



Eidgenössische Technische Hochschule
ETH Zürich
Institut für Baustoffe
Holzphysik
Schafmattstrasse 6
8093 Zürich

Forschungsbericht für das Kuratorium des Fonds zur
Förderung der Wald- und Holzforschung Nr. 2004.14

Untersuchungen zur Optimierung von Massivholzplatten

2. Teilbericht - Schlussbericht

T. Gereke, P. Hass, P. Niemz

Zürich, Juli 2007

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Experimentelle Untersuchungen	5
2.1	Einleitung	5
2.2	Material	5
2.3	Methoden	6
2.4	Ergebnisse	8
2.4.1	Plattenverzug	8
2.4.2	Eigenspannungen	11
2.4.3	Quellmass	14
2.4.4	Rissbildung	16
3	Numerische Simulation	19
3.1	Modellierung des Feuchtetransportes in Holz	19
3.2	Modellierung feuchtebedingter Spannungen und Dehnungen	20
3.3	Modellvalidierung	21
3.3.1	Materialeigenschaften	21
3.3.2	Finites-Element-Modell	23
3.3.3	Ergebnisse und Diskussion	24
4	Zusammenfassung	27

Zeichenerklärung

a_1, a_2, a_3, a_4	Koeffizienten
C	Spannungs-Dehnungs-Matrix
D	Diffusionskoeffizient
E	Elastizitätsmodul
G	Schubmodul
L	Länge
m	mechano-sorptiver Materialwert
q	Diffusionsfluss
Q	prozentuales Quellmass
s	Standardabweichung
S	Feuchteübergangskoeffizient
t	Zeit
u	Verschiebung
x	Diffusionsweg
$\bar{x}$	Mittelwert
α	differentielles Quellmass
ϵ	Dehnung
φ	relative Luftfeuchte (rLF)
ϕ	Konzentration
γ	Scherung
μ	mechano-sorptive Kopplung
ν	Poissonsche Konstante
ω	Holzfeuchte
θ	Winkel in der RT-Ebene
ρ	Dichte
σ	Normalspannung
τ	Schubspannung

1 Einleitung

Mehrlagige Massivholzplatten sind ein relativ junger Holzwerkstoff. Entwickelt haben sie sich aus dreilagigen Betonschalungsplatten, die in den 1950er Jahren die gehobelten Vollholz-Schaltafeln ersetzen (TOBISCH [23]). Wie alle Holzwerkstoffe wurden sie zu dem Zweck geschaffen, die Nachteile von natürlichem Holz zu reduzieren und dessen positive Eigenschaften zu nutzen. Einer der größten Nachteile des Holzes ist seine Anisotropie in den drei anatomischen Hauptrichtungen und sein Verhalten gegenüber Feuchte. Holz kann als hygroskopisches Material Feuchtigkeit aufnehmen und wieder abgeben. Bis zu einem bestimmten Bereich (Fasersättigungsbereich) ist dies immer mit Dimensionsänderungen verbunden, die in ihrem Ausmass ebenfalls von der anatomischen Schnitttrichtung abhängen. Zudem sind die Dimensionen, in denen Vollholz verfügbar ist, beschränkt auf die Abmessungen des Baumes. Mehrlagige Massivholzplatten begegnen diesen Einschränkungen dadurch, dass aus einzelnen Lamellen Lagen gefertigt werden, die - kreuzweise angeordnet - übereinander verleimt werden. So können große Formate realisiert werden (z.B. Firma Schilliger AG $3.40 \times 13.70m^2$), die durch die kreuzweise Orientierung eine verbesserte Dimensionsstabilität aufweisen und zudem eine gesteigerte Isotropie erlangen. Durch die Möglichkeit, auch kurze Abschnitte und Restholz zu Lamellen zu verarbeiten, weisen Massivholzplatten eine hohe Wertschöpfung auf. Diese kurzen Abschnitte werden in Längsrichtung entweder mittels Keilzinkung verbunden oder stumpf gestoßen in die Lagen eingearbeitet. Eingesetzt werden die mehrlagigen Massivholzplatten heutzutage vor allem im Bauwesen als tragende und aussteifende Wand- und Deckenbekleidungen. Aber auch im Innenausbau und im Möbelbau werden die Platten verwendet, wobei ihnen hier jedoch mehr eine optische Funktion zukommt. Gegenüber den traditionellen Plattenwerkstoffen, wie MDF oder Spanplatten haben Massivholzplatten den Vorteil, dass bei gleichen Abmessungen höhere Festigkeiten erzielt werden und der Vollholz- Charakter erhalten bleibt. Im Hinblick auf das wachsende ökologische Bewusstsein ist dieser Faktor für die Akzeptanz eines Werkstoffes nicht zu unterschätzen. Ausserdem können die Platten bei Einsatz von Polyurethan formaldehydfrei hergestellt werden. Durch die kreuzweise Verleimung der Lagen entstehen infolge der unterschiedlichen Quellmasse beim Feuchtwechsel Spannungen. Senkrecht zur Faserrichtung der Decklagen bilden sich bei Trocknung dabei Zugspannungen aus, die so groß werden können, dass sich Risse bilden. Im Hinblick auf den optischen Verwendungszweck haben diese natürlich eine negative Auswirkung, da sie das Erscheinungsbild der gestalteten Oberfläche beeinträchtigen. Aber auch für die mechanischen Eigenschaften und für die Dauerhaftigkeit stellen Risse ein Problem dar. Risse sind Fehlstellen, durch die das Material an Festigkeit verliert und sie bieten

für Holzschädlinge und Feuchtigkeit günstige Angriffspunkte. Um die Homogenität der Platten noch weiter zu erhöhen und die hohen Herstellungskosten zu senken, werden Überlegungen angestellt, die Mittellage der Massivholzplatten durch andere Werkstoffe, wie OSB, MDF oder Sperrholz, zu ersetzen (z.B. TOBISCH und KRUG [24]). In diesem Bericht werden ebenfalls Untersuchungen zu Platten mit substituierten Mittellagen vorgestellt. Es wurde die Formbeständigkeit im Differenzklima bestimmt, das Quellmass der Platten ermittelt, Eigenspannungen durch Freischneiden gemessen und die Rissbildung bei der Trocknung bestimmt. Zusätzlich werden erste Ansätze und Ergebnisse einer rechnerischen Ermittlung von Spannungen und Verformungen mittels der Finiten-Elemente-Methode präsentiert.

2 Experimentelle Untersuchungen

2.1 Einleitung

Es werden experimentelle Arbeiten an Massivholzplatten mit substituierten Mittellagen vorgestellt. Neben Vollholz-Platten aus Fichte wurden Platten mit geschlitzten Mittellagen und solche mit MDF, OSB und Spanplatte als Mittellage verwendet. Untersucht wurde der Plattenverzug im Differenzklima, die Rissbildung im Trockenklima und die Entwicklung feuchtebedingter Eigenspannungen und Quellung. Die Methodik wurde bereits im ersten Teilbericht vorgestellt und soll hier nur am Rande Thema sein. Die Temperatur der Klimaräume betrug konstant 20°C. Im folgenden werden die Klimate wie folgt bezeichnet:

- Trockenklima 35% rLF
- Normalklima: 65% rLF
- Feuchtklima: 85% rLF,

wobei mit rLF die relative Luftfeuchte bezeichnet sei.

2.2 Material

Tab. 1 enthält eine Zusammenstellung des für die Mittellagen verwendeten Materials. Die Deckschichten bestanden aus 10mm dicken Lagen aus Fichtenholz (*Picea abies* Karst.). Eine Ausnahme bilden hier die Platten mit geschlitzter Mittellage für die Versuchsreihe zur Bestimmung der Rissbildung, hier waren die Decklagen nur 7mm dick. Die Varianten VH0 und VH90 haben im Gegensatz zur Variante VH gezielt ausgerichtete Jahrringe. Der Winkel θ , der in Abb. 1 als Winkel in der RT-Ebene definiert ist, betrug 0° bzw. 90°.

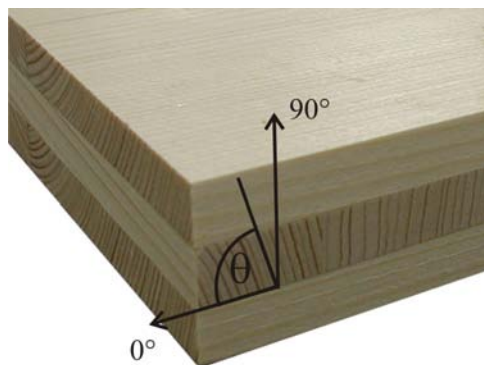


Abbildung 1: Massivholzplatte und Definition des Winkels θ

Tabelle 1: Für die Untersuchungen in der Mittellage verwendetes Material

Material	Dicke ML^a [mm]	Dichte ML^a [kg/m ³]	Dichte Platte [kg/m ³]	Bezeichnung
Spanplatte	15	650	520...550	FPY
MDF	15	530	475...490	MDF500
MDF	16	710	570...600	MDF700
OSB	16	620	510...530	OSB
Fichte geschlitz	15	400	420...435	VHS
Fichte	15	430	440...460	VH
Fichte	10	450	420...460	VH90
Fichte	10	435	410...450	VH0

^a Mittellage

2.3 Methoden

Die Abmessungen der Proben und die Klimabedingungen für die einzelnen experimentellen Untersuchungen sind in Tab. 2 zusammengefasst. Im folgenden werden die einzelnen Untersuchungen kurz beschrieben. Ausführliche Beschreibungen sind im 1. Teilbericht zu finden.

