Andreas Dietzel

Modellgestützte Ermittlung und Bewertung der Formgebungsgrenzen von Rotbuchenfurnier

MODELLGESTÜTZTE ERMITTLUNG UND BEWERTUNG
DER FORMGEBUNGSGRENZEN VON
ROTBUCHENFURNIER

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

an der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Ilmenau

vorgelegt von

Dipl.-Ing. (FH) Andreas Dietzel
geboren am 01.02.1980
in Eisenach

Gutachter:

- (1) Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Zimmermann, Technische Universität Ilmenau
- (2) Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. André Wagenführ, Technische Universität Dresden
- (3) Herr Prof. Dr.-Ing. Bernd Bellair, Hochschule Zittau/Görlitz

Tag der Einreichung: 02.02.2017

Tag der Disputation: 19.06.2017

Berichte aus der Mechanik

Andreas Dietzel

**Modellgestützte Ermittlung und
Bewertung der Formgebungsgrenzen
von Rotbuchenfurnier**

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Ilmenau, Techn. Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5673-0

ISSN 1616-0126

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Gegenstand dieser Arbeit ist die kontinuumsmechanische Beschreibung des Werkstoffes Furnier bei zweidimensionaler Umformung. Die experimentellen Betrachtungen werden an quer gemessertem, industriell hergestelltem Rotbuchenfurnier (*Fagus sylvatica L.*) durchgeführt. Umformversuche sind dabei Kurzzeitversuche. Auf Basis bekannter Materialmodelle von Vollholz (Kurzzeitbereich) werden verschiedene Umformmodelle für Furnier entwickelt. Besonderes Augenmerk liegt auf der Erfassung der Kennwertdifferenzen zwischen Vollholz und Furnier, der stark von den Parametern Holzfeuchte und Temperatur abhängigen Zug-Druck-Asymmetrie des Werkstoffes sowie des plastischen Verformungspotentials bei Druckbelastung.

Darauf aufbauend werden, anhand mikroskopischer Untersuchungen, fertigungsbedingte Werkstoffschädigungen von Furnier (Messerrisse und Oberflächendefekte) charakterisiert und quantifiziert. Die Ergebnisse werden mit Blick auf die bei Vollholz und Furnier stark differierenden mechanischen Werkstoffkennwerte diskutiert und die Kennwertdifferenzen m.H. eines Schichtmodells erfasst.

Des Weiteren werden ein neu entwickelter Biegeversuch und eine entsprechende Prüfvorrichtung zur Erfassung der zweidimensionalen Formungseigenschaften von Furnier vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt in der Aufzeichnung der Randfaserdehnungen der Biegeprobe m.H. eines digitalen Bildkorrelationsmesssystems. Anhand umfangreicher Versuche werden die Biegeeigenschaften und das Versagensverhalten von Furnier in Abhängigkeit der Parameter Furnierdicke, Holzfeuchte, Faser- und Krümmungsrichtung (offene, geschlossene Furnierseite) ermittelt. Furnier zeigt dabei asymmetrische Biegeeigenschaften sowie ein sehr komplexes Versagensverhalten, mit sukzessiv zunehmender Werkstoffschädigung. Die minimal erreichbaren Biegeradien werden in Bezug auf die daraus resultierenden Oberflächendefekte des Furniers ausgewertet und diskutiert.

Im Gültigkeitsbereich der entwickelten Umformmodelle zeigen die Versuchsergebnisse eine gute Übereinstimmung. Hin zu sehr kleinen Radien ist aus den Dehnungsmessungen ersichtlich, dass in der Zugrandfaser die, aus uniaxialen Zugversuchen bekannten, Bruchdehnungen deutlich überschritten werden. Es wird aufgezeigt, wie die zugrunde gelegte Werkstoffmodellbeschreibung zu erweitern ist, um auch diesen Grenzbereich der Furnierformung im Umformmodell abbilden zu können.

Schlagwörter: Furnier, Rotbuchenholz, Messerrisse, Materialmodell, Umformsimulation, FEM, Biegeversuch, Dehnungsmessung, DIC

Abstract

The subject of this thesis is the description of veneer in two-dimensional forming processes by means of continuum mechanical approaches. The experimental investigations are carried out on beech veneer (*Fagus sylvatica L.*) produced on an industrial veneer slicer. Forming tests are short-term tests. Different veneer forming models are developed, based on existing material models of solid wood (short-term range). Special attention is paid on taking into account the characteristic differences between solid wood and veneer, the tension-compression-asymmetry of the material, which is strongly influenced by the parameters wood moisture content and temperature, as well as the plastic deformation-potential under compressive load.

