

Holz Roh Werkst (2007) 65: 459–468
DOI 10.1007/s00107-007-0200-x

ORIGINALARBEITEN · ORIGINALS

Experimentelle Ermittlung der Dehnungen im Probenquerschnitt bei Biegebelastung von Holzpartikelwerkstoffen

Peter Niemz · Julia Schreiber · Jochen Naumann · Martin Stockmann

Published online: 14 September 2007
© Springer-Verlag 2007

Zusammenfassung An Holzpartikelwerkstoffen (OSB, Spanplatten, MDF) wurde bei Biegebelastung mittels Moiré-Verfahren die Dehnungsverteilung über der Probendicke bei variabler Biegespannung ermittelt. Zu Vergleichszwecken wurde zusätzlich an der Probenoberfläche in der Zug- und Druckzone die Randfaserdehnung mittels Dehnungsmessstreifen bestimmt. Eine Verschiebung der neutralen Achse in Richtung Zugzone, wie sie bei Vollholz bekannt ist, trat nicht auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Zug- und Druckfestigkeit bei diesen Werkstoffen etwa in der gleichen Größenordnung liegen. Bezüglich der Randfaserdehnung wurde eine gute Übereinstimmung der mittels Moiré-Technik und Dehnungsmessstreifen bestimmten Werte erzielt.

Experimental determination of strain in the cross section of wood-based materials under bending load

Abstract The distribution of strain in the cross section of wood-based materials (OSB, fibre boards, MDF) was determined by means of Moiré technique with variable bending stress. For comparison, the strain of the outer fibre on the tensile and pressure side of the samples was measured simultaneously by using strain gauges. No displacement of the

neutral layer in direction of the tensile side, as can be seen on solid wood, was noticed. This is because of the tensile and compression strength, which are of the same level for these materials. Concerning the strain of the outer fibre, good correspondence was observed between Moiré technique and strain gauges.

1 Einleitung

In der technischen Biegelehre gerader, geschichteter Träger mit konstantem Querschnitt wird vorausgesetzt, dass die Dehnungsverteilung über die Trägerhöhe unabhängig von den Werkstoffeigenschaften der einzelnen Schichten näherungsweise als linear verteilt angesehen werden kann (Altenbach et al. 1996).

Bei Biegebelastung von Vollholz kommt es infolge der starken Differenz zwischen Zug- und Druckfestigkeit mit zunehmender Belastung zu einer Verschiebung der Spannungs-Nulllinie, d.h. der neutralen Faser, in Richtung Zugzone des Biegeträgers (Kollmann 1951). Bei Spanplatten konnte dies bisher nicht nachgewiesen werden, da der Unterschied zwischen Zug- und Druckfestigkeit deutlich geringer ist und die Druckfestigkeit meist leicht über der Zugfestigkeit liegt (Hänsel 1987, Hänsel und Niemz 1989, Niemz und Schweitzer 1990). Die Grundlagen der Mechanik von Holz und Holzwerkstoffen wurden von Bodig und Jayne (1982) zusammengestellt.

Die Dehnung ist linear über die Prüfkörperdicke verteilt. Treten Unterschiede in der Festigkeit bei Zug- und Druckbelastung auf, kommt es bei Biegebelastung zu dem für Vollholz typischen nichtlinearen Verlauf der Spannungsverteilung (Kollmann 1951).

Regensburger und Niemz (1980) ermittelten mittels Photogrammetrie die Dehnungsverteilung über die Probendicke

P. Niemz (✉) · J. Schreiber
Institut für Baustoffe, ETH Zürich,
Schafmattstrasse 6,
HIF E 25.2., 8093 Zürich, Schweiz
e-mail: niemzp@ethz.ch

J. Naumann · M. Stockmann
Professur für Experimentelle Mechanik,
Strasse der Nationen 62,
09111 Chemnitz, Deutschland

von Spanplatten sowie die lokale Lageänderung von Partikeln unter Belastung. Weitere Möglichkeiten zur Bestimmung der Dehnungsverteilung liegen zum einen in der Ermittlung von Verzerrungen über eine Kreuzkorrelation aufgenommener Bilder während eines Belastungsvorganges (z.B. mittels VIC 2D oder 3D) oder zum anderen in der Speckle-Technik (Müller et al. 2005).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird mittels Moiré-Technik (Naumann 1992) die Dehnungsverteilung bei Biegebelastung bestimmt. Zur Validierung der Ergebnisse werden ergänzende Messungen mit Dehnungsmessstreifen (Keil 1995) an der Zug- und Druckseite der Biegeproben vorgenommen.

2 Versuchsmaterial und -methodik

2.1 Versuchsmaterial

Als Versuchsmaterial dienten industriell hergestellte

- MDF mit einer Rohdichte von 550 kg/m^3 und 15 mm Plattendicke
- MDF mit einer Rohdichte von 750 kg/m^3 und 16 mm Plattendicke
- OSB mit einer Rohdichte von 650 kg/m^3 und 15 mm Plattendicke
- Spanplatten mit einer Rohdichte von 650 kg/m^3 und 16 mm Plattendicke

2.2 Ermittlung der Materialeigenschaften

An je 20 in Fertigungsrichtung entnommenen Proben wurden folgende Eigenschaften bestimmt, um das Material zu charakterisieren:

- Rohdichte nach DIN 52361 (1965)
- Biegefestigkeit und Biege-E-Modul nach EN 310 (1993) bei Dreipunktbiegung
- Zugfestigkeit in Plattenebene und Zug-E-Modul in Anlehnung an DIN 52377 (1978) (für Sperrholz).
- Druckfestigkeit und Druck-E-Modul in Plattenebene in Anlehnung an DIN 52376 (1978) (für Sperrholz)
- Holzfeuchte nach EN 322 (1993)

Zusätzlich wurden mittels Videoextensometer die Bruchdehnungen bei Zug- und Druckbelastung bestimmt. Bei Dreipunkt-Biegung wurde auch die Randfaserdehnung nach Gl. 1 berechnet.

$$\varepsilon = \frac{600h}{L_v^2} f \quad (1)$$

ε : Dehnung in %

f : Durchbiegung in der Probenmitte in mm

h : Probendicke/Probenhöhe in mm

L_v : Stützweite in mm

Bei OSB wirkt sich die geringe Probengröße in einer erhöhten Streuung der Messergebnisse aus. Um für spätere Versuche eine Vergleichbarkeit mittels Video-Image-Correlation zu erreichen (dabei ist die Probengröße wegen der Auflösung begrenzt), wurden einheitliche Proben nach DIN 52377 (1978) gewählt und auf mittlere Probenabmessungen bei OSB verzichtet.