Tabelle 2: Probenabmessungen und Klimabedingungen

Versuch	Abmessungen [mm]	Ausgangsklima [% rLF]	Prüfklima [% rLF]
Plattenverzug	300 x 300	65	65/100
Eigenspannungen	240 x 240	35	35, 65, 85
Quellmass	240 x 240	35	85
Rissbildung	450 x 450	85	35

Plattenverzug

Die Formstabilität der Proben wurde im Differenzklima bestimmt. Dazu wurden die Proben in verschliessbaren Boxen gelagert, die mit Wasser gefüllt waren, wodurch an der Unterseite ein Klima von 100% rLF angenommen wird. Die an den Schmalseiten versiegelten Proben wurden an drei Punkten an der Unterseite gelagert. Die Oberseite war durch die Öffnung im Deckel der Boxen einem Klima von 65% rLF ausgesetzt.

Eigenspannungen

Die Eigenspannungen, die bei der Befeuchtung der Platten entstehen, wurden zu verschiedenen Zeitpunkten durch Freischneiden bestimmt. Dazu wurden die Proben zunächst im

Trockenklima gelagert und dann ins Normal- bzw. Feuchtklima überführt. Ausserdem wurden die Spannungen im Ausgangszustand aufgenommen. An den Proben wurden dazu zunächst die Ränder entfernt, womit sie noch eine Grösse von $200 \times 200 \text{ mm}^2$ hatten. Dann wurden sie in ca. 2cm breite Streifen aufgetrennt. Nach der Längenmessung (L_0) wurden die Streifen in den Klebfugen aufgetrennt. Es wurden die Abmessungen und das Gewicht aufgenommen, um auf Dichte, Dehnung und Feuchte zurückschliessen zu können. Zusätzlich wurde mittels Ultraschall die Schalllaufzeit durch die Probe (t_{Schall}) bestimmt, um den Elastizitätsmodul (E) mit

$$E = \left(\frac{L_1}{t_{Schall}} \right)^2 \cdot \rho \text{ [Nmm}^{-2}\text{]} \quad (1)$$

zu errechnen und daraus die mittlere Spannung (σ_{mean}) im freigeschnittenen Streifen ermitteln zu können:

$$\sigma_{mean} = E \cdot \epsilon_{mean} \quad \epsilon_{mean} = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \quad (2)$$

Hier entspricht ϵ der Dehnung, L_1 der Länge des freigeschnittenen Streifens und L_0 der Initiaallänge vor dem Freischneiden. Eine Transformation des dynamisch ermittelten E-Moduls in einen statischen wurde nicht vorgenommen, da hier die Varianten nur untereinander verglichen werden sollen. Gleichwohl ist anzumerken, dass mit dem dynamischen E-Modul die wahre Steifigkeit um ca. 20% in longitudinaler Richtung (KEUNECKE et al. [8]) überschätzt wird.

Quellmass

Die zuvor im Trockenklima bei 35% rLF gelagerten Platten wurden in das Feuchtklima mit 85% rLF überführt und deren Quellung mittels induktiver Wegaufnehmer 21 Tage lang in den drei Richtungen aufgezeichnet. Die Proben wurden auf drei Punktaufleger gelegt, die in die Gewindebohrungen einer Rasterplatte geschraubt waren. Somit wurden einerseits Reibungseinflüsse aus der Bewegung der Platten minimiert, andererseits wurde ein Abstand geschaffen, womit eine gleichmässige Luftzufuhr an die Proben gewährleistet war. Um die Bewegung der Proben über die gesamte Höhe zu messen, wurden in die Oberseite an alle vier Seiten Schrauben eingedreht, die über die gesamte Probenhöhe in die Platten reichten. Die Proben wurden an einer Seite angeschlagen, an der Schraube auf der gegenüberliegenden Seite wurde die Verformung abgenommen (Abb. 2).

Rissbildung

Die auftretenden Risse in der Oberfläche und den Schmalseiten vormals im Feuchtklima gelagerter Platten wurde zu verschiedenen Zeitpunkten im Trockenklima aufgenommen.

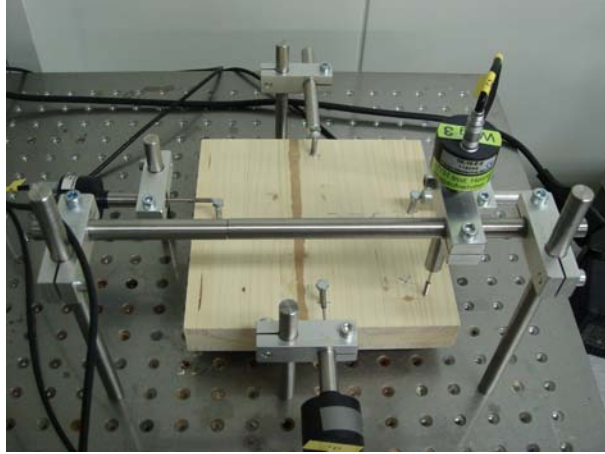


Abbildung 2: Versuchsaufbau zur Bestimmung der freien Quellung

2.4 Ergebnisse

2.4.1 Plattenverzug

Es wird der Wert ξ als Summe der absoluten Verformungen in Dickenrichtung der 9 Messpunkte aus Abb. 12 ermittelt, d.h.

$$\xi = \sum_{i=A}^J |u_z^i| \quad (3)$$

Hier ist u_z^i die Verformung in z-Richtung im Punkt i . Um einen Überblick über die Größenordnung der Biegeverformung zu erhalten, wurde der Wert cup_{yz} als

$$cup_{yz} = \frac{1}{2} (\bar{u}_z^{A,B,C} + \bar{u}_z^{G,H,J}) + \bar{u}_z^{D,E,F} \quad (4)$$

berechnet. Dieser beschreibt die Verformung in der yz-Ebene, welches die Hauptverformungsrichtung darstellt. Im Ausdruck $\bar{u}_z^i$ weist der Balken auf den Mittelwert der Verformung in den Punkten i hin.

In Abb. 3 ist der Verlauf der Formänderung ξ nach Gleichung 3 dargestellt. Vergleicht man die Varianten aus Vollholz (VH, VH90, VH0) fällt auf, dass bei dünneren Platten früher ein Maximalwert der Verformung erreicht wird. Bei diesen Platten war teilweise ein Rückgang der Verformung zu beobachten, was damit zusammenhängt, dass auch die Mittellagen durchfeuchten und durch ihre Quellung der Gesamtverformung entgegenwirken. Die Werte für die Platten mit Holzwerkstoffmittellagen erreichten im Untersuchungszeitraum nicht ihr Maximum. Die höchsten Verformungen wurden an Platten mit MDF500 und Spanplatte als Mittellage gemessen. Auch die Variante MDF700 zeigte sich wenig formstabil. Dieses Bild spiegelt sich auch in der Abb. 4 wider, in der Werte für ξ und

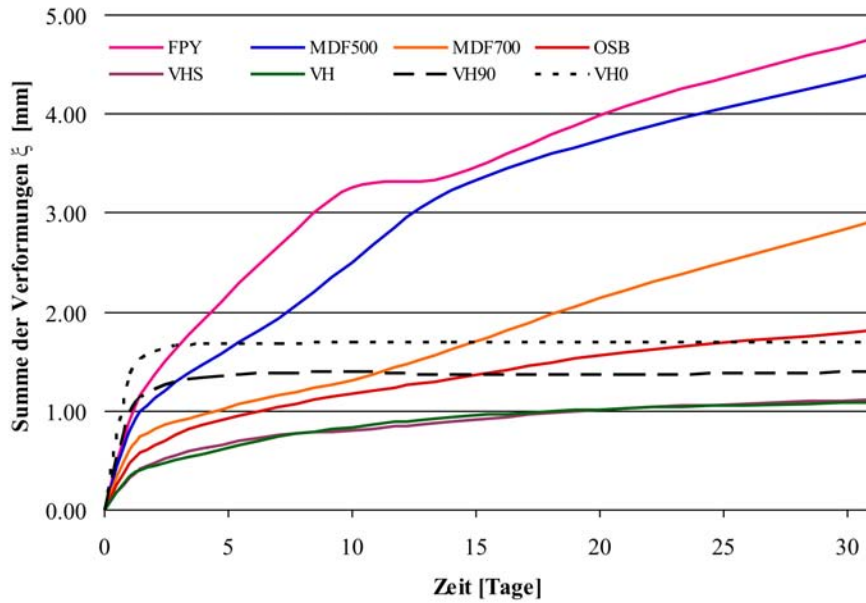


Abbildung 3: Verlauf der Formänderung ξ über der Zeit

cup_{yz} am Ende des Untersuchungszeitraums nach 31 Tagen dargestellt sind. Zusammengefasst sind die Werte vom Ende des Untersuchungszeitraums auch in Tab. 3.

