

Martin Zimmermann

## **Untersuchung des Feuchtetransportes und dessen Einfluss auf Form- und Eigenspannungsänderungen in Furnieren**

# Untersuchung des Feuchtetransportes und dessen Einfluss auf Form- und Eigenspannungsänderungen in Furnieren

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)

vorgelegt der

Fakultät für Maschinenbau der  
Technischen Universität Ilmenau

von Herrn

Dipl.-Ing. (FH) Martin Zimmermann

geboren am 8. September 1977

in Lutherstadt Wittenberg / Bundesrepublik Deutschland

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: 06.07.2021

Tag der Disputation: 14.12.2021



Berichte aus der Mechanik

**Martin Zimmermann**

**Untersuchung des Feuchtetransportes  
und dessen Einfluss auf Form- und  
Eigenspannungsänderungen in Furnieren**

Shaker Verlag  
Düren 2022

**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., 2021

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8523-5

ISSN 1616-0126

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Kurzfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist, die Untersuchung der Feuchteaufnahme und -weiterleitung in Furnieren, wie sie während der industriellen Verarbeitung vorkommt. Es steht damit die Aufnahme von freiem Wasser einschließlich der damit einhergehenden quellungsbedingten Form- und Eigenspannungsänderungen bei Furnieren im Fokus der Betrachtungen.

Hierzu werden, nach Vorstellung ausgewählter Grundlagen aus Forschung und Technik, Konzeption und Realisierung experimenteller Untersuchungen erläutert. Die am Beispiel von Rotbuchenfurnier (*Fagus Sylvatica* L.) durchgeführten Untersuchungen unterscheiden dabei zwischen Versuchsreihen zur Wasseraufnahme und der damit verbundenen Verformungsentwicklung. Die Randbedingungen der verschiedenen Messreihen berücksichtigen für Holz typische anatomische Eigenschaften (z. B. Faserausrichtung), relevante Befeuchtungsszenarien aus der industriellen Furnierverarbeitung (einseitige, zweiseitige und allseitige Feuchtezufuhr) sowie Einflüsse aus der Furnierherstellung (Unterscheidung rissbehaftete/rissfreie Furniersichtseite). Während der Versuchsdurchführung werden neben der Massenzunahme auch die für die Ermittlung der Probenkrümmung relevanten Verformungsgrößen ausgewertet. Im Ergebnis zeigt sich ein durch verschiedenste Einflussfaktoren bestimmtes komplexes Materialverhalten. So kann durch einen Vergleich der Massenzunahmen (einseitige/zweiseitige Fechtzunahme, LT-Ebene) belegt werden, dass, im Gegensatz zur einseitigen Feuchtezufuhr, bei beidseitigem Feuchteeintrag eine Reduktion der Feuchteleitungsgeschwindigkeit im Werkstoff eintritt. Infolgedessen wird bei den Messungen mit zweiseitiger Feuchteaufnahme weniger Masse pro Zeiteinheit aufgenommen, als sich aus der Summe der Messungen bei einseitiger Feuchtezufuhr ergibt. Ferner zeigt sich zu Beginn der Feuchteaufnahme eine deutlich schnellere Feuchteleitung im rissbehafteten Randbereich als im rissfreien. Zusammenfassend kann, infolge der unsymmetrischen Quelldehnungen bei zwei- bzw. auch allseitiger Feuchteaufnahme, ein für Furnier typisches und von Vollholzerzeugnissen abweichendes Verformungsverhalten herausgestellt sowie Aussagen zur Formstabilität von Furnieren abgeleitet werden.

Im darauffolgenden Abschnitt steht die mathematische Beschreibung der Feuchtebewegung im Vordergrund. Beginnend mit analytischen Betrachtungen zur Beschreibung des Stofftransportes (1D) auf Basis der Fick'schen Diffusionsgesetze wird die Anwendung konstanter Diffusions- bzw. Transportkoeffizienten zur modellhaften Beschreibung der experimentellen Wasseraufnahme diskutiert. Im Folgenden werden mit Hilfe unterschiedlicher FEM-Modelle feuchteabhängige Kennwertverläufe (Transportkoeffizienten) für longitudinalen und radialen Feuchtetransport in Rotbuchenfurnier abgeleitet. Bei radialem Feuchtetransport wird hierzu zwischen Beschreibungen für den rissfreien und rissbehafteten Materialbereich unterschieden. Darüber hinaus wird zur Berücksichtigung der experimentell belegten langsameren Feuchteleitung bei zweiseitiger Feuchtezufuhr ein Vorschlag zur Erweiterung des Werkstoffgesetzes abgeleitet. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der Feuchtetransport in Furnier sehr gut mit Hilfe der entwickelten Modelle beschrieben werden kann. Es steht somit ein neues, experimentell validiertes Hilfsmittel zur Auslegung industrieller Formgebungsprozesse (Furnierumformung) zur Verfügung, welches im Sinne der virtuellen Produkt- bzw. Prozessentwicklung zur Anwendung kommen kann.