Die mechanischen Eigenschaften sind in Tabelle 2, Abschn. 3.1, zusammengestellt.

2.3 Ermittlung der Dehnung mittels Moiré-Technik und DMS

2.3.1 Proben und Belastung

Die Proben wurden entsprechend Abb. 1 durch Vierpunktbiegung belastet. Für die Dehnungsmessung über der Probendicke wurden das Moiré-Verfahren und vergleichend Dehnungsmessstreifen (DMS) angewandt. Die Messung mittels DMS erfolgte nur jeweils auf der Probenoberfläche in der Zug- und Druckzone des Biegestabes. Es wurden Proben im Format von $300 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times \text{Dicke}$ (Länge \times Breite \times Dicke) verwendet. Die Last wurde schrittweise über die Durchbiegung erhöht (vgl. Tabelle 1). Als Belastungsgrad wird der Quotient aus vorhandener Biegespannung und der Biegebruchspannung $\sigma_{\text{BB}} = \sigma_{\text{max}}$ von Tabelle 2 definiert. Die Dehnungsmessung erfolgte im querkräftfreien Bereich.

Bedingt durch die unterschiedliche Belastungsart treten geringe Differenzen zwischen den Spannungen bei der Biegeprüfung nach EN 310 und der für das Moiré-Verfahren verwendeten Vierpunktbiegung auf. Zudem ist die Streuung der Materialkennwerte zwischen den Proben zu berücksichtigen.

2.3.2 In-plane Moiré-Technik

Messprinzip Vereinzelt wurde dieses, in anderen Bereichen etablierte Verfahren der experimentellen Mechanik, auch an Holzwerkstoffen angewendet, z.B. Kühne und Kröppelin (1979), Rastogi und Sandoz (2003), Cárdenas-Garcia et al. (2005).

Ein Moiré-Effekt entsteht durch die geometrisch-optische Überlagerung zweier gering unterschiedlicher, weitgehend periodischer Strukturen. In der Regel sind dies Linien-, Punkt- oder Kreuzraster.

Charakteristisch für die In-plane-Technik ist, dass ein Objektaster unmittelbar auf eine Ebene oder einfach gekrümmte Oberfläche des zu untersuchenden Bauteils aufgebracht wird. Bei einer Beanspruchung des Bauteils erfährt das Objektaster die gleichen Verzerrungen wie die Bau-

Tabelle 1 Belastungsstufen bei der Messung der Dehnungsverteilung mittels Moiré-Technik
Table 1 Levels of loadings for measuring the strain distribution by means of Moiré technique

Material (Nennrohichte [kg/m ³])	Probendicke [mm]	Spannung [N/mm ²] (Belastungsgrad [%])
MDF (550)	15	8,0 (43%) – 10,5 (56%) – 12,7 (68%) – 14,8 (79%)
MDF (750)	16	9,9 (26%) – 14,7 (39%) – 19,4 (52%) – 23,7 (63%) – 27,4 (73%)
OSB (600)	15	12,5 (61%) – 18,2 (88%)
Spanplatte (650)	18	3,6 (36%) – 5,3 (53%) – 6,8 (68%) – 8,1 (81%)

Tabelle 2 Mechanische Eigenschaften des verwendeten Versuchsmaterials (20 Einzelwerte je Material); *x* – Mittelwert, *s* – Standardabweichung
Table 2 Mechanical properties of the tested materials (20 samples per material); *x* – mean value, *s* – standard deviation

	Material	Spanplatte		OSB		MDF		MDF		
		<i>x</i>	<i>s</i>	<i>x</i>	<i>s</i>	<i>x</i>	<i>s</i>	<i>x</i>	<i>s</i>	
statische Biegung	Dichte [kg/m ³]	649	13	643	33	740	6	544	97	
	σ_{max} [N/mm ²]	10	0,7	20,7	2,4	37,5	2,3	18,7	1	
	E-Modul [N/mm ²]	1770	64	3119	203	3895	203	2070	73	
Druck	ϵ -F max [%]	0,69	0,05	0,83	0,1	1,23	0,06	1,19	0,06	
	σ_{max} [N/mm ²]	8,7	0,6	13,9	0,9	20,4	1,1	7	1,1	
	E-Modul [N/mm ²]	2325	546	4318	1225	3981	595	2179	334	
Zug	ϵ -F max [%]	0,62	0,26	0,36	0,19	0,37	0,06	0,16	0,06	
	σ_{max} [N/mm ²]	4,5	0,2	8,1	1,2	20,3	0,7	9,1	0,3	
	E-Modul [N/mm ²]	1502	428	2795	879	3095	282	1550	259	
		ϵ -F max [%]	0,34	0,05	0,35	0,16	1,07	0,11	1,12	0,17

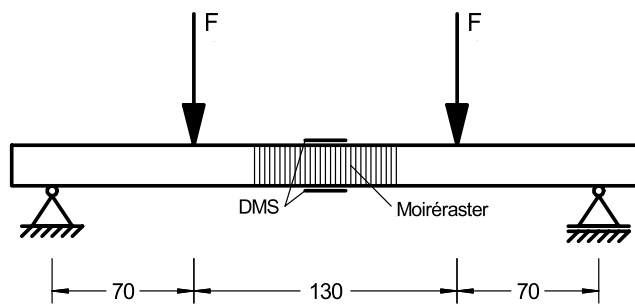


Abb. 1 Belastungsschema 4-Punktbiegung (Maßangabe in mm)
Fig. 1 Schema of 4-point bending (dimensions mm)

teiloberfläche. Moiré-Streifen entstehen dann durch die Überlagerung, meist in direktem oder optischem Kontakt, mit einem Referenzraster, das nicht an der Verformung teilnimmt.