Bei der Lagerung im Differenzklima nimmt die Decklage auf der dem Feuchtklima zugewandten Seite Feuchtigkeit auf. Im Rest der Platte findet zu Beginn noch keine Feuchteänderung statt. Somit kommt es zur Ausbildung eines ausgeprägten Feuchteprofils über den Plattenquerschnitt. Dieses verschiebt sich im Laufe der Zeit weiter ins Platteninnere. Aufgrund des höheren Quellmasses senkrecht zur Faserrichtung dehnt sich die befeuchtete Lage vor allem in Richtung der Nebenachse der Platte aus. Dies wird durch die Mittellage, die in dieser Richtung ein deutlich geringeres Quellmass aufweist, verhindert. Als Resultat entstehen zwischen den beiden Lagen Spannungen, die Platte wölbt sich in

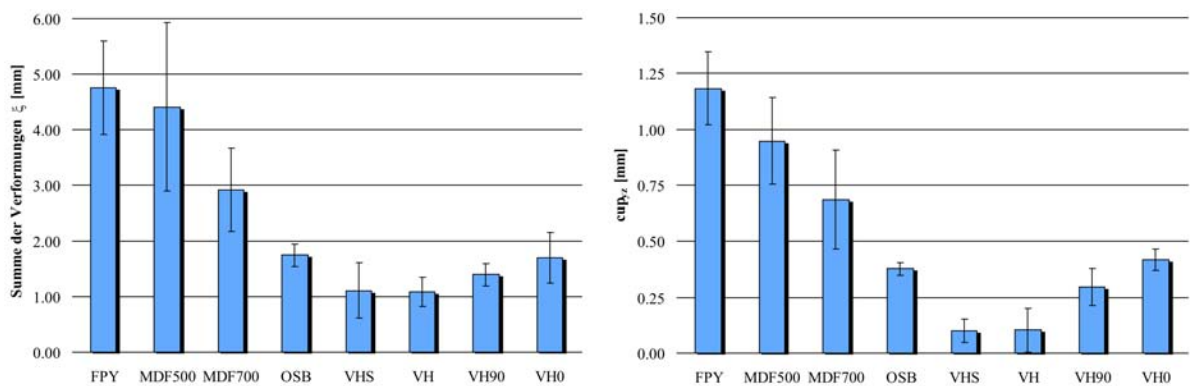


Abbildung 4: Summe der Verformungen ξ und Biegeverformung cup_{yz} nach 31 Tagen

Tabelle 3: Verformungswerte nach 31 Tagen im Differenzklima 65/100% rLF

Variante	n	ξ [mm]		cup_{yz} [mm]		Holzfeuchten [%]		
		$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	ω_0^a	ω_{end}^b	$\Delta\omega$
FPY	3	4.76	0.84	1.18	0.16	10.8	16.2	5.5
MDF500	3	4.41	1.52	0.95	0.19	11.3	17.8	6.5
MDF700	3	2.92	0.75	0.69	0.22	11.2	16.5	5.4
OSB	3	1.75	0.21	0.38	0.03	11.2	17.2	6.0
VHS	3	1.11	0.49	0.10	0.05	11.6	18.0	6.4
VH	3	1.09	0.27	0.10	0.10	11.4	18.2	6.7
VH90	6	1.40	0.20	0.30	0.08	14.0	18.2	4.2
VH0	6	1.70	0.45	0.42	0.05	13.8	17.9	4.1
^a ω_0 - Anfangsfeuchte		^b ω_{end} - Endfeuchte						

der yz-Ebene. In der Decklage entstehen Druck-, in der Mittellage Zugspannungen. Die Spannungen werden zu Beginn dadurch verstärkt, dass sich in der Mittellage noch keine Feuchteänderung vollzogen hat. Es kommt durch die Verformung der befeuchteten Decklage also zu einer Biegebelastung senkrecht zur Faserrichtung der Decklagen. Da in dieser Richtung die Decklagen einen geringeren E-Modul aufweisen als die Mittellagen (vgl. Tab. 4), kann die Decklage auf der dem Normalklima zugewandten Seite die Verformung nur wenig behindern. Daher hängt die Formstabilität der Platten in hohem Masse davon ab, inwieweit die Mittellage in der Lage ist, die Verformung der befeuchteten Decklage zu verhindern. Dabei kommt dem E-Modul der Mittellage in Richtung der Nebenachse der Platte eine hohe Bedeutung zu. Vergleicht man die E-Moduln der Mittellagenmaterialien entlang ihrer Ausrichtung zur Nebenachse der Platte, so bestätigt sich diese Vermutung (Tab. 4).

Tabelle 4: Zusammenhang zwischen E-Modul der Mittellagenmaterialien und der Summe der Verformungen in Richtung der Nebenachse nach 31 Tagen

Variante	Verhältnis E-Modul	Verhältnis Verformung
	Fichte _{long} [1] : HWS _{Plattenebene} ^a [20]	HWS ^a : VH
FPY	3.99	3.88
MDF500	4.76	4.05
MDF700	2.51	2.68
OSB	1.99	1.66
^a HWS - Holzwerkstoff		

2.4.2 Eigenspannungen

Hier wurden nur Spannungen senkrecht zur Faser gemessen, da in vorhergehenden Untersuchungen eine grosse Streuung bei Messungen in Faserrichtung festgestellt werden konnte. Diese zeigt sich auch bei den Holzwerkstoffmittellagen aufgrund des hier wie bei Vollholz in longitudinaler Richtung geringen Quellmasses.

In Abb. 5 sind die zeitlichen Entwicklungen der Eigenspannungen in den Decklagen der einzelnen Varianten nach Einlagerung ins Normal- bzw. Feuchtklima dargestellt. Vor der Überführung in die Prüfklimате wurden in den Decklagen unabhängig vom Material der Mittellage Zugspannungen festgestellt (entspricht hier Tag 0), zu den restlichen Zeitpunkten ausnahmslos Druckspannungen. Dies konnte aufgrund der Aufsnittrichtung erwartet werden und deckt sich mit früheren Untersuchungen (CLAUSS[5], NIEMZ und WANG [15]). Wie erwartet waren die Spannungen aufgrund der höheren Quellung im Feuchtklima grösser als im Normalklima. In beiden Klimaten steigen die Druckspannungen in den ersten Tagen nach Einlagerung in das feuchtere Klima stark an. Das Maximum wird meist nach 7 oder 14 Tagen erreicht. Zum Ende des Untersuchungszeitraums nimmt der Betrag der Spannung dann wieder ab. In den Platten mit substituierter Mittellage entstehen höhere Spannungen im Vergleich zur Vollholzplatte. Auch ergeben sich keine Vorteile durch geschlitzte Mittellagen.

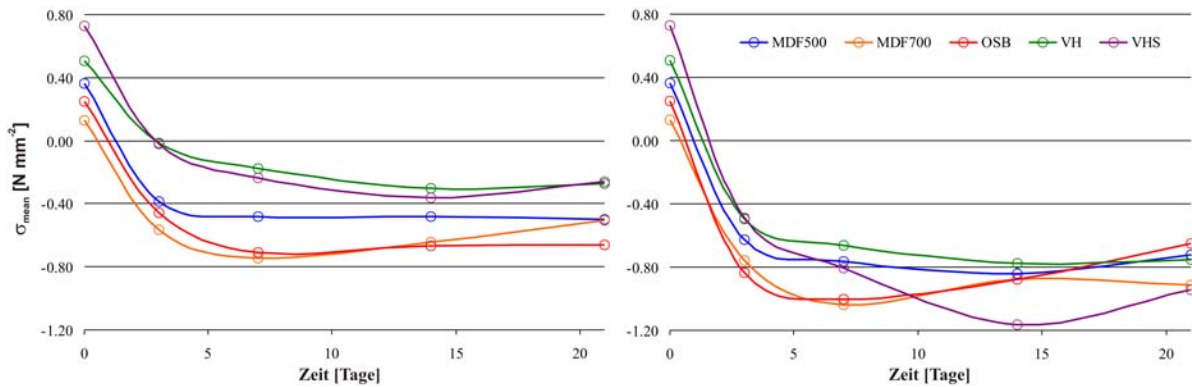


Abbildung 5: Spannungsentwicklung in den Decklagen bei Überführung vom Trocken- ins Normalklima (links) bzw. Feuchtklima (rechts)

In Tab. 5 werden die Messungen am Tag 21 ausgewertet. Bei der Variante VHS wurden nur die Decklagen betrachtet. Die Dehnungen in den Holzwerkstoffmittellagen sind klein im Vergleich zu den Dehnungen im Vollholz. Die Standardabweichungen liegen hier deutlich über den sich ergebenden Mittelwerten, weshalb eine Auswertung schwierig ist. Im Mittel ergeben sich teilweise Zugspannungen in den Mittellagen, was aber aufgrund der hohen Streuung der Werte und der geringen Probenanzahl unkommentiert bleiben soll.

