ing. Frieder Thiele danke ich für seine hilfreichen Anregungen und die Übernahme der Korreferates.

Ganz besonders bedanke ich mich auch bei dem Leiter des Fachgebietes Mechanik/Holzbau Herrn Prof. Dipl.-Ing. Reinhold Höhmann, der mir durch sein großes Engagement insbesondere in der Lehre die nötigen Freiräume für meine Arbeit eingeräumt hat.

Weiterhin gilt mein Dank allen Kollegen, Freunden und meiner Familie, die mir mit fachlichen Diskussionen und mit der kritischen Durchsicht des Manuskriptes hilfreich zur Seite standen.

Kassel, im September 1998

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen.....	III
1 Einleitung.....	1
2 Aufbau und Herstellung von Brettschichtholz (BSH)	3
2.1 Gütesortierung von Brettschichtholzlamellen.....	5
3 Mechanische Eigenschaften des Brettschichtholzes	9
3.1 Verformungsverhalten des Holzes	10
3.1.1 Elastizitätsmodul.....	13
3.2 Festigkeit des Holzes	15
3.3 Einfluß der Laminierung	20
3.4 Einfluß der Keilzinkungen	20
4 Voruntersuchungen an Brettlamellen.....	23
4.1 Prüfkörper	23
4.2 Versuchsdurchführung	26
4.2.1 Biegeversuche	26
4.2.2 Zugversuche	26
4.3 Versuchsauswertung	27
4.4 Versuchsergebnisse.....	28
4.5 Erkenntnisse für die Parameteridentifikation.....	33
5 Parameteridentifikation an Brettschichtholzbalken	35
5.1 Finite-Element-Modell für Brettschichtholzbalken	36
5.2 Gegenüberstellung von Rechen- und Testmodell	39
5.3 Modellkorrektur zur Parameteridentifikation	40
5.4 Sensitivitätsanalyse der Parameter.....	46
5.5 Überprüfung des Modell- und Korrekturansatzes mit Hilfe simulierter Testdaten	49

6 Traglastuntersuchungen	57
6.1 Traglastmodell	57
6.2 Überprüfung des Traglastmodells	63
6.3 Einfluß ausgewählter Parameter auf das Tragverhalten von Brettschichtholzträgern	67
6.3.1 Einfluß der Lamellen-E-Moduln.....	67
6.3.2 Einfluß der Rohdichte	70
7 Anwendung am Brettschichtholzbalken	73
7.1 Schwingungstest	73
7.2 Identifikation der Steifigkeitsparameter.....	78
7.3 Berechnung und experimentelle Ermittlung der Traglast	84
7.4 Gegenüberstellung der Berechnungs- und Versuchsergebnisse.....	89
8 Zusammenfassung und Ausblick	93
9 Literaturverzeichnis	97

Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen

A	Ästigkeit
A	Querschnittsfläche
b	Breite
B	Biegesteifigkeit
BSH	Brettschichtholz
C	Elastizitätsmatrix
C	Koppelsteifigkeit
c_s	Entwicklungskoeffizient
d	Dicke
D	Dehnsteifigkeit
E	Elastizitätsmodul
E_B	Biege- Elastizitätsmodul
E_k	Elastizitätsmodul der k- ten Lamelle
E_Z	Zug- Elastizitätsmodul
$E_{ }$	Elastizitätsmodul parallel zur Faser
E_{\perp}	Elastizitätsmodul senkrecht zur Faser
e_z	Exzentrizität in z- Richtung
F	Kraft
F^{Δ}	Lastvektor nach Erreichen der Druckfestigkeit
F^0	Anfangslastvektor
f_D	Druckfestigkeit des Holzes
$f_{D\perp}$	Druckfestigkeit des Holzes senkrecht zur Faser