Wichtigster Sonderfall dieses Messprinzips ist das Isothetenverfahren, bei dem das Referenzraster und das undeformierte Objektraster identisch sind. Parameter der Skelettlinie eines Moiré-Streifens, hier Isothete genannt, ist diejenige In-plane-Komponente des Verschiebungsvektors, die senkrecht zu den Linien des Referenzrasters orientiert ist. Wird als Objektraster ein Kreuzraster präpariert, dessen Linien parallel zu einem in der Bauteiloberfläche liegenden *x*-*y*-Koordinatensystem sind, gilt folgender Zusammenhang:

$$u_x(x, y) = pm_x(x, y), \tag{2a}$$

$$u_y(x, y) = pm_y(x, y), \tag{2b}$$

u_x, u_y: In-plane-Komponenten des Verschiebungsvektors in *x*- bzw. *y*-Richtung

m_x, m_y: Ordnungen der Moiré-Streifen (Isotheten), wenn die Rasterlinien parallel zur *y*- bzw. *x*-Achse sind
p: Rasterteilung, d.h. Abstand zweier Rasterlinien des Referenz- bzw. des unverformten Objektrasters

Abbildung 2 zeigt ein an einem Holzpartikelwerkstoff aufgenommenes Isothetenfeld bei einer Biegebelastung entsprechend Abb. 1. Auf der Schmalseite des Biegeträgers befindet sich als Objektraster ein Kreuzraster. Als Bezugsraster fungiert ein Linienraster, dessen Linien parallel zur *y*-Achse orientiert sind, so dass entlang der Isotheten die Verschiebungskomponente *u_x* konstant ist.

Den hellen und dunklen Moiré-Streifen können wahlweise ganze oder halbe Ordnungen zugewiesen werden. Da bei dem vorliegenden Lastfall (Abb. 1) die Verschiebung *u_x* auf der *y*-Achse verschwinden muss, ist der dortige dunkle Streifen bzw. dessen Skelettlinie die nullte Ordnung. Gleichzeitig wird durch die Isothete nullter

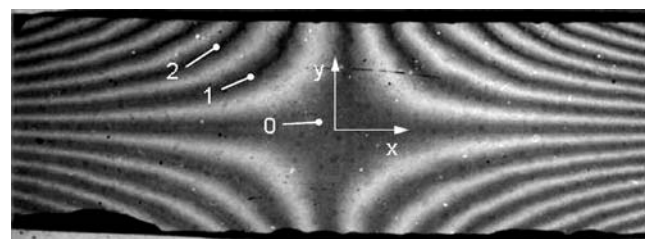


Abb. 2 Moiré-Streifenfeld infolge reiner Biegung an einem Holzpartikelwerkstoff
Fig. 2 Moiré pattern on a wood particle material caused by pure bending

Ordnung die neutrale Faser des Biegeträgers markiert. Die Verschiebung u_x ändert sich nach Gl. 2a zwischen zwei dunklen Streifen um p , so dass sich die in Abb. 2 dargestellte kontinuierliche Nummerierung der Isotheten ergibt.

Ermittlung der Dehnung Die Dehnung wurde an je einer Probe pro Material bei Vierpunktbiegung bestimmt. Zwischen der Biegedehnung ε_x und der Verschiebung u_x besteht der Zusammenhang

$$\varepsilon_x(x, y) = \frac{\partial u_x(x, y)}{\partial x} = p \frac{\partial m_x(x, y)}{\partial x} \equiv pm_{x,x}(x, y). \quad (3)$$

Die Auswertung der digitalen Moiré-Bilder erfolgte über eine dafür speziell entwickelte Bildbearbeitungs-Software. Hierbei wurden zunächst entlang diskreter, horizontaler Spuren $y_k = \text{const}$ die Orte x_i der Ordnungen $m_x(x_i)$ interaktiv am Monitor gemessen. Mittels einer Regressionsrechnung konnten hieraus die Größen $m_{x,x}(x = 0, y_k = \text{const})$ und $\varepsilon_x(0, y_k)$ ermittelt werden.

Da die Dehnungsverteilung über die Höhe als linear angenommen werden darf, können sowohl die Randfaserdehnungen auf der Zug- und Druckseite als auch die Lage der neutralen Faser problemlos angegeben werden.

Auf ein spezielles Verfahren zur Dehnungsermittlung an Biegeträgern, das den kritischen Prozess der numerischen Differentiation entsprechend Gl. 3 vermeidet, sei ergänzend noch hingewiesen (Stockmann et al. 1996).

2.3.3 Messung mit Dehnungsmessstreifen

Messprinzip Die Messung mit elektrischen Dehnungsmessstreifen (DMS) ist ein Standardverfahren der experimentellen Mechanik. Messungen an Holzwerkstoffen wurden damit bereits mehrfach durchgeführt, z.B. durch Bröker (1985) oder Beer et al. (1990). Daher erfolgten ergänzend zur Moiré-Technik auf der Zug- und Druckseite der Biegeträger Dehnungsmessungen mit DMS.

Die relative Widerstandsänderung infolge einer Dehnung ist über den so genannten k -Faktor, der die Empfindlichkeit des DMS beschreibt, nach Gl. 4 direkt mit der Dehnung ε verbunden.

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon \quad (4)$$

R : Widerstand des DMS

ΔR : Widerstandsänderung des DMS infolge einer Dehnung ε

k : k -Faktor

ε : Dehnung in der Bauteiloberfläche bzw. im DMS

Die hochgenaue Messung der geringen Widerstandsänderungen des DMS erfordert, dass der DMS in einer Wheatstoneschen Brücke verschaltet wird und ein speziell für

DMS ausgelegter kommerzieller Messverstärker zum Einsatz gelangt.

Besonderheiten bei der Messung mit DMS an Holzwerkstoffen Bei der Anwendung von DMS an Holzwerkstoffen sind gegenüber metallischen oder polymeren monolithischen Werkstoffen folgende spezielle Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

- Die mehr oder weniger stark ausgeprägte zelluläre Struktur von Holzwerkstoffen führt zu großen lokalen Dehnungsschwankungen. Um einen mittleren Dehnungswert zu erhalten, muss ein DMS mit einer aktiven Messfläche, die deutlich größer als die Zellstruktur ist, gewählt werden.
- Bei der Applikation der DMS durch einen Klebprozess füllt der Klebstoff die Poren an der Oberfläche aus und führt dort zu einer gewissen Verfestigung. Die Steifigkeit des dünnen DMS selbst kann dagegen in der Regel vernachlässigt werden.
- Holzwerkstoffe sind sehr schlechte Wärmeleiter. Daher kann die im DMS durch den Stromfluss entstehende, wenn auch geringe Wärmemenge zu einer Eigen erwärmung der Messstelle und damit zu thermisch begründeten Messfehlern führen.