Based on this, microscopic examinations are carried out to characterize and quantify veneer damage (lathe checks and surface defects) due to the slicing process. The results are discussed with regard to the mechanical material characteristics, which differ greatly in the case of solid wood and veneer, and the characteristic value differences are described using a layer model.

Furthermore, a new bending test and a corresponding test device are shown, which have been developed to investigate the two-dimensional shaping properties of veneer. The focus is on recording the edge fibre strains of the bending specimen, which are measured using a digital image correlation system. With the help of extensive tests the bending properties and the failure behavior of veneer are determined depending on veneer thickness, wood moisture content, fiber direction and curvature direction (orientation of the surface on which the lathe checks occur). Veneer shows asymmetrical bending properties as well as a very complex failure behavior, with successively increasing material damage. The achievable minimum bending radii are evaluated and discussed with regard to the resulting surface defects of the veneer.

The test results proof a good conformity within the scope of the developed forming models. For very small bending radii, it can be seen from the strain measurements that strain in the tensile loaded edge fiber clearly exceeds the ultimate strain known from uniaxial tensile tests. It is shown how to extend the material model, so that this border area of the molding process can also be represented by the developed forming models.

Keywords: veneer, beech, lathe checks, material model, forming simulation, FEM, bending test, strain measurement, DIC

Vorwort

Diese Forschungsarbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät Maschinenbau der Hochschule Schmalkalden im Rahmen eines kooperativen Promotionsverfahrens mit der Technischen Universität Ilmenau.

Frau Prof. Dr.-Ing. Hendrike Raßbach, Leiterin der Forschungsgruppe Strukturmechanik an der Hochschule Schmalkalden, danke ich für die Eröffnung der Möglichkeit zur Promotion, die stets wohlwollende Förderung und wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit sowie das in mich gesetzte Vertrauen.

Ebenso gilt mein besonderer Dank Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Zimmermann, Leiter des Fachgebietes Technische Mechanik der Technischen Universität Ilmenau, für die stete Unterstützung, die wertvollen Anregungen zur Verfassung dieser Arbeit sowie die Übernahme des Hauptreferates.

Für die Übernahme der Koreferate möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. André Wagenführ, Professur für Holztechnik und Faserwerkstofftechnik der Technischen Universität Dresden, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Bellair, Hochschule Zittau/Görlitz, bedanken.

Allen Kolleginnen und Kollegen der Fakultät Maschinenbau der Hochschule Schmalkalden, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. (FH) Martin Zimmermann und Herrn M. Eng. Sebastian Weyh, danke ich für das angenehme Arbeitsklima, ihre stete Diskussionsbereitschaft und aktive Unterstützung.

Ich bedanke mich für die sehr gute Zusammenarbeit bei Herrn Hermann Riekert, Furnierwerk Prignitz GmbH & Co. KG, den Herren Dipl.-Ing. Olaf Zimmermann und Tristan Zimmermann, Treppen Zimmermann GbR, sowie Frau Dipl.-Ing. Beate Buchelt, Institut für Naturstofftechnik der Technischen Universität Dresden.

Ein ganz besonders herzlicher Dank gilt meiner lieben Frau Alexandra für ihre Geduld, Unterstützung und das Verständnis, das sie mir trotz ihres beruflichen und familiären Engagements in all den Jahren entgegenbrachte. Nur durch diesen starken Rückhalt wurde das Gelingen dieser Arbeit erst möglich.