$f_{D }$	Druckfestigkeit des Holzes parallel zur Faser
f_{DP}	Proportionalitätsgrenze des Holzes bei Druckbeanspruchung
F_{\max}	maximale Kraft
$f_{S }$	Scherfestigkeit des Holzes parallel zur Faser
F_U	Bruchlast
f_Z	Zugfestigkeit des Holzes
$f_{Z\perp}$	Zugfestigkeit des Holzes senkrecht zur Faser
$f_{Z }$	Zugfestigkeit des Holzes parallel zur Faser
f_{ZP}	Proportionalitätsgrenze des Holzes bei Zugbeanspruchung
G	Schubmodul
\mathbf{G}	Gradientenmatrix (Sensitivitätsmatrix)
\mathbf{G}_λ	Gradientenmatrix bezüglich der Eigenwerte
\mathbf{G}_ϕ	Gradientenmatrix bezüglich der Eigenformen
G_k	Schubmodul der k-ten Lamelle
h	Balkenhöhe
h_k	Lamellenhöhe
I	Einheitsmatrix
J	Zielfunktional
\mathbf{K}	Steifigkeitsmatrix
\mathbf{K}^Δ	Steifigkeitsmatrix nach Erreichen der Druckfestigkeit
\mathbf{K}_A	Steifigkeitsmatrix des Ausgangsmodells
\mathbf{K}_B	Biegesteifigkeitsmatrix
\mathbf{K}_C	Koppelsteifigkeitsmatrix
IV	

K_D	Dehnsteifigkeitsmatrix
KZV	Keilzinkenverbindung
L	Länge
<i>l</i>	Elementlänge
<i>l₀</i>	Ausgangslänge
L_{St}	Stützweite
M	Massenmatrix
MAC	Maß für die Abweichung zwischen zwei Vektoren (Modal Assurance Criterion)
MSF	modaler Skalierungsfaktor
n	Anzahl der Probekörper
N	Anzahl der Lamellen im Brettschichtholzbalken
R	Korrelationskoeffizient
r_a	Residualvektor im Linearisierungspunkt
S_r	Reststreuung
s	Standardabweichung der Reststreuung
S	Schubsteifigkeit
u	Holzfeuchtigkeit
u	Verschiebung in x- Richtung
U^Δ	Verschiebungsvektor nach Erreichen der Druckfestigkeit
U⁰	Anfangsverschiebungsvektor
v(α)	Vektor mit den Größen des Rechenmodells
v_a	Modellvektor im Linearisierungspunkt
v_T	Vektor mit gemessenen Größen (Test)

W	Wichtungsmatrix
w	Verschiebung in z- Richtung (Durchbiegung)
x	Koordinate in x- Richtung
y	Koordinate in y- Richtung
z	Koordinate in z- Richtung
α	Korrekturparameter
$\Delta\alpha_i$	Parameteränderung
ε	Verzerrung
ε_λ	Eigenwertresiduum
ε_ϕ	Eigenformresiduum
ε_r	Residualvektor
ε_w	gewichteter Residualvektor
γ	Gleitung
λ	Eigenwert
λ_T	Eigenwert aus Test
σ	Normalspannung
σ^Δ	Spannungsmatrix nach Erreichen der Druckfestigkeit
σ^0	Spannungsvektor im Ausgangszustand
τ	Schubspannung
ν	Querkontraktionszahl
ρ	Rohdichte
κ	Schubflächenkoeffizient
ϕ	Schubverformungsparameter

ΔF	Kraftdifferenz
Δf	Frequenzabweichung
Δl	Längenänderung
Φ	Eigenvektor
Φ_R	Eigenvektor des Rechenmodells
Φ_T	Eigenvektor aus Test
Δw	Durchbiegungsänderung

1 Einleitung

Holz weist aufgrund seiner natürlich gewachsenen Struktur Unregelmäßigkeiten und große Streuungen der steifigkeits- und festigkeitsrelevanten Parameter (Elastizitätsmodul, Rohdichte, Äste, Kraft- Faserverlauf) auf, die den wirtschaftlichen Einsatz von Brettschichtholz stark einschränken. Die Klassifizierung von Brettschichtholz erfolgt derzeit überwiegend durch eine manuelle Gütesortierung der einzelnen Brettlamellen nach visuellen Kriterien. Bei dieser Vorgehensweise können allerdings nur die Ästigkeit und die Wuchseigenschaften beurteilt werden, deshalb gewinnen Verfahren zur Messung des E-Moduls und der Rohdichte immer mehr an Bedeutung.