2.4 Präparation und Versuchsaufbau für Moiré- und DMS-Messungen (Biegeproben)

2.4.1 Moiré-Technik

Für die Moiré-Technik gelangten im eigenen Labor erzeugte Raster mit 50 Linien/mm ($p = 0,020$ mm) zum Einsatz. Als Objektraster fungierten Kreuzraster mit metallischen, reflektierenden Punkten, als Bezugsraster ein Linienraster, der auf einen hoch auflösenden fotografischen Film kopiert war.

In der Präparationsabfolge wurde zunächst die Stirnseite der Probe mit einem Einlassgrund aus Epoxydharz versiegelt. Nach 24 h wurden die Objektraster für die Moiré-Technik, die sich auf einer 125 μm dicken Kunststoffolie befanden, mit schwarz eingefärbtem Epoxydharz aufgeklebt. Nach dem Aushärten des Klebstoffs konnte die Kunststoffolie entfernt werden, so dass auf der Probe nur die metallischen Objektraster mit einer Dicke von unter 100 nm und die zähelastische Klebstoffschicht verblieben. Diese Übertragungstechnik verhindert praktisch ein Versteifen der Probe. Das Bezugsraster wurde über eine dünne Silikonölschicht als Immersionsflüssigkeit drehbar an die Probe geheftet.

2.4.2 Dehnungsmessstreifen

Die Applikation der Folien-DMS vom Typ N2A-06-20CBW-120 (VISHAY MM) erfolgte mittels des kommerziellen

DMS-Klebstoffs AE-10 (VISHAY MM) auf der Basis eines kalt härtenden Epoxydharzes. Die Probenoberfläche (Zug- und Druckzone des Biegestabes) wurde vor dem Aufbringen der DMS leicht trocken angeschliffen. Eine Versiegelung der Oberflächen, wie bei der Moiré-Technik, unterblieb. Um lokale Dehnungsunterschiede auszugleichen, wurden Folien-DMS mit einer Messgitterfläche von 50 mm Länge und 4 mm Breite gewählt. Bei einer Brückenspeisespannung von 1 V zeigten die Messstellen nach Anschalten keinen nennenswerten Temperaturgang.

Alle Messstellen wurden in Viertelbrückenschaltung und Vierleitertechnik an einem Messverstärkersystem MGCplus (Verstärkereinheit ML55, Anschlussplatte AP 14) von HBM betrieben. Die Einstellung des Messverstärkers, die Messwertaufnahme und -verarbeitung erfolgten mit dem Programmsystem CATMAN (HBM).

Abbildung 3 stellt den gesamten Versuchsaufbau (eingebaut in eine Prüfmaschine mit 100 kN Maximalkraft) dar. Es erfolgte eine Vierpunktbelastung. An Lasteinleitungs- und Lagerpunkten sorgen leichtgängige Wälzlager für eine längskraftfreie Belastung. Ein Strahlenteilerwürfel ermöglichte die diffuse Beleuchtung der Kombination aus Objekt- und Bezugsgitter und die Registrierung der Moiré-Streifenfelder über eine CCD-Kamera mit telezentrischem Objektiv für jede Laststufe.

Das Signal der Kraftmessdose und die Messwerte der beiden DMS auf Zug- und Druckseite der Probe werden kontinuierlich aufgezeichnet.

3 Versuchsergebnisse

3.1 Mechanische Eigenschaften und Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Die Versuchsergebnisse der Biege-, Zug- und Druckprüfungen sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Während bei Vollholz die Zugfestigkeit etwa doppelt so hoch ist wie die Druckfestigkeit, lag bei den untersuchten Spanplatten die mittlere Druckfestigkeit um ca. 93% über der mittleren Zugfestigkeit. Dabei ist zu bemerken, dass die Rohdichte der Spanplattenproben relativ niedrig war und die Platten ein vergleichsweise gering ausgeprägtes Rohdichteprofil hatten. Bei OSB lag die Druckfestigkeit im Mittel ca. 72% über der Zugfestigkeit. Bei MDF mit einer Rohdichte von ca. 750 kg/m^3 waren nur geringe Unterschiede zwischen Zug- und Druckfestigkeit in Plattenebene vorhanden. Bei MDF mit geringerer Dichte (ca. 550 kg/m^3) war dagegen die Zugfestigkeit höher als die Druckfestigkeit.

Die Biegefestigkeit lag bei allen 3 Materialien deutlich über der Zug- und der Druckfestigkeit. Generell zeigen sich strukturabhängig relativ große Streuungen.

3.2 Dehnungsmessung mittels Moiré-Technik und DMS

In den Abbildungen 4–7 ist jeweils die mittels Moiré-Technik bestimmte Dehnungsverteilung bei variablem Belas-

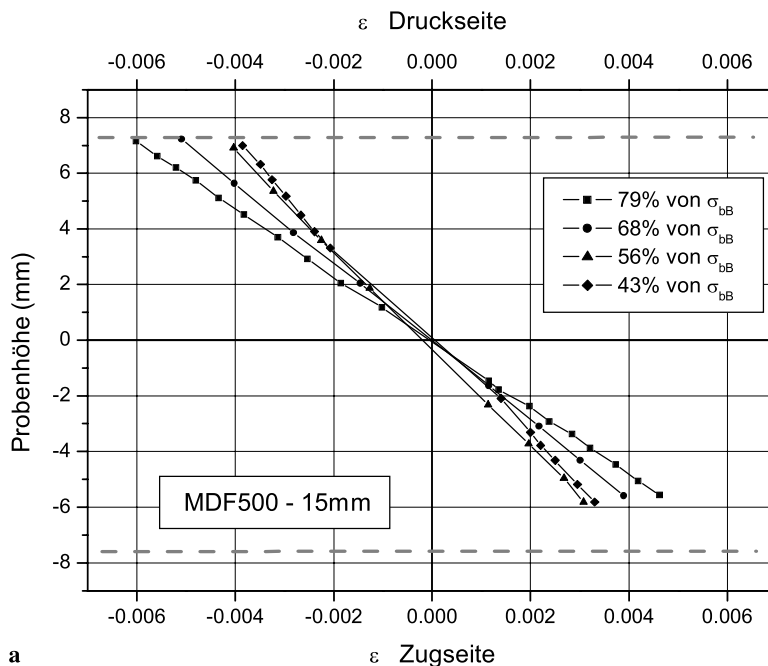
Abb. 3 Versuchsaufbau
Fig. 3 Experimental setup