Tabelle 5: Werte für Elastizitätsmodul E , Dehnung ϵ , Spannung σ senkrecht zur Faserrichtung und Feuchteentwicklung $\Delta\omega = \omega_{21} - \omega_0$ nach 21 Tagen im Feuchtklima

Variante	Schicht ^a	$E [Nmm^{-2}]$		$\epsilon [-]$		$\sigma [Nmm^{-2}]$		$\Delta\omega [\%]$
		$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$
MDF500	DL	316.4	44.9	$-2.3 \cdot 10^{-3}$	$5.3 \cdot 10^{-4}$	-0.72	0.14	6.5
	ML	2153.3	30.7	$-5.6 \cdot 10^{-5}$	$1.7 \cdot 10^{-4}$	-0.12	0.36	4.3
MDF700	DL	351.7	227.2	$-2.8 \cdot 10^{-3}$	$5.9 \cdot 10^{-4}$	-0.91	0.36	6.2
	ML	4171.4	89.4	$4.0 \cdot 10^{-5}$	$7.8 \cdot 10^{-5}$	0.17	0.32	1.7
OSB	DL	277.9	81.3	$-2.4 \cdot 10^{-3}$	$5.7 \cdot 10^{-4}$	-0.65	0.13	5.9
	ML	5451.6	633.2	$6.9 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	0.39	0.85	3.3
VHS	DL	334.2	85.0	$-3.0 \cdot 10^{-3}$	$7.9 \cdot 10^{-4}$	-0.94	0.17	6.0
VH	DL	347.0	54.1	$-2.2 \cdot 10^{-3}$	$2.2 \cdot 10^{-4}$	-0.75	0.17	5.8
	ML	275.0	7.2	$-4.1 \cdot 10^{-3}$	$3.6 \cdot 10^{-4}$	-1.12	0.10	5.5

^a DL - Decklage, ML - Mittellage

Die Auswertung der Holzfeuchten (Abb.: 6) zeigt die sich angleichende Feuchte der Mittellagen an die Decklagen mit der Zeit. Erwartungsgemäss lagen die Feuchten der Holzwerkstoffe unter der von Vollholz. Der Verlauf ist im Normalklima qualitativ zu dem im Feuchtklima allerdings mit niedrigeren Werten. Die Decklagen nehmen am Anfang schnell Feuchte auf, nach wenigen Tagen verlangsamt sich dieser Prozess. Somit ist auch der schnelle Spannungsanstieg am Anfang des Untersuchungszeitraums begründet. Durch die Quellung der befeuchteten Decklagen entstehen dort senkrecht zur Faser Druckspannungen aus der Behinderung durch die Mittellage. Nimmt auch die Mittellage Feuchte auf, beginnt auch diese zu quellen, wodurch die Spannungen in den Decklagen trotz dort noch steigender Holzfeuchte nicht nennenswert ansteigen oder gar kleiner werden.

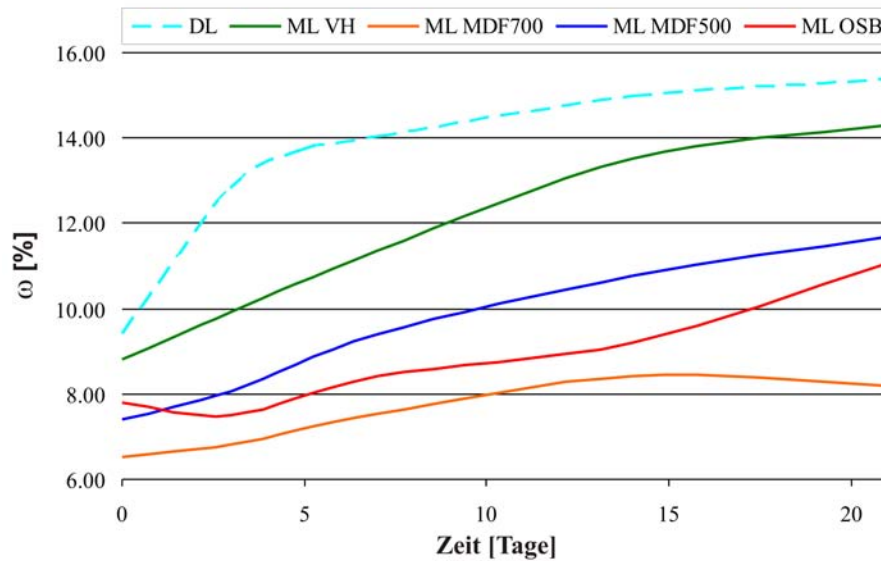


Abbildung 6: Zeitliche Entwicklung der Feuchte in den Deck- (DL) und Mittellagen (ML) im Feuchtklima

Die Diagramme in Abb. 7 zeigen die Holzfeuchte- und Spannungsentwicklung über der Plattenbreite in den Vollholzmittellagen der Variante VH. Zunächst steigen Feuchte und Spannung im Randbereich an, um sich nach 14 Tagen über dem Querschnitt auszugleichen. Zwischen den Messungen nach 14 und 21 Tagen steigt die Feuchte zwar an, aber die Druckspannungen nehmen wieder ab. Dies hängt mit der sich ausgleichenden Feuchte zwischen Deck- und Mittellage zusammen. Auch ist es denkbar, dass vermehrt plastische Verformungen im Material auftreten, die mit der Methode des Freischneidens nicht gemessen werden können.

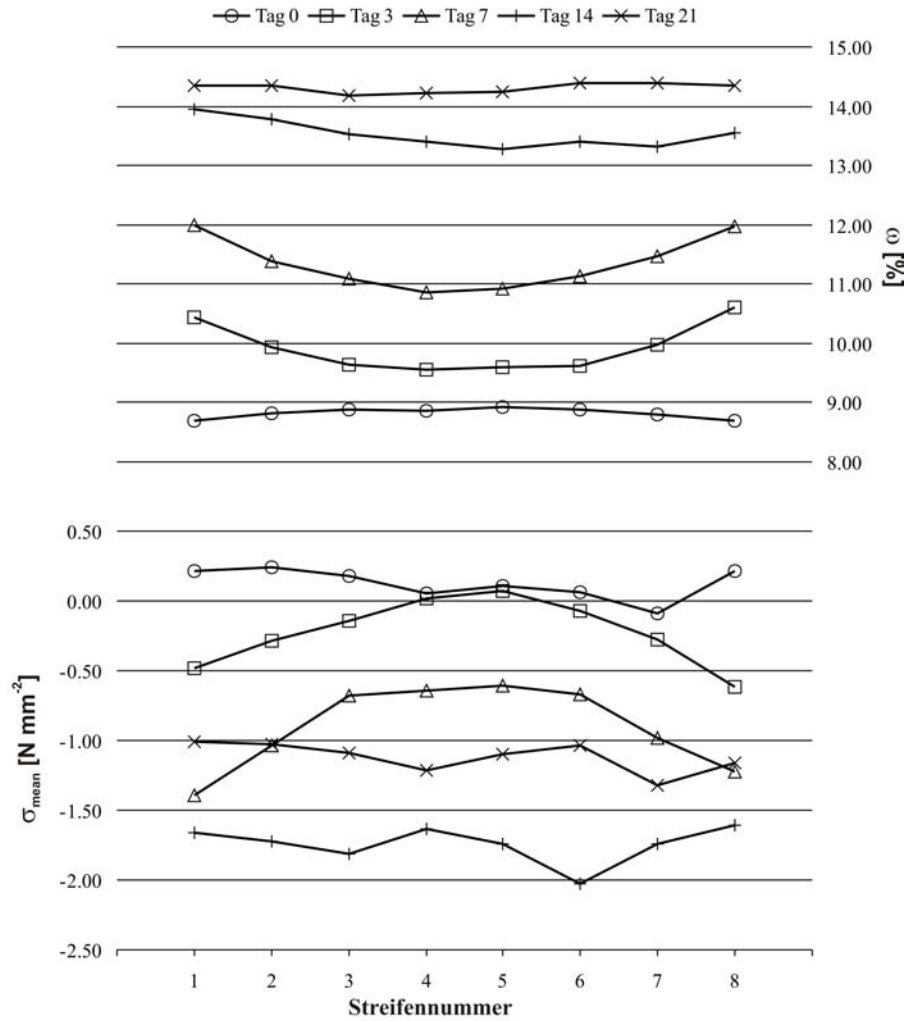


Abbildung 7: Holzfeuchte- und Spannungsverteilung über der Platte in den Vollholzmittellagen der Variante VH im Feuchtklima

2.4.3 Quellmass

Das Quellmass Q_{35-85} ergibt sich aus der Längenänderung im Klima 85% rLF bezogen auf die Ausgangslänge im Klima 35% rLF als

$$Q_{35-85} = \frac{l_{85} - l_{35}}{l_{35}} \quad [\%] \quad (5)$$

In Tab. 6 sind die ermittelten Quellmasse nach 21 Tagen und die Feuchteänderungen während dieser Zeit wiedergegeben. Da bei VHS die Feuchten der Mittellagen nicht bestimmt wurden, wurde die Gesamtfeuchte der Feuchte der Decklagen gleich gesetzt, was aufgrund der Feuchteaufnahme der Mittellage in den Schlitzten gerechtfertigt ist. Deutlich wird, dass die prozentuale Dickenquellung erheblich höher ist als die Quellung in Plattenebene. Erwartungsgemäss ist die Breitenquellung grösser als jene in Längsrichtung.