Erfurt, Juni 2017

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	vi
Verzeichnis häufig verwendeter Indizes	ix
Symbolverzeichnis	x
Abbildungsverzeichnis	xxv
Tabellenverzeichnis	xxix
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielstellung	2
1.3 Einschränkungen	2
2 Stand des Wissens, der Forschung und der Technik	3
2.1 Der Werkstoff Holz	3
2.1.1 Allgemeines	3
2.1.2 Anatomie des Holzes	4
2.1.2.1 Makroskopischer Aufbau	4
2.1.2.2 Mikroskopischer Aufbau	6
2.1.2.3 Submikroskopischer Aufbau	8
2.1.3 Physikalische Eigenschaften von Holz	11
2.1.3.1 Allgemeines	11
2.1.3.2 Dichte	12
2.1.3.3 Feuchtigkeitsaufnahme	13
2.1.3.4 Quell- und Schwindverhalten	14
2.1.3.5 Glasübergangstemperatur der Holzgrundsubstanzen	16
2.1.4 Elasto-plastische Eigenschaften von Holz	18
2.1.4.1 Allgemeines	18
2.1.4.2 Elasto-plastische Eigenschaften in Faserrichtung	20
2.1.4.3 Elasto-plastische Eigenschaften quer zur Faser	25
2.1.4.4 Elasto-plastische Eigenschaften bei Schubbelastung	30
2.2 Der Werkstoff Furnier	33
2.2.1 Allgemeines	33
2.2.2 Herstellungsbedingte Werkstoffveränderungen	34

2.2.3	Maßnahmen zur Verbesserung der Formbarkeit	39
2.2.4	Elastische Eigenschaften	40
2.2.4.1	Festigkeiten im Vergleich zu Vollholz	42
2.2.4.2	Steifigkeiten im Vergleich zu Vollholz	43
2.2.5	Formgebungsverfahren	44
2.2.6	Bewertungsmöglichkeiten der Formungsgrenzen	45
2.2.6.1	Erfahrungsbasierte Methoden	45
2.2.6.2	Experimentelle und modellgestützte Methoden	46
2.3	Grundlagen der Festkörper-Kontinuumsmechanik	50
2.3.1	Allgemeines	50
2.3.2	Grundlagen der Elastizitätstheorie	50
2.3.2.1	Kinematik des Kontinuums	51
2.3.2.2	Kinetik des Kontinuums	55
2.3.2.3	Konstitutive Beziehung	60
2.3.3	Grundlagen der zeitunabhängigen Plastizitätstheorie	65
2.3.3.1	Fließfunktion	67
2.3.3.2	Fließregel	67
2.3.3.3	Ver- und Entfestigungsvorschrift	68
2.3.3.4	Plastisches Dehnungsinkrement	71
2.3.3.5	Lokale Spannungsrückführung am Integrationspunkt	73
2.3.3.6	Mehrflächige Plastizität	74
2.3.3.7	VON MISES-Fließkriterium für isotrope Werkstoffe	75
2.3.3.8	Fließfunktionen für Holz	77
2.3.4	Grundlagen der Laminattheorie	84
2.4	Optische Dehnungsmessung	87
2.4.1	Allgemeines	87
2.4.2	3D-Dehnungsmesssystem ARAMIS	87
2.4.3	Modelle der Dehnungsberechnung	90
2.4.3.1	Ebenen-Modell	90
2.4.3.2	Spline-Modell	90
3	Modellrechnungen zum Formungsvermögen von Furnier	93
3.1	Einführung	93
3.2	Werkstoffkennwerte	93
3.2.1	Verhältniszahlen Druck/Zug bei Vollholz	94
3.2.1.1	Verhältniszahlen Steifigkeiten	96
3.2.1.2	Verhältniszahlen Festigkeiten	96
3.2.1.3	Verhältniszahlen für ausgewählte Klimaeinstellungen	96
3.2.2	Schubfestigkeiten von Furnier	97
3.3	Analytische Modelle	99
3.3.1	Reine Biegung – linearelastisch	100
3.3.2	Biegemoment und Normalkraft – elasto-idealplastisch	101
3.4	Numerische Modelle	106
3.5	Vergleich mit Versuchsergebnissen	110