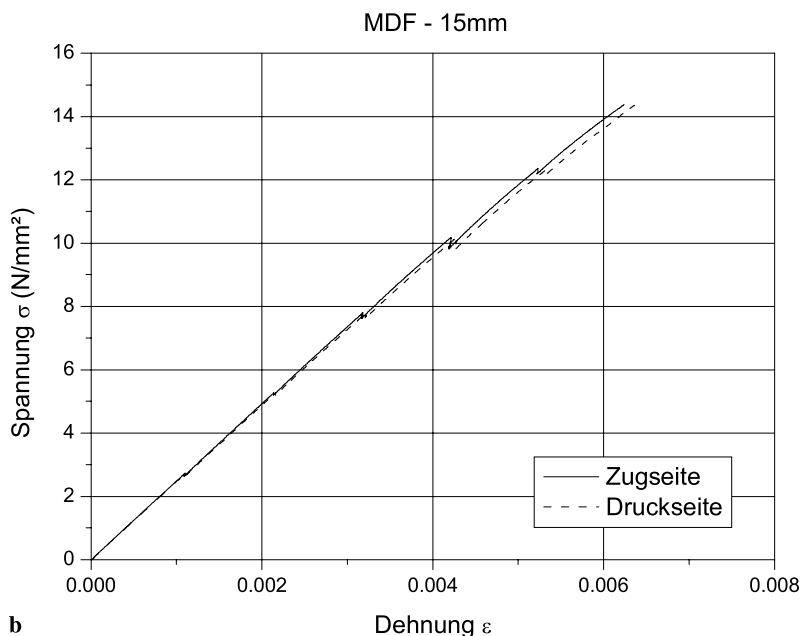
Abb. 4 Dehnungsverteilung über dem Probenquerschnitt bei variabler Belastung für MDF mit einer Dichte von 550 kg/m³.

(a) mittels Moiré-Technik berechnete Dehnung bei variablem Belastungsgrad (%-Anteil der Biegebruchspannung); (b) Randfaserdehnung als Funktion der Spannung bestimmt mit DMS; (c) Vergleich der mittels Moiré-Technik und DMS bestimmten Randfaserdehnung

Fig. 4 Strain distribution in the cross section of MDF (density 550 kg/m³) for variable loadings. (a) strain for variable loading calculated by means of Moiré technique (%-rate of bending strength); (b) strain of outer fibre as a function of the strain determined by strain gauges; (c) comparison of the strain of the outer fibre determined by Moiré technique and strain gauges



a



b

Dehnung Druck Moiré (-)	Dehnung Zug Moiré (-)	Dehnung Druck DMS (-)	Dehnung Zug DMS (-)	Spannung (N/mm ²)	Belastungsgrad (%)
-0.00629	0,00601	-0,00636	0,00622	14,8	79
-0.00534	0,00504	-0,00534	0,00522	12,7	68
-0.00432	0,00415	-0,00428	0,00419	10,5	56
-0.00362	0,00337	-0,00322	0,00317	8,0	43

c

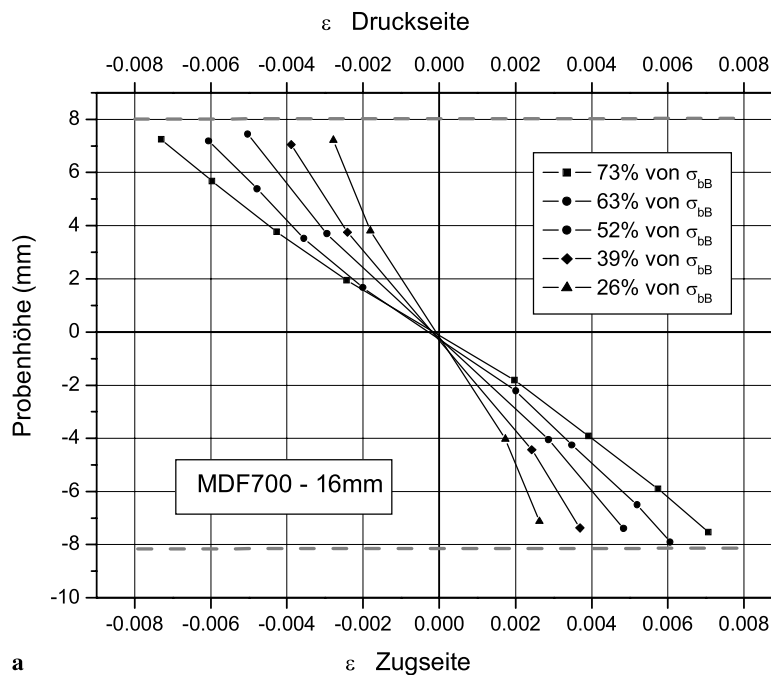
ungsgrad (Verhältnis Biegespannung zu Biegebruchspannung) (Abb. 4a–7a), die mittels DMS gemessene Randfaserdehnung als Funktion der Biegespannung (Abb. 4b–7b)

sowie in tabellarischer Form die mittels Moiré-Technik und DMS bestimmte Randfaserdehnung (Abb. 4c–7c) dargestellt.

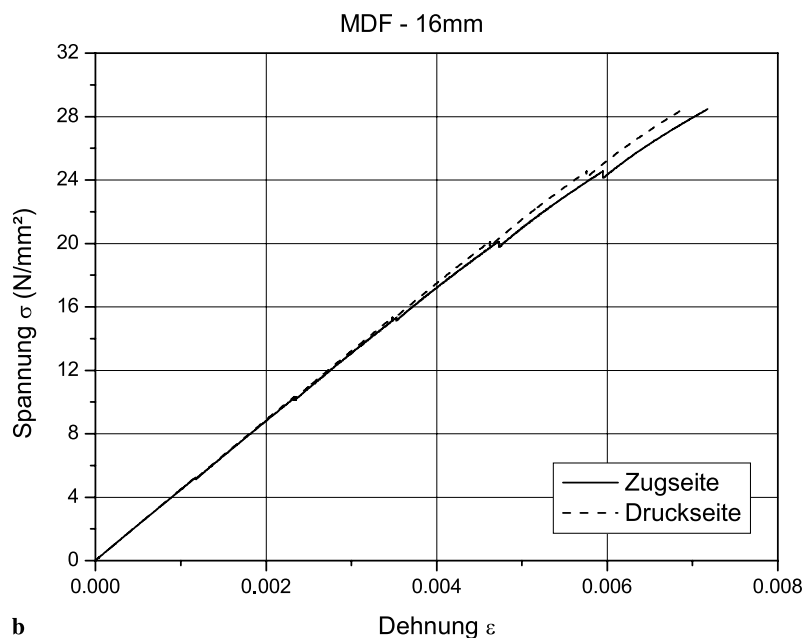
Abb. 5 Dehnungsverteilung über dem Probenquerschnitt bei variabler Belastung für MDF mit einer Dichte von 750 kg/m^3 .