Tabelle 6: Quellmass und Feuchteänderung nach 21 Tagen Lagerung im Feuchtklima, Ausgangsklima: 35% rLF

Variante	Quellmass Q_{35-85} [%]			$\Delta\omega$
	Länge	Breite	Dicke	[%]
MDF500	0.062	0.346	2.707	5.56
MDF700	0.040	0.142	1.756	4.16
OSB	0.045	0.086	1.889	4.76
VHS	0.044	0.199	2.298	(6.00) ^a
VH	0.044	0.159	2.106	5.64
^a Annahme				

Die Variante MDF500 erreicht die höchsten Quellwerte, OSB und MDF700 liegen unter der von Vollholz. Durch die höhere Diffusionsgeschwindigkeit bei MDF500 kommt es hier zu einer grösseren Quellung, langfristig sind allerdings bei MDF700 aufgrund der grösseren Dichte höhere Quellwerte zu erwarten. Die Variante mit geschlitzten Mittellagen quillt mehr als VH, da durch die Schlitzte eine grössere Oberfläche entsteht und damit die Schichten mehr Feuchte aufnehmen können. Da hier bei allen Varianten noch kein Ausgleichszustand erreicht ist, was einerseits an den noch ansteigenden Kurvenverläufen abgelesen werden kann und andererseits am Vergleich der Holzfeuchten mit in der Literatur angegebenen Ausgleichsfeuchten abzuschätzen ist, liegt der Verlauf für VHS im hier vorliegenden Untersuchungszeitraum über der von VH. Deshalb kann auch nicht genau abgeschätzt werden wie das Verhalten von VHS im Vergleich zu VH bei kongruenten Feuchtegehalten wäre bzw. wie der Quellungszustand bei Erreichen der Ausgleichsfeuchte beider Varianten wäre. In Abb. 8 sind die Verläufe für die Dickenquellung dargestellt.

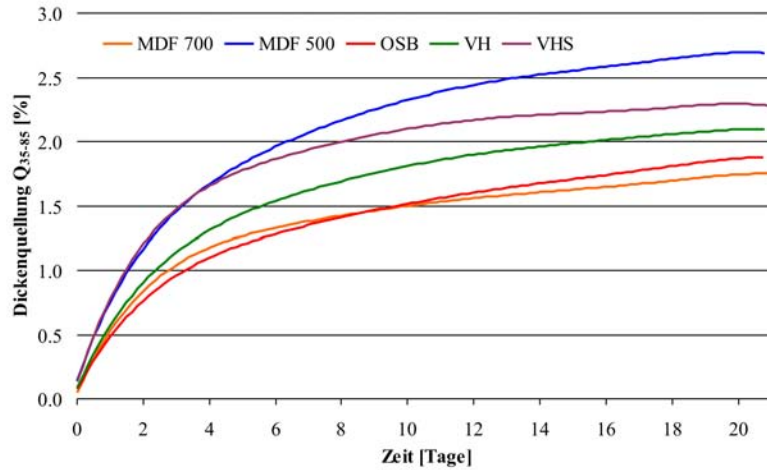


Abbildung 8: Quellungsverlauf in Dickenrichtung

Ein besseres Bild bietet sich, wenn man die prozentuale Quellung Q auf die Feuchteänderung bezieht. Es ergibt sich das differentielle Quellmass in % Längenänderung pro % Feuchteänderung als

$$\alpha = \frac{Q}{\Delta\omega} \quad [\%/ \%] \quad (6)$$

Die so erhaltenen Werte sind in Tab. 7 zusammengefasst. Betrachtet man nun die dominierende Dickenrichtung ergeben sich aufgrund der niedrigeren Feuchten höhere differentielle Quellwerte für die Platten mit Holzwerkstoffmittellage im Vergleich zur Vollholz-Variante. Bei einer Annahme von $\Delta\omega = 6.0\%$ für VHS ergeben sich Quellwerte, die auf dem Niveau von VH liegen.

Tabelle 7: Differentielles Quellmass nach 21 Tagen Lagerung im Feuchtklima, Ausgangsklima: 35% rLF

Variante	Differentielles Quellmass α_{35-85} [%/ %]		
	Länge	Breite	Dicke
MDF500	0.011	0.062	0.485
MDF700	0.010	0.034	0.420
OSB	0.010	0.018	0.397
VHS	(0.007)	(0.033)	(0.383)
VH	0.008	0.028	0.373

2.4.4 Rissbildung

In Abb. 9 ist die Entwicklung der Risse in den Decklagen dargestellt. Dabei wurden die Längen sämtlicher Risse aufsummiert und von den Probekörpern die Mittelwerte gebildet.

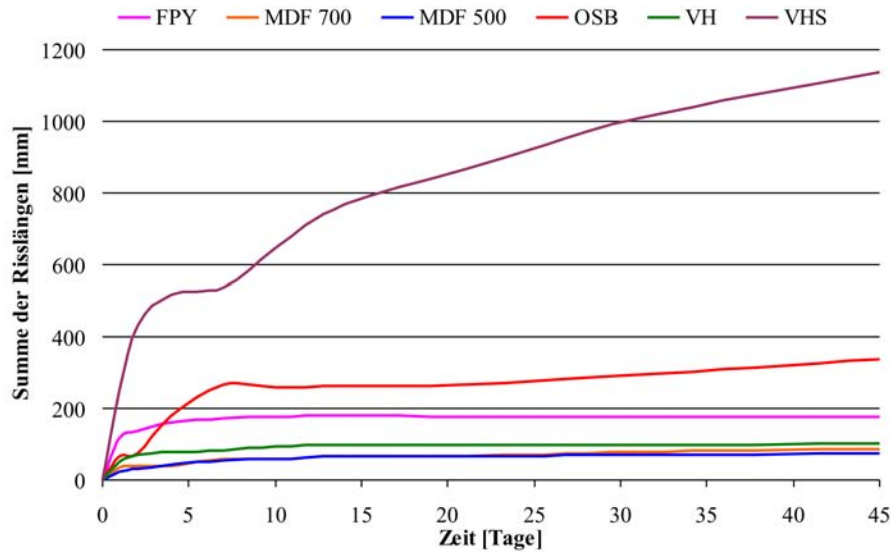


Abbildung 9: Verlauf der Rissbildung auf den Decklagen nach Lagerung im Trockenklima

Es zeigten sich bei einer Trocknung der Platten bereits nach 24 Stunden Risse. Allerdings ergaben sich im weiteren Verlauf deutliche Unterschiede zwischen den Varianten. Bei der Variante VHS wurden die meisten Risse festgestellt, was mit der hier verwendeten dünneren Decklagendicke und dem schnelleren Austrocknen durch die Schlitzung zu begründen ist. Die Varianten MDF500, MDF700, FPY und VH zeigten nach der Rissbildung zu Beginn der Messung so gut wie keine Änderung mehr. Bei OSB war auch im weiteren Verlauf noch eine Risszunahme zu beobachten. Dies erklärt sich mit dem geringsten Quellmass von OSB in Herstellungsrichtung (SCHREIBER et al. [20], SCHWAB et al. [21]) und der damit verbundenen höheren Schwindbehinderung der Deckschichten. Vorwiegend traten Risse zwischen den Lamellen der Deckschichten auf. Aufgrund der zufälligen Jahrringausrichtung kam es häufig zu Unterschieden in der Jahrringlage benachbarter Lamellen. Da das Schwindmass in tangentialer Richtung doppelt so hoch ist als in radialer Richtung, entstanden auch zwischen den Lamellen Spannungen und es entstanden Risse in den Klebfugen zwischen zwei Lamellen. Innerhalb der Lamellen entstanden die Risse bevorzugt in radialer Richtung (Abb. 10). Die geringe Rissbildung an der Oberfläche der MDF-Varianten erklärt sich mit einem Spannungsabbau in den Mittellagen. Faserplatten weisen über den Querschnitt ein herstellungsbedingtes Dichteprofil auf. In den Mittelschichten entstehen durch die Behinderung im Plattenverbund Schubspannungen, die an der Dichtegrenze der Faserplatten zu Rissen führen (Abb. 11). Zunächst erfolgte die Rissbildung entlang der Nebenachse, diese Risse schlossen sich wieder und es bildeten sich Risse entlang der Hauptachse also in Richtung der Fasern der Deckschichten. Nach Be-

gutachtung der Randlamellen konnte festgestellt werden, dass sich die Rissbildung entlang der Hauptachse an solchen Platten besonders stark ausbildete, bei denen die Randlamelle mit der kernzugewandten Seite mit der Mittellage verbunden war. Somit entwickeln sich bei diesen Platten am Rand Zugspannungen senkrecht zur Plattenebene. Diese verstärken die Spannungen, die sich zwischen den Deck- und Mittelschichten der MDF-Platten entwickelt haben. Die so entstandenen Scher- und Querspannungen werden so gross, dass es zu Rissen entlang der Hauptachse der Massivholzplatten kommt. Durch diese Risse werden die Spannungen entlang der Nebenachse abgebaut. Somit schliessen sich die Risse dort wieder, während die Risse entlang der Hauptachse grösser werden. Bei Spannplatte und OSB wird dieser Effekt des Spannungsabbaus in den Mittellagen auch vermutet. Allerdings konnte dieser aufgrund der unregelmässigen Oberfläche nicht nachgewiesen werden.