Nachdem eine Korrelation zwischen dem Elastizitätsmodul und der Festigkeit von Holz nachgewiesen wurde [Glos, 1978], [Heimeshoff, 1982], ergab sich die Möglichkeit, durch Messung der Steifigkeit auf die Festigkeit zu schließen. Daraufhin wurden für die Sortierung von Brettschichtholzlamellen Verfahren entwickelt, bei denen der Elastizitätsmodul mit Hilfe von Durchbiegungsmessungen oder über Messungen der Longitudinalschwingungen berechnet wird. Der Nachteil des Durchbiegungsprinzips liegt darin, daß nur einzelne Brettlamellen untersucht werden können und keine Betrachtung des gesamten Brettschichtholzträgers vorgenommen werden kann. Durch die Messung der Schwingungszeit von Längsschwingungen, wie sie bisher angewendet wird, ist es nicht möglich unterschiedliche Elastizitätsmoduln über die Brettlänge zu erfassen.

Diese Nachteile können beim Einsatz von Parameteridentifikationsverfahren vermieden werden. Hierbei handelt es sich um Verfahren zur Korrektur ausgewählter Parameter eines Rechenmodells auf der Grundlage von Messungen an einer Struktur. Die Messungen liefern Verformungen, Spannungen oder Eigenschwingungsgrößen, die den berechneten Größen des Rechenmodells gegenüber gestellt werden. Anschließend werden die Modellparameter solange korrigiert bis berechnete und gemessene Größen übereinstimmen. Werden als Meßdaten Biegeeigenschwingungen verwendet, so kann die Steifigkeit von Brettern oder Balken mit beliebigen Querschnittsabmessungen auch abschnittsweise bestimmt werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Möglichkeiten des Parameteridentifikationsverfahrens zur Ermittlung der Elastizitätsmoduln einzelner Brettlamellen im gefertigten Brettschichtholzträger zu untersuchen, um eine Endkontrolle bei der Produktion von Brettschichtholz zu ermöglichen.

Auf der Grundlage der Parameteridentifikation wurde unter anderem eine Methode zur Ermittlung der Elastizitätsmoduln und der Schubmoduln von geschichteten Faserverbundplatten entwickelt [Zou, 1996]. Hierfür wurde ein Plattenmodell nach der Laminattheorie benutzt, die auch zur Beschreibung von Brettschichtholzbalken herangezogen werden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Laminat-Balkenelement mit den zu bestimmenden Parametern (Biegesteifigkeit, Schubsteifigkeit und Lamellen-E-Moduln) und ein geeig-

neter Korrekturansatz entwickelt werden. Die Parameter des Rechenmodells sollen dabei an gemessene Eigenschwingungsgrößen angepaßt werden.

Um die Möglichkeiten der Parameteridentifikation zur Beurteilung des Tragverhaltens von Brettschichtholzträgern untersuchen zu können, soll ein Traglastmodell unter Verwendung des Laminat-Balkenelements entwickelt werden. Bei diesem Modell muß neben den identifizierten Steifigkeitsparametern auch die Festigkeit der Brettlamellen und der Keilzinkenverbindungen berücksichtigt werden.

Mit der Kombination aus Modellkorrektur und Traglastberechnung kann für einen gefertigten Brettschichtholzträger die vorhandene Steifigkeit und die rechnerische Traglast bestimmt und so die Qualität des fertigen Brettschichtholzes abschließend überprüft werden. Darüber hinaus kann das Verfahren der Parameteridentifikation für die maschinelle Sortierung von Brettlamellen eingesetzt werden.