(a) mittels Moiré-Technik berechnete Dehnung bei variablem Belastungsgrad (%-Anteil der Biegebruchspannung); (b) Randfaserdehnung als Funktion der Spannung bestimmt mit DMS; (c) Vergleich der mittels Moiré-Technik und DMS bestimmten Randfaserdehnung

Fig. 5 Strain distribution in the cross section of MDF (density 750 kg/m^3) for variable loadings. (a) strain for variable loading calculated by means of Moiré technique (%-rate of bending strength); (b) strain of outer fibre as a function of the strain determined by strain gauges; (c) comparison of the strain of the outer fibre determined by Moiré technique and strain gauges



a



b

Dehnung Druck Moiré (-)	Dehnung Zug Moiré (-)	Dehnung Druck DMS (-)	Dehnung Zug DMS (-)	Spannung (N/mm ²)	Belastungsgrad (%)
-0,00778	0,00747	-0,00689	0,00719	27,4	73
-0,00664	0,0061	-0,00575	0,00594	23,7	63
-0,00519	0,00519	-0,00462	0,00473	19,4	52
-0,00391	0,00381	-0,0035	0,00353	14,7	39
-0,00292	0,00278	-0,00233	0,00233	9,9	26

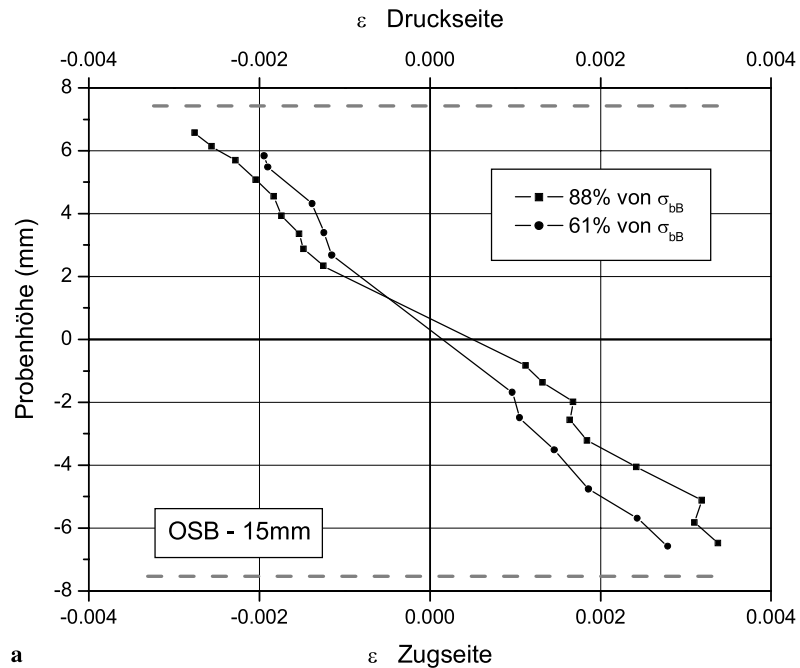
c

Da die Objektraster für die Moiré-Technik an den Schmalseiten der Proben, d.h. an den Schnittflächen appliziert werden müssen, bewirkt die dortige Porosität und in-

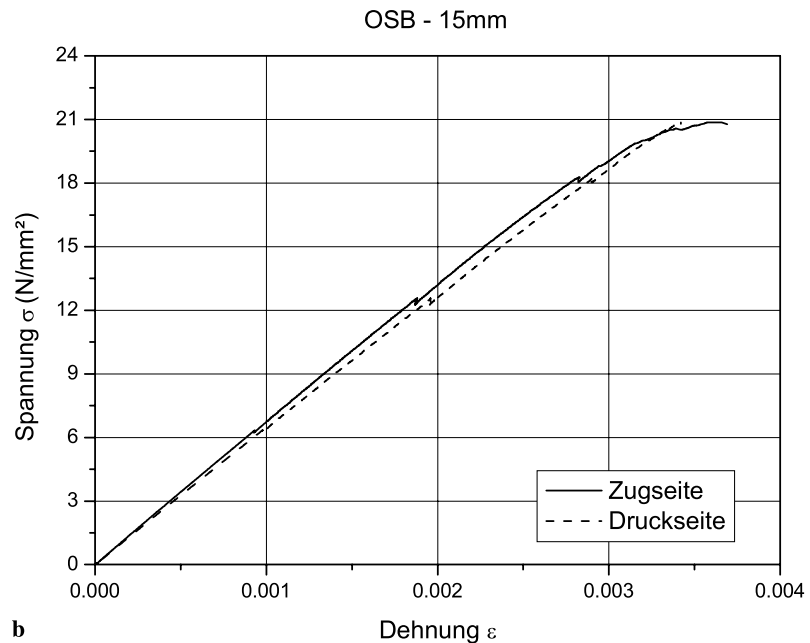
homogene Struktur der Holzwerkstoffe mehr oder weniger starke, lokale Schwankungen der Dehnungen. Diese können jedoch bei der Ermittlung der Dehnungen durch Differentia-

Abb. 6 Dehnungsverteilung über dem Probenquerschnitt bei variabler Belastung für OSB. (a) mittels Moiré-Technik berechnete Dehnung bei variablem Belastungsgrad (%-Anteil der Biegebruchspannung); (b) Randfaserdehnung als Funktion der Spannung bestimmt mit DMS; (c) Vergleich der mittels Moiré-Technik und DMS bestimmten Randfaserdehnung

Fig. 6 Strain distribution in the cross section of OSB for variable loadings. (a) strain for variable loading calculated by means of Moiré technique (%-rate of bending strength); (b) strain of outer fibre as a function of the strain determined by strain gauges; (c) comparison of the strain of the outer fibre determined by Moiré technique and strain gauges



a



b

Dehnung Druck Moiré (-)	Dehnung Zug Moiré (-)	Dehnung Druck DMS (-)	Dehnung Zug DMS (-)	Spannung (N/mm ²)	Belastungsgrad (%)
-0,00293	0,00317	-0,00292	0,00282	18,2	88
-0,00205	0,00293	-0,00197	0,00188	12,5	61