Abbildung 10: Rissbildung in den Decklagen bei der Variante VHS (links Risse zwischen den Lamellen, rechts: Risse innerhalb Lamellen)



Abbildung 11: Risse in den MDF-Mittellagen nach Lagerung im Trockenklima

3 Numerische Simulation

3.1 Modellierung des Feuchtetransportes in Holz

Holz ist ein hygroskopischer Werkstoff, d.h. es nimmt bei Änderung der Umgebungsbedingungen Feuchte auf bzw. gibt diese ab. Die Holzfeuchte ω ist definiert als Masse des im Holz gebundenen Wassers bezogen auf die Darrmasse m_0 des Holzes als

$$\omega = \frac{m(\omega) - m_0}{m_0} \quad (7)$$

Die Feuchte, die sich bei einer bestimmten relativen Luftfeuchte einstellt, wird als Gleichgewichtsfeuchte bezeichnet. Der Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchte und Holzfeuchte wird in sogenannten Sorptionsisothermen beschrieben. Von KOLLMANN [9] wurde für mitteleuropäisches Nadelholz der Zusammenhang

$$\omega(\varphi) = 0.113 \cdot \varphi^{0.54} + 0.192 \cdot e^{(-0.5(2.7(\varphi-1)-1)^2)} + 0.09 \cdot e^{(-0.5(20.5(\varphi-1)-1)^2)} \quad (8)$$

für eine Temperatur von 25°C gefunden, worin mit φ die relative Luftfeuchte bezeichnet wird. Durch den grossen Porenanteil des Holzes von ca. 50-60% kann Holz Wasser aus der Luft absorbieren und im Material weiterleiten. Die Sorption unterhalb des Fasersättigungspunktes kann als Diffusionsproblem betrachtet werden (NIEMZ [14]). Ändert sich das Diffusionsvolumen nicht mit der Zeit, spricht man von stationärer Diffusion, die mit dem 1. Fick'schen Gesetz

$$q = -D \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (9)$$

beschrieben werden kann. Hierin ist q [$mol \ m^2 \ s^{-1}$] der Diffusionsfluss, D [$m^2 \ s^{-1}$] der Diffusionskoeffizient des Materials und ϕ [$mol \ m^{-3}$] die Konzentration entlang des Diffusionsweges x [m]. Da sich der Feuchtegehalt von Holz mit der Zeit ändert, ändern sich auch die physikalischen Eigenschaften des Holzes. Der instationäre Feuchtetransport kann mit dem 2. Fick'schen Gesetz

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D(\omega) \frac{\partial \omega}{\partial x} \quad (10)$$

beschrieben werden. Da sich die Ausgleichsfeuchte an der Oberfläche nicht sofort einstellt, muss ein Feuchteübergangskoeffizient S durch

$$q = S(\omega) (\omega_{air} - \omega_{surface}) \quad (11)$$

an der Oberfläche berücksichtigt werden. Hierin beschreibt q [$kg \ m^3$] den Feuchtefluss durch die Oberfläche, ω_{air} ist die Gleichgewichtsfeuchte nach Gleichung (8) und $\omega_{surface}$ symbolisiert den Feuchtegehalt an der Holzoberfläche.

3.2 Modellierung feuchtebedingter Spannungen und Dehnungen

Das Materialmodell zur Berechnung von Spannungen und Verformungen berücksichtigt elastische Dehnungen, feuchtebedingtes Quellen und Schwinden und mechano-sorptive Dehnungen. Da in dieser Studie keine Trocknungsprozesse betrachtet werden, ist im Folgenden nur noch von Quellen die Rede. Prinzipiell kann das Materialmodell auch auf Schwindverformungen angewandt werden, dann allerdings mit teilweise veränderten Materialwerten. Die gesamte Dehnungsrate $\dot{\epsilon}$ setzt sich somit zusammen aus elastischer Dehnungsrate $\dot{\epsilon}_{el}$, Quell-Dehnungsrate $\dot{\epsilon}_{\omega}$ und mechano-sorptiver Dehnungsrate $\dot{\epsilon}_{\omega\sigma}$, d.h.

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{el} + \dot{\epsilon}_{\omega} + \dot{\epsilon}_{\omega\sigma} \quad (12)$$

womit die Änderung der Dehnung über die Zeit beschrieben ist. Die elastische Dehnung kann mit Hilfe des Hooke'schen Gesetzes als

$$\epsilon_{el} = C\sigma \quad (13)$$

beschrieben werden. Hier symbolisieren ϵ_{el} und σ die elastischen Dehnungs- und Spannungsvektoren. Mit der Materialmatrix C nimmt Gleichung (13) für orthotropes Material, als das Holz betrachtet werden kann, folgende Form an (z.B. BODIG und JAYNE [4]):

$$\begin{bmatrix} \epsilon_L^e \\ \epsilon_R^e \\ \epsilon_T^e \\ \gamma_{LR}^e \\ \gamma_{LT}^e \\ \gamma_{RT}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_L^{-1} & -\nu_{RL}E_R^{-1} & -\nu_{TL}E_T^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{LR}E_L^{-1} & E_R^{-1} & -\nu_{TR}E_T^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{LT}E_L^{-1} & -\nu_{RT}E_R^{-1} & E_T^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{LR}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{LT}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{RT}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{LR} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{RT} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Die Parameter E_L , E_R und E_T bezeichnen die Elastizitätsmoduln in den drei orthotropen Richtungen longitudinal zu den Fasern und radial und tangential zu den Jahrringen. G_{LR} , G_{LT} und G_{RT} sind die Schubmoduln in den orthotropen Ebenen und ν_{LR} , ν_{RL} , ν_{LT} , ν_{TL} , ν_{RT} und ν_{TR} sind die Poissonschen Konstanten. Die Matrix C kann als symmetrisch betrachtet werden, somit ergibt sich: $\nu_{RL} = \frac{E_R}{E_L}\nu_{LR}$, $\nu_{TL} = \frac{E_T}{E_L}\nu_{LT}$ und $\nu_{TR} = \frac{E_T}{E_R}\nu_{RT}$. Die elastische Dehnungsrate $\dot{\epsilon}_{el}$ erhält man nach Differentiation von Gleichung (13)

$$\dot{\epsilon}_{el} = C\dot{\sigma} + \dot{C}\sigma \quad (15)$$

Die Quelldehnung ist definiert als

$$\dot{\epsilon}_{\omega} = \alpha\dot{\omega} \quad (16)$$

worin $\dot{\omega}$ den Wert der Feuchteänderung über der Zeit darstellt. Die Quellkoeffizienten gehen in die Matrix α ein:

$$\alpha^T = \begin{bmatrix} \alpha_L & \alpha_R & \alpha_T & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Der mechano-sorptive Effekt wurde in mehreren Studien beschrieben (z.B. RANTA-MAUNUS [17], HUNT [7] und MÅRTENSSON [12]). Damit wird der Effekt bezeichnet, dass die Verformung einer belasteten trocknenden Probe grösser ist als die Summe der Verformungen von trocknender Probe ohne mechanische Belastung und die Verformung derselben Probe mit reiner mechanischer Last. Für den Anteil der mechano-sorptiven Dehnung wird ein Ausdruck von RANTA-MAUNUS [17] verwendet:

$$\dot{\epsilon}_{\omega\sigma} = m\sigma |\dot{\omega}| \quad (18)$$

Die mechano-sorptive Materialmatrix m ist definiert als

$$m = \begin{bmatrix} m_L & -\mu_{RL}m_R & -\mu_{TL}m_T & 0 & 0 & 0 \\ -\mu_{LR}m_L & m_R & -\mu_{TR}m_T & 0 & 0 & 0 \\ -\mu_{LT}m_L & -\mu_{RT}m_R & m_T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{LR} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{LT} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{RT} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Hierin sind m_L , m_R , m_T , m_{LR} , m_{LT} und m_{RT} sind Koeffizienten in den orthotropen Richtungen und Ebenen und μ_{LR} , μ_{RL} , μ_{LT} , μ_{TL} , μ_{RT} und μ_{TR} beschreiben die Kopplung zwischen den Richtungen. Die Matrix m ist symmetrisch, was zu den Beziehungen $\mu_{RL} = \frac{m_L}{m_R}\mu_{LR}$, $\mu_{TL} = \frac{m_L}{m_T}\mu_{LT}$ und $\mu_{TR} = \frac{m_R}{m_T}\mu_{RT}$ führt.

3.3 Modellvalidierung

3.3.1 Materialeigenschaften

Soweit nicht anders angegeben, handelt es sich bei den hier angegebenen Materialwerten um aus der Literatur entnommene Werte für Fichtenholz. Da bei den durchgeführten Experimenten die Temperatur konstant war, wird bei den in das Rechenprogramm eingesetzten Materialwerten lediglich eine Abhängigkeit von der Feuchte mit einbezogen. Es sei angemerkt, dass teilweise auch eine Abhängigkeit der Materialwerte von der Temperatur besteht.