## Abstract

The objective of this thesis is to investigate the moisture absorption and transmission in veneers as it occurs during industrial processing. Thus the focus of the thesis is to analyze the absorption of free water, including the concomitant swelling-related changes in shape and residual stresses of veneers.

For this purpose, concepts and realization of experimental investigations are explained after presenting selected basics from research and technology. The investigations carried out on the example of copper beech veneer (*Fagus Sylvatica* L.) distinguish between test series on water absorption and the associated development of deformation. The boundary conditions of the various measurement series consider typical anatomical properties of wood (fiber orientation), relevant humidification scenarios from industrial veneer processing (one-sided, two-sided and all-sided moisture supply) as well as influences from veneer production (distinction between veneer surface with lathe checks and without lathe checks). During the test procedure, the deformation variables relevant for determining the specimen curvature are evaluated in addition to the mass increase. The results show a complex material behavior determined by a wide variety of influencing factors. Thus, a comparison of the mass increase (one-sided/two-sided moisture absorption, LT-plane) proves that, in contrast to one-sided moisture input, a reduction of the moisture conduction velocity in the material occurs with two-sided moisture input. As a result, less mass is absorbed per time unit in the measurements with two-sided moisture absorption than results from the sum of the measurements with one-sided moisture supply. Furthermore, at the beginning of moisture absorption the moisture transfer is significantly faster in material areas with lathe checks compared to the moisture transport in material regions without lathe checks. In summary, as a result of the asymmetrical swelling expansion in case of two-sided or even all-sided moisture absorption, a swelling-related deformation behavior typical of veneer that strongly deviates from solid wood products and conclusions on the form stability of veneers can be derived.

The following section focuses on the mathematical description of moisture movement. Beginning with analytical considerations for the description of mass transport (1D) based on Fick's diffusion laws the application of constant diffusion coefficients for the model description of experimental water absorption is discussed. Subsequently, FEM models were developed to derive the moisture-dependent transport coefficient curves for longitudinal and radial moisture transport in copper beech veneer. In case of radial moisture transfer a distinction is made between transport coefficients for material regions with and without lathe checks. In addition, a proposal for extending the material law is derived to take into account the experimentally proven slower moisture transfer with two-sided moisture supply. To conclude, the developed models allow to describe the complex moisture transport in veneer very well and provide a new and experimentally validated tool for the design of industrial veneer forming with tremendous prospects in the future product and process development.

---

## Vorwort

---

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner wissenschaftlichen Tätigkeit an der Fakultät Maschinenbau der Hochschule Schmalkalden.

Besonders bedanken möchte ich mich diesbezüglich bei Frau Prof. Dr.-Ing. Hendrike Raßbach für die immerwährende Förderung meiner wissenschaftlichen Tätigkeit und das in mich gesetzte Vertrauen.

Ebenfalls gilt mein besonderer Dank Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Zimmermann für die Möglichkeit zur Eröffnung eines kooperativen Promotionsverfahrens an der Technischen Universität Ilmenau einschließlich der Übernahme des Hauptreferates sowie die stets entgegenkommende Unterstützung.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Bellair, Hochschule Zittau/Görlitz, und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. André Wagenführ der Technischen Universität Dresden für die Übernahme des Korreferates sowie ihre wichtigen Hinweise zur Realisierung dieser Arbeit.

Allen Mitarbeitern der Fakultät Maschinenbau der Hochschule Schmalkalden danke ich für das angenehme Arbeitsklima. Insbesondere bedanke ich mich bei Herrn M. Eng. Sebastian Weyh für die immer offene Diskussionsbereitschaft und die hervorragende Zusammenarbeit. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Dietzel für die stete Gesprächsbereitschaft sowie die immer wertvollen Anregungen.

Mein besonderer Dank gilt darüber hinaus meiner lieben Familie, die mich immer unterstützt, begleitet und motiviert hat. Widmen möchte ich die vorliegende Arbeit meinen Töchtern Chantal und Joline, welche mir jeden Tag die notwendige Stärke und das Durchhaltevermögen gaben, die es zur Anfertigung einer Forschungsarbeit wie der vorliegenden Dissertation braucht.