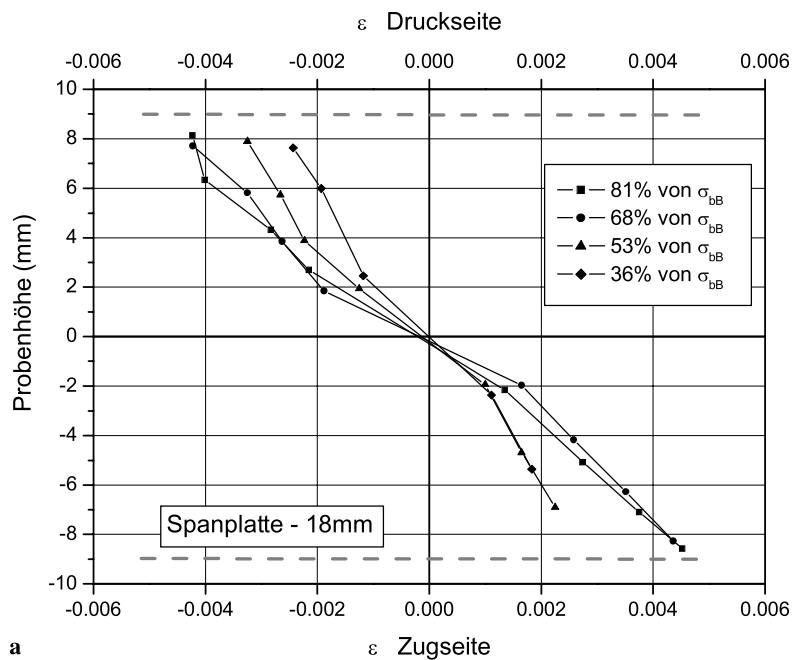
c

tion entsprechend Gl. 3 über die geeignete Wahl einer angepassten numerischen „Messlänge“ weitgehend ausgeglichen werden. Die Präparation von MDF-Proben mit Objekt-rastern erwies sich als unproblematisch, da eine sehr homogene Oberfläche vorliegt. Bei Spanplatten und insbesondere

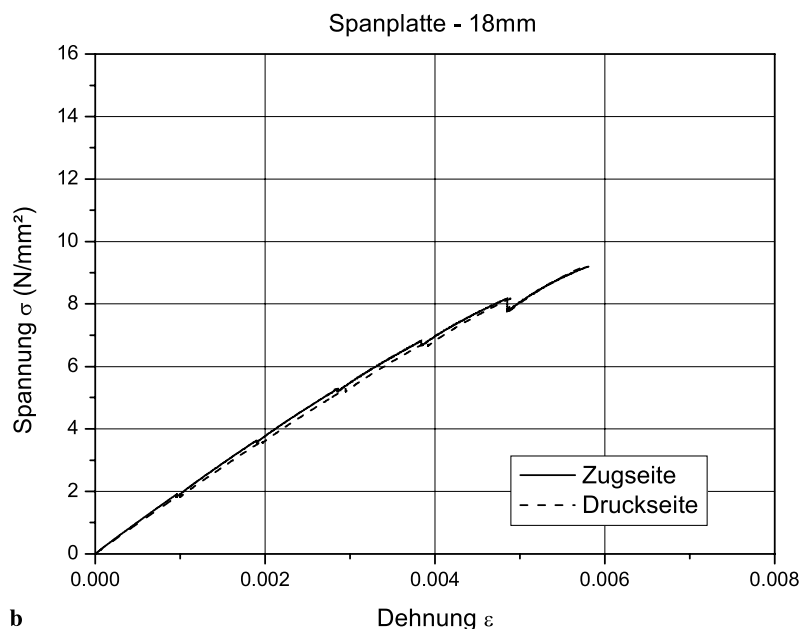
bei OSB bereitet die erhöhte Porosität der Schmalflächen (höherer Hohlraumanteil bei OSB in der Mittellage) gewisse Probleme. Die Streuung der Messwerte steigt.

Es zeigt sich, dass mit der Moiré-Technik bei allen Werkstoffen über den gesamten Belastungsbereich eine li-

Abb. 7 Dehnungsverteilung über dem Probenquerschnitt bei variabler Belastung für 18 mm dicke Spanplatten mit einer Dichte von 650 kg/m^3 . (a) mittels Moiré-Technik berechnete Dehnung bei variablem Belastungsgrad (%-Anteil der Biegebruchspannung); (b) Randfaserdehnung als Funktion der Spannung bestimmt mit DMS; (c) Vergleich der mittels Moiré-Technik und DMS bestimmten Randfaserdehnung **Fig. 7** Strain distribution in the cross section of fibre boards (density 650 kg/m^3) for variable loadings. (a) strain for variable loading calculated by means of Moiré technique (%-rate of bending strength); (b) strain of outer fibre as a function of the strain determined by strain gauges; (c) comparison of the strain of the outer fibre determined by Moiré technique and strain gauges



a



b

Dehnung Druck Moiré (-)	Dehnung Zug Moiré (-)	Dehnung Druck DMS (-)	Dehnung Zug DMS (-)	Spannung (N/mm ²)	Belastungsgrad (%)
-0,00483	0,00482	-0,00489	0,00484	8,1	81
-0,00449	0,00432	-0,00392	0,00382	6,8	68
-0,00332	0,00286	-0,00295	0,00284	5,3	53
-0,00259	0,00239	-0,00197	0,00188	3,6	36

c

neare Verteilung der Dehnung über der Plattendicke erhalten wird (Abb. 4a–7a). Da eine solche lineare Dehnungsverteilung theoretisch begründet ist (vgl. Abschn. 1), konnten die

in den Tabellen der Abbildungen 4–7 angegebenen Dehnungswerte in den Randfaserbereichen der Biegeproben zuverlässig durch Extrapolation ermittelt werden. Nach-

folgend wird durch DMS-Messungen aufgezeigt, dass die Dehnungen auf Zug- und Druckseite betragsmäßig weitgehend gleich sind. Unter dieser Annahme kann durch Mittelwertbildung auch eine Dehnung infolge Temperatur- oder Feuchteänderung kompensiert werden.