Der Diffusionskoeffizient zur Beschreibung der Feuchtetransportvorgänge in Holz (siehe Gleichung (10)) ist feuchteabhängig und unterschiedlich in den drei Richtungen. Für die

radiale und tangential Richtung werden Werte nach VANEK und TEISCHINGER [25] eingesetzt:

$$\begin{aligned} D_R(\omega) &= 3.6 \cdot 10^6 e^{(-0.33901\omega - 5.58446 - 7.88753\omega^{-1})} & [mm^2 h^{-1}] \\ D_T(\omega) &= 3.6 \cdot 10^6 e^{(-0.001193 \omega^2 - 0.10257\omega - 7.05240)} & [mm^2 h^{-1}] \end{aligned} \quad (20)$$

Die Formulierung in longitudinaler Richtung wurde nach SIAU [22] zu

$$D_L(\omega) = 2.5 D_R(\omega) \quad [mm^2 h^{-1}] \quad (21)$$

gewählt. Eine feuchteabhängige Formulierung des Feuchteübergangskoeffizienten S , womit die Randbedingung an der Oberfläche nach Gleichung (11) beschrieben wird, findet sich z.B. in HANHIJÄRVI [6].

$$S(\omega) = 0.1152 \cdot e^{4\omega} \quad [mm h^{-1}] \quad (22)$$

Eine feuchteabhängige Formulierung der elastischen Parameter E , G und ν wird z.B. in NEUHAUS [13] vorgestellt. Es werden Polynome der Form

$$y(\omega) = a_1 + a_2\omega + a_3\omega^2 + a_4\omega^3 \quad (23)$$

verwendet. Die Koeffizienten a_1 bis a_4 sind in Tab. 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Koeffizienten nach Gleichung (23)

Parameter	Einheit	a_1	a_2	a_3	a_4
E_L	Nmm^{-2}	12791.75	15.22	-9.01	$1.9 \cdot 10^{-1}$
E_R	Nmm^{-2}	999.64	3.61	-2.09	$4.7 \cdot 10^{-2}$
E_T	Nmm^{-2}	506.08	5.00	-1.35	$3.0 \cdot 10^{-2}$
G_{LR}	Nmm^{-2}	762.80	5.93	-1.99	$4.8 \cdot 10^{-2}$
G_{LT}	Nmm^{-2}	880.75	1.39	-1.39	$2.8 \cdot 10^{-2}$
G_{RT}	Nmm^{-2}	61.33	-1.07	$-6.0 \cdot 10^{-2}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$
ν_{LR}	-	$2.3 \cdot 10^{-1}$	$-8.6 \cdot 10^{-3}$	$2.9 \cdot 10^{-3}$	$-7.9 \cdot 10^{-5}$
ν_{LT}	-	$2.9 \cdot 10^{-1}$	$-4.1 \cdot 10^{-2}$	$7.2 \cdot 10^{-3}$	$-1.6 \cdot 10^{-4}$
ν_{RT}	-	$1.5 \cdot 10^{-1}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$4.0 \cdot 10^{-4}$	$1.9 \cdot 10^{-5}$

Die Quellungskoeffizienten α , die den Wert der Längenänderung bei einer Änderung der Holzfeuchte um 1% angeben, wurden als Konstanten gewählt, d.h. eine Abhängigkeit von der Feuchte wurde nicht mit einbezogen.

$$\alpha_L = 5.0 \cdot 10^{-5} \quad \alpha_R = 1.7 \cdot 10^{-3} \quad \alpha_T = 3.3 \cdot 10^{-3} \quad [\%^{-1}] \quad (24)$$

Die mechano-sorptiven Materialparameter, die die Matrix m in Gleichung (19) beschreiben, werden ebenfalls als Konstanten gewählt.

$$\begin{aligned}
 m_L &= 0.1 \cdot 10^{-3} & [N^{-1} mm^2] & \quad m_{LR} = 0.008 & [N^{-1} mm^2] \\
 m_R &= 0.15 & [N^{-1} mm^2] & \quad m_{LT} = 0.008 & [N^{-1} mm^2] \\
 m_T &= 0.2 & [N^{-1} mm^2] & \quad m_{RT} = 0.8 & [N^{-1} mm^2] \\
 \mu_{LR} &= 0.0 & \mu_{LT} = 1.0 & \quad \mu_{RT} = 1.0
 \end{aligned} \tag{25}$$

Die Werte basieren auf Ergebnissen von SANTAJO et al. [18] und MÅRTENSSON [11] (zusammengefasst in ORMARSSON [16]).

Die elastischen Eigenschaften der Klebefuge wurden KONNERTH et al. [10] entnommen. Da 1K-Polyurethan, wie er in den Experimenten zum Einsatz kam, ein isotropes Material ist, sind nur E und ν notwendig zur Beschreibung seiner mechanischen Antwort auf äussere Belastung.

$$E_{PUR} = 470 \quad [N mm^{-2}] \quad \nu_{PUR} = 0.3 \tag{26}$$

Es wird ein grösserer Diffusionswiderstand der Klebfuge im Vergleich zum Holz angenommen. Der Diffusionskoeffizient wird zu

$$D_{PUR} = 2.0 \cdot 10^{-3} \quad [mm^2 h^{-1}] \tag{27}$$

gewählt.

3.3.2 Finites-Element-Modell

Die Methode der Finiten Elemente bietet eine gute Möglichkeit Spannungen und Verformungen in Bauteilen vorherzusagen. Zur Berechnung von Feuchtefeldern muss allerdings auf die Analogie zur Temperaturfeldberechnung zurückgegriffen werden, da in kommerziellen Programmen die Möglichkeit der Feuchte-Berechnung nicht implementiert ist. Dies stellt allerdings keine grosse Hürde dar. Ausführliche Ausführungen zur Methode der Finiten Elemente sind z.B. in BATHE [2] zu finden.

Das Ziel der Modellvalidierung war es, herauszufinden wie gut die experimentellen Ergebnisse durch die Simulation mit dem FE-Modell vorhergesagt werden können. Dazu wurden die Experimente an Platten im Differenzklima (siehe Abschnitt 2.4.1) nachgebildet. Hier sollen die Varianten mit stehenden und liegenden Jahrringen VH90 bzw. VH0 verglichen werden. Ausserdem wird im Vergleich dazu die Vollholzvariante VH mit 15mm dicker Mittellage mit stehenden Jahrringen modelliert (Bezeichnungen nach Tab. 1). Die Simulation wurde mittels der Software ABAQUS durchgeführt. Es wurden dieselben Abmessungen und Randbedingungen modelliert, wie sie auch in den Experimenten angewendet wurden.

Aufgrund des symmetrischen Plattenaufbaus war es allerdings möglich nur die Hälfte der Platten zu modellieren und mit entsprechenden Randbedingungen die Symmetrie zu gewährleisten.

Die Platten bestehen aus drei Schichten von je 10mm Dicke mit 0.1mm dicken Klebfugen dazwischen. Die Schichten wurden mit den oben angegebenen Materialwerten versehen. Die Rechnung wurde unterteilt in eine Berechnung des Feuchtefeldes und eine Berechnung daraus resultierender Verformungen. In Abb. 12 ist die Vernetzung der Knoten und das verwendete globale Koordinatensystem dargestellt. Die Knoten an der Oberfläche, die der Auswertung dienen, entsprechen den Messpunkten der Experimente. Die Fasern der Decklagen sind in x-Richtung orientiert, während die Fasern der Mittellage in y-Richtung verlaufen. Die Achse B-H stellt die Symmetrieachse dar.

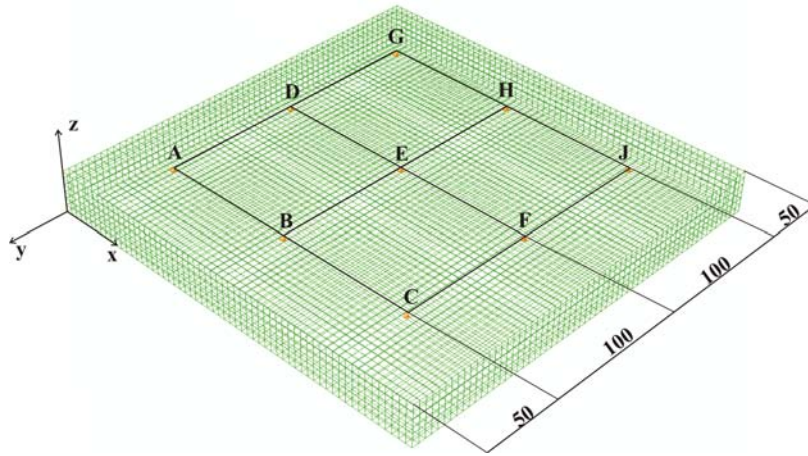


Abbildung 12: Vernetzung und Analysepunkte

Die Initialfeuchte ω_0 wurde zu 12% gesetzt, während ω_{air} (siehe Gleichung (11)) an der Unterseite 28.5% und an der Oberseite 12% zugewiesen wurden. Diese Feuchten sind die jeweiligen Ausgleichsfeuchten nach Gleichung (8) bei 100 bzw. 65% rLF. Es wurde ein Periode von 31 Tagen simuliert. Für den mechanischen Teil des Problems wurden die Randbedingungen entsprechend dem Koordinatensystem in Abb. 12 folgendermassen gewählt:

$$u_z = (50, -50, 0) = 0 \quad u_{x,y,z} = (150, -250, 0) = 0 \quad u_x = (-150, y, z) = 0 \quad (28)$$

Die Knoten an der Unterseite entsprechen den Lagerungspunkten der Experimente.