Schmalkalden, Juni 2021



---

## Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVATION UND ZIELSTELLUNG	1
1.2	AUFBAU DER ARBEIT	3
1.3	ABGRENZUNGEN	3
<b>2</b>	<b>STAND DES WISSENS, DER FORSCHUNG UND DER TECHNIK</b>	<b>5</b>
2.1	STRUKTURELLER AUFBAU VON HOLZ	5
2.1.1	Makroskopischer Aufbau	6
2.1.2	Mikroskopischer Aufbau	8
2.1.3	Submikroskopischer Aufbau	11
2.2	ALLGEMEINE PHYSIKALISCHE WERKSTOFFEIGENSCHAFTEN VON HOLZ	12
2.2.1	Dichte	12
2.2.2	Porenanteil	13
2.2.3	Feuchtegehalt	14
2.2.4	Hygroskopie von Holz	15
2.2.5	Quell- und Schwindverhalten	19
2.3	FEUCHTETRANSPORT IN HOLZ	22
2.3.1	Kapillarer Stofftransport	23
2.3.2	Gekoppelter Stofftransport (kapillar & gasförmig)	24
2.3.3	Stofftransport auf Basis der Fick'schen Diffusionsgesetze	26
2.3.4	Experimentelle Charakterisierung des Feuchtetransportes in Holz	29
2.4	MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN – WERKSTOFFVERHALTEN VON HOLZ	36
2.4.1	Elasto-plastisches Materialverhalten von Holz	36
2.4.2	Werkstoffmodellierung im Rahmen der Festkörper-Kontinuumsmechanik	39
2.4.3	Grundlagen der Elastizitätstheorie	40
2.4.4	Grundlagen der Plastizitätstheorie	43
2.5	FURNIER ALS HOLZWERKSTOFF	44
2.5.1	Herstellungsverfahren	44
2.5.2	Veränderungen der Holzstruktur bei der Herstellung von Furnieren	45

<b>3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN .....</b>	<b>49</b>
3.1 EINFÜHRUNG .....	49
3.2 VERSUCHSPLANUNG .....	49
3.3 UNTERSUCHUNGEN IM ÜBERBLICK.....	52
3.4 VERSUCHSVORBEREITUNG .....	55
3.4.1 Fertigung der Rohfurniere.....	55
3.4.2 Herstellung der Furnierproben .....	56
3.4.3 Lackbasierte Vorbehandlung (Messreihen 1–3 / 5–7).....	58
3.4.4 Mikroskopische Untersuchungen (Messreihen 8–11).....	59
3.4.5 Bestimmung von Probenausgangsmassen sowie -abmessungen.....	61
3.5 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG .....	61
3.5.1 Experimentelle Randbedingungen.....	61
3.5.2 Vorgehensweise Versuchsdurchführung.....	65
3.6 AUSWERTUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE .....	68
3.6.1 Feuchteaufnahme LT-Ebene (Stofftransport radial) .....	69
3.6.2 Feuchteaufnahme RT-Ebene (Stofftransport longitudinal) .....	83
3.6.3 Allseitige Feuchteaufnahme von Furnier.....	87
3.6.4 Bestimmung der Wasseraufnahmekoeffizienten nach DIN EN ISO 15148.....	91
3.7 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE (EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN).....	93
<b>4 MODELLIERUNG DER FEUCHTEBEWEGUNG IN FURNIER.....</b>	<b>99</b>
4.1 ZIELSTELLUNGEN.....	99
4.2 ANALYTISCHE BESCHREIBUNG DES FEUCHTETRANSPORTES .....	100
4.2.1 Beidseitige Feuchteaufnahme, konstante Anfangs- sowie Randfeuchte .....	100
4.2.2 Einseitige Feuchteaufnahme, Berücksichtigung verschiedener Grenzfälle .....	104
4.2.3 Vergleichsrechnungen – Schlussfolgerungen bzgl. analytischer Lösungen .....	108
4.3 NUMERISCHE BEWERTUNG DES FEUCHTETRANSPORTES .....	110
4.3.1 Modellbildung auf Basis der Finite-Elemente-Methode.....	110
4.3.2 Diffusionsmodelle .....	110
4.3.3 Gekoppelte Modelle (Strukturmechanik – Diffusion).....	112
4.4 MODELLGESTÜTZTE KENNWERTERMITTLUNG .....	114
4.4.1 Vorgehen zur Bestimmung der Kennwertverläufe $D(\omega)$ .....	114
4.4.2 Einseitige Feuchteaufnahme (radialer Stofftransport) .....	118
4.4.3 Beidseitige Feuchteaufnahme (radialer Stofftransport).....	127
4.4.4 Einseitige Feuchteaufnahme (longitudinaler Stofftransport).....	132
4.5 ZUSAMMENFASSUNG (MODELLIERUNG DER FEUCHTEBEWEGUNG IN FURNIER).....	138
<b>5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>143</b>
<b>6 LITERATUR.....</b>	<b>151</b>

---

<b>7 ANHANG</b> .....	<b>161</b>
7.1 VERSUCHE .....	161
7.1.1 Befeuchtungsintervalle Messreihen 1–7 .....	161
7.1.2 Handlingszeiten Versuchsreihen 1–7 .....	162
7.1.3 Ergebnisdaten Versuchsreihe Feuchteaufnahme [VR: FA] .....	163
7.1.4 Ergebnisdaten Versuchsreihe Verformungsentwicklung [VR: VFE] .....	170
7.2 MODELLIERUNG .....	177
7.2.1 Elastische Kennwerte Rotbuche .....	177
7.2.2 Ergebnisse Kennlinienverläufe Transportkoeffizienten .....	178
7.2.3 Relative Abweichung zwischen Simulations- und Experimentalwerten .....	180