3.6	Schlussfolgerungen	112
4	Holzanatomische Untersuchungen an Messerfurnier	115
4.1	Einführung	115
4.2	Material und Methodik	115
4.3	Ergebnisse der Rissvermessung auf der Oberfläche	119
4.4	Ergebnisse der Rissvermessung im Querschnitt	121
4.4.1	Messgrößen	121
4.4.2	Furnierdicke	122
4.4.3	Querschnittsminderungen durch Ausbrüche	123
4.4.4	Risstiefe	123
4.4.5	Rissabstand	126
4.4.6	Risswinkel	128
4.5	Erfassung der Querschnittsschädigungen im Rechenmodell	130
4.5.1	Steifigkeiten basierend auf Vollholzkennwerten	130
4.5.2	Festigkeiten basierend auf Vollholzkennwerten	133
4.6	Schlussfolgerungen	134
5	Experimentelle Untersuchungen zum elasto-plastischen Materialverhalten von Furnier	137
5.1	Einführung	137
5.2	Hypothesen und Aufgabenstellung	138
5.3	Entwicklung des Formbiegeversuchs	138
5.3.1	Anforderungen und Konzept	138
5.3.2	Konzipierung der Prüfvorrichtung	140
5.3.3	Konstruktive Umsetzung der Prüfvorrichtung	142
5.4	Versuchsplanung	144
5.4.1	Begriffsdefinitionen	144
5.4.1.1	Bezeichnungsschema Dehnungs-Sets	144
5.4.1.2	Bezeichnungsschema Proben	144
5.4.1.3	Bezeichnungsschema Serien	145
5.4.2	Versuchsumfang	145
5.4.2.1	Ursprüngliche Stützpunktanzahl und Probenmenge	147
5.4.2.2	Modifizierte Stützpunktanzahl und Probenmenge	147
5.4.3	Erfassung des Versagensverhaltens	148
5.4.4	Erfassung der bleibenden Verformungen	148
5.5	Probenmaterial	150
5.5.1	Ausgangswerkstoff	150
5.5.2	Probenform und Herstellung	150
5.5.3	Grauwertmuster	151
5.6	Prüfvorschriften und Bezugsgrößen	152
5.6.1	Dehnungsmessung	152
5.6.2	Probenvorspannung	154
5.6.3	Belastungsgeschwindigkeit	155

5.6.4	Messung des verbleibenden Biegewinkels	156
5.6.5	Klimatisierung der Proben	157
5.6.5.1	Vorkonditionierung	157
5.6.5.2	Prüfbedingungen	158
5.6.6	Probenquerschnitt	158
5.6.7	Holzfeuchtegehalt und Darrdichte	158
5.7	Versuchsaufbau und -durchführung	159
5.8	Auswertung	161
5.8.1	Verformungsverhalten	161
5.8.2	Versagensverhalten	163
5.8.2.1	Faserlastwinkel 0°	164
5.8.2.2	Faserlastwinkel 90°	168
5.8.2.3	Modellhafte Betrachtung	168
5.8.3	Randfaserdehnungen	172
5.8.3.1	Aufbereitung der Versuchsdaten	172
5.8.3.2	Interpretation der Versuchsdaten	174
5.8.4	Minimale Biegeradien	175
5.8.5	Bleibende Verformungen	176
5.9	Vergleich mit Modellrechnungen	178
5.9.1	Strukturverhalten	178
5.9.2	Zugrunde gelegtes Materialmodell	180
5.10	Schlussfolgerungen	182
6	Zusammenfassung und Ausblick	185
	Literatur	191
	Anhang	203
A	Versuche	203
A.1	Druckversuch an Furnier	204
A.2	Formbiegeversuch	206
A.2.1	Holzfeuchte und Darrdichte der Serien	206
A.2.2	Probenquerschnitt	207
A.2.2.1	Probendicke	207
A.2.2.2	Probenbreite	208
A.2.3	Versagensverhalten	209
A.2.4	Randfaserdehnungen – Schaubilder	217
A.2.5	Randfaserdehnungen – Zahlentafeln	222
A.2.6	Minimale Biegeradien	231

B	Sonstiges	233
B.1	Werkstoffkennwertbestimmung an Rotbuchenholz – Literaturvergleich . . .	234
B.1.1	Prüfungen nach PRODEHL	234
B.1.2	Druckversuche nach GABER	234
B.1.3	Druckversuche nach WINTER	235
B.1.4	Prüfungen nach FUCHS	235
B.1.5	Prüfungen nach OZYHAR	236
B.2	Proportionalitätsgrenzen von Rotbuchenholz nach FUCHS	237
B.3	Schubfestigkeiten von Rotbuchenfurnier	239
B.4	Geschwindigkeitsabhängiges Werkstoffverhalten von Rotbuchenholz	240
B.5	Bewertung von Furnierschädigungen nach Einsatzzweck	241