3.3.3 Ergebnisse und Diskussion

In Abb. 13 sind typische Verformungsbilder, wie sie in den Experimenten und den Berechnungen ermittelt wurden, dargestellt. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen werden

in Tab. 9 mit den experimentell ermittelten Werten aus Abschnitt 2 verglichen. Die Ver-

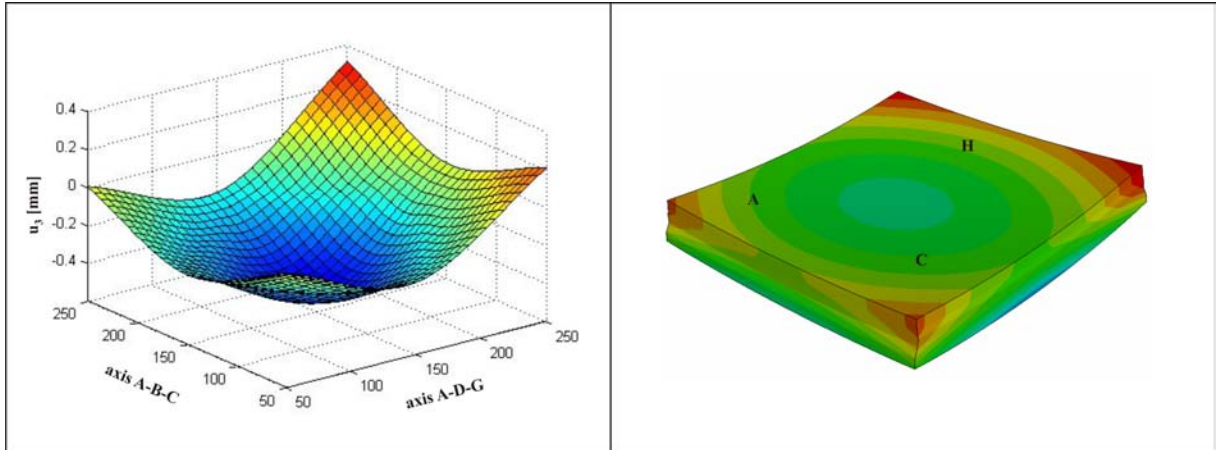


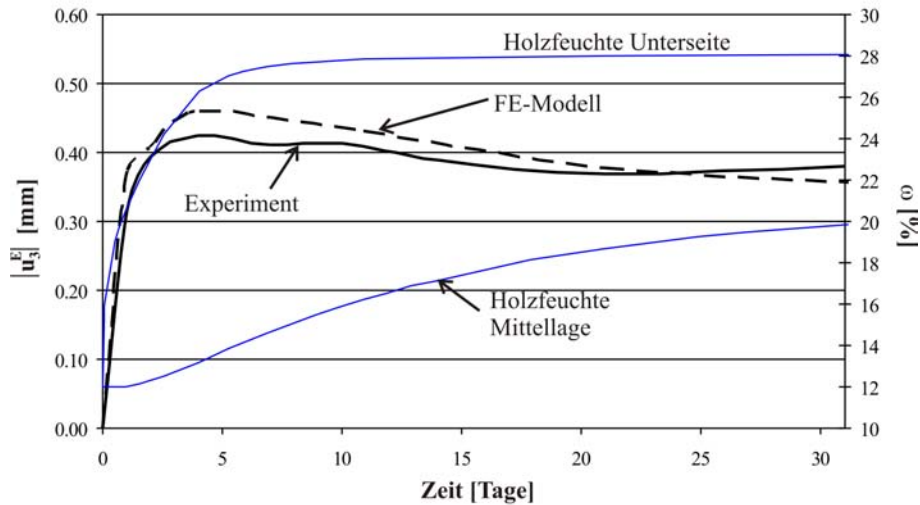
Abbildung 13: Typische Verformungen nach 31 Tagen Differenzklima 65/100% rLF (links: Experiment, rechts: Berechnung)

formungen sind bei Platten mit liegenden Jahrringen am grössten und bei 15mm dicker Mittellage (VH) kleiner als bei 10mm starker (VH0, VH90). Die Gesamtverformung ξ der Variante VH wird durch das Modell etwas unterschätzt. Hier wurden ideal stehende Jahrringe modelliert, was bei den Experimenten nicht der Fall war. Ausserdem streuen die Werte der Experimente relativ stark. Die Berechnungen wurden mit je einem kartesischen Koordinatensystem für jede Schicht durchgeführt. Somit ergeben sich homogene Schichten ohne Unterschiede in der Jahrringausrichtung oder Dichteunterschiede zwischen einzelnen Lamellen, wie es in den Platten der experimentellen Untersuchungen durchaus vorkam. In den Simulationsrechnungen bewegen sich die Punkte G und J nach oben, was in den Experimenten nicht immer zu beobachten war. In Abb. 13 ist links ein Fall dargestellt, der sehr gut mit den Berechnungen übereinstimmt. Um die Unterschiede zwischen einzelnen Platten zu bestimmen, müsste die Jahrringlage so exakt wie möglich modelliert werden. Die Hauptverformungsrichtung in der yz-Ebene ergibt sich sowohl in den Experimenten als auch in den Berechnungen. Die experimentell ermittelten Verformungen stimmen recht gut mit den durch das Modell vorhergesagten überein.

Tabelle 9: Vergleich von experimentell und rechnerisch erhaltenen Ergebnissen

Fall	Experimente (n=6)						FE-Modell		
	ξ [mm]		u_z^E [mm]		cup_{yz} [mm]		ξ	u_z^E	cup_{yz}
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	[mm]	[mm]	[mm]
VH0	1.70	0.45	-0.46	0.07	0.42	0.08	1.66	-0.50	0.42
VH90	1.40	0.20	-0.38	0.12	0.30	0.05	1.21	-0.36	0.28
VH	1.09	0.27	-0.12	0.17	0.10	0.10	0.63	-0.17	0.11

In Abb. 14 ist die Entwicklung der Verformung des Punktes E für den Fall stehender Jahrringe (VH90) als Vergleich von Experiment und Rechnung dargestellt. Zusätzlich sind die berechneten Feuchten an der Unterseite und im Inneren angegeben. Nach wenigen Tagen wird ein Maximum der Verformung erreicht, was sich dann wieder zurückbildet. Dies hängt mit der beginnenden Durchfeuchtung der Mittellage zusammen. Die dort stattfindende Quellung wirkt der Quellung der Unterseite entgegen, wodurch es zu einer entgegengesetzten Bewegung der Gesamtplatte kommt. Insgesamt wird dieser Rückgang der Deformation vom Modell grösser vorhergesagt als er sich letztendlich im Experiment zeigt.

**Abbildung 14:** Absolute Verschiebung des Punktes E und berechnete Feuchteverläufe an der Unterseite und im Inneren für den Fall stehender Jahrringe (VH90)

4 Zusammenfassung

Aus dem Einsatz von Holzwerkstoffen in der Mittellage von Massivholzplatten ergeben sich keine nennenswerten Vorteile im Verhalten der Platten gegenüber Feuchte.

Als Ergebniss der Differenzklimalagerung lässt sich festhalten, dass sich die Platten mit Vollholzmittellagen am wenigsten verformten. Die MDF-Varianten und mit Spanplatten verklebten Platten zeigten den geringsten Widerstand gegen das Differenzklima. Als Hauptverformungsrichtung konnte die Nebenachse ausgemacht werden, je geringer der E-Modul des Mitteallagenmaterials in dieser Richtung als desto grösser erwies sich die Plattenverformung.

Bei der Bestimmung der Eigenspannungen im Feuchtklima konnten Druckspannungen senkrecht zur Faser in den Deckschichten festgestellt werden. Am Beginn des Untersuchungszeitraums stieg die Spannung stark an um dann nahezu konstant zu bleiben oder abzusinken. Dies kann mit einem Angleich der Feuchte zwischen Deck- und Mittellage erklärt werden. Auch könnten plastische Verformungen im Material zu diesen Beobachtungen geführt haben.

Bei der Untersuchung des Quellung konnte die Dickenrichtung als Hauptquellungsrichtung ausgemacht werden. In Plattenebene ergaben sich Werte von Vollholz in Längsrichtung, womit die Absperrwirkung durch das kreuzweise Verkleben bewiesen ist.

Bei der Untersuchung der Rissbildung im Trockenklima zeigte die Variante mit geschlitzten Mittellagen, sicherlich auch begünstigt durch die im Vergleich dünneren Decklagen, die höchste Risslängensumme. Bei den Faserplatten bauten sich die Spannungen vor allem in der Mittellage ab. Durch das hier ausgeprägte Dichteprofil reissen diese Varianten in der Mittellage. Ein Einleimen von Vollholz am Rand kann dem entgegenwirken, da sich gezeigt hat, dass die Risse nur am Rand entstehen und nicht weit ins Platteninnere hineinreichen.

Die Substitution der Vollholz-Mittellage mit Holzwerkstoffen ist ohne Probleme möglich und bietet preisliche und herstellungstechnische Vorteile. Eine Verbesserung der Eigenschaften konnte jedoch keiner der Holzwerkstoffe in den hier untersuchten Bereichen zeigen. Tatsächlich ergaben sich, je nach Überprüfung, deutliche Unterschiede zwischen den Materialien. Vor der Substitution der Vollholz-Mittellage sollte geprüft werden, welche Anforderungen an die Platte gestellt werden und danach das dafür optimale (Kosten-Nutzen) Mittellagenmaterial gewählt werden. Auch sollte die Akzeptanz von Partikel- und Faserwerkstoffen gegenüber Vollholz in die Überlegungen mit einfließen.

Das vorgestellte Berechnungsmodell in