Die Dehnungsmessstreifen konnten auf die glatten Oberflächen der MDF- und Spanplatten völlig unproblematisch aufgebracht werden und lieferten zuverlässige Ergebnisse. Lediglich bei OSB liegen, bedingt durch die großen und langen Späne, ungünstige Voraussetzungen für die Messung vor. Trotz der eingesetzten sehr langen DMS mit einer Messlänge von 50 mm, kann es zu Messungen kommen, welche überwiegend an einem einzelnen Span durchgeführt werden. Die im Vergleich zu metallischen Werkstoffen etwas größeren Dehnungen an Holzwerkstoffen werden von den DMS ertragen, erfordern jedoch eine Korrektur des vom Hersteller angegebenen k -Faktors (Stockmann et al. 1996).

4 Zusammenfassung

Für alle Holzwerkstoffe konnte wie erwartet mit der Moiré-Technik ein linearer Dehnungsverlauf über die Plattendicke nachgewiesen werden. Die mittels Moiré-Technik und DMS bestimmten Randfaserdehnungen stimmen recht gut überein.

Bei niedrigen Spannungen (bis zu 35% der Biegebruchspannung) war die ermittelte Dehnung in Druck- und Zugzone bei allen Werkstoffen jeweils nahezu gleich. Dies ist auf die im Vergleich zu Vollholz viel geringere Differenzierung zwischen Zug- und Druckfestigkeit zurückzuführen. Die für Vollholz typische Verschiebung der Spannungs-Nulllinie mit zunehmender Belastung in Richtung Zugzone (siehe z.B. (Kollmann 1951)) wurde nicht ermittelt. Die Ergebnisse stimmen mit Untersuchungen von Regensburger und Niemz (1980) überein. Die mittels DMS und Moiré-Technik bei Biegung gemessenen und jeweils weitgehend betragsmäßig gleichen Randfaserdehnungen bei Zug- und Druckbelastungen korrelieren nicht völlig mit den mittels Videoextensometer bei Normalspannungen gemessenen relativ großen Unterschieden im E-Modul bei Zug- und Druckbelastung. Hierzu müssten weitere Arbeiten durchgeführt werden.

Bei vergleichbarem Belastungsgrad ist bei MDF die Randfaserdehnung höher als bei Spanplatten und OSB. Dies korreliert auch mit der mittels Videoextensometer bestimmten Randfaserdehnung beim Bruch.

Ursache für die Streuungen der Moiré- und DMS-Werte ist das je nach Partikelgröße mehr oder weniger starke inhomogene Dehnungsverhalten der Holzpartikelwerkstoffe, das sowohl bei der Moiré-Technik als auch bei der Messung mit DMS Auswirkungen hatte. Dennoch ließen sich die Werte der extrapolierten Moiré-Randdehnungen mit den

Werten der DMS-Messungen gut korrelieren. So gab es für alle Werkstoffe nahezu gleiche Werte der unterschiedlich gemessenen Randfaserdehnungen, was eine Korrektheit der Messungen beweist.

Literatur

- Altenbach H, Altenbach J, Rikards R (1996) Einführung in die Mechanik der Laminat- und Sandwichtragwerke. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart
- Beer RJ, Vanek M, Walden HD (1990) Zuverlässigkeit einer DMS-Messstelle auf Holz, Kurzzeitstabilität -Langzeitverhalten. *Holzforsch Holzverwert* 42:48–51
- Bodig J, Jayne B (1982) *Mechanics of Wood and Wood Composites*. Van Nostrand Reinhold Company, New York. 712 S
- Bröker FW (1985) Dehnungsmessungen an Holz mit direkt applizierten DMS. *Messtechnische Briefe* 21(1):18–23
- Cárdenas-García JF, Ekwaro-Osire S, Berg JM, Wilson WH (2005) Non-linear least-squares solution to the moiré hole method problem in orthotropic materials. Part II: Material elastic constants. *Exp Mech* 45:314–324
- DIN 52361 (1965) Prüfung von Holzspanplatten, Bestimmung der Abmessung, der Rohdichte und des Feuchtigkeitsgehalts
- DIN 52377 (1978) Prüfung von Sperrholz, Bestimmung des Zug-Elastizitätsmoduls und der Zugfestigkeit
- DIN 52376 (1978) Prüfung von Sperrholz, Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Plattenebene
- EN 322 (1993) Holzwerkstoffe, Bestimmung des Feuchtegehaltes
- EN 310 (1993) Holzwerkstoffe, Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit
- Hänsel A (1987) Grundlegende Untersuchungen zur Optimierung der Struktur von Spanplatten. Dissertation, TU Dresden
- Hänsel A, Niemz P (1989) Untersuchungen zur Mechanik der Holzspanplatten. *Holzforsch Holzverwert* 40(3):1–5
- Keil S (1995) Beanspruchungsermittlung mit Dehnungsmessstreifen. Cuneus Verlag, Zwingenberg a.d. Bergstr.
- Kollmann F (1951) *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Band 1, 2. Auflage. Springer-Verlag, Berlin, 1050 S
- Kühne G, Kröppelin U (1979) Ein Beitrag zur experimentellen Ermittlung des Beanspruchungsverhaltens von Möbeleckverbindungen. *Holztechnologie* 20:6–11
- Müller U, Sretenovic A, Vincenti A, Gindel W (2005) Direct measurement of strain distribution along a wood bond line. Part I Shear strain concentration in a lap joint specimen by means of speckle pattern interferometry. *Holzforschung* 59: 300–305
- Naumann J (1992) Grundlagen und Anwendung des In-plane-Moiré-Verfahrens in der experimentellen Festkörpermechanik. VDI-Verlag, Düsseldorf
- Niemz P, Schweitzer F (1990) Einfluss ausgewählter Strukturparameter auf die Zug- und Druckfestigkeit von Spanplatten. *Holz Roh Werkst* 42:361–364
- Rastogi P, Sandoz JL (2003) Mechanical evaluation of finger-jointed timber assemblies using holographic moiré interferometry. *Opt Eng* 42:1321–1327
- Regensburger K, Niemz P (1980) Anwendung photogrammetrischer Meßverfahren für Deformations- und Dehnungsmessungen an Vollholz und Spanplatten aus Holz. *Holztechnologie* 1: 87–88
- Stockmann M, Naumann J, Bormann P, Pelz F (1996) Zur Widerstandsänderung von Dehnungsmessstreifen bei großen Deformationen. *Materialprüfung* 38 Teil 1: Physikalische Grundlagen 134–138, Teil 2: Messergebnisse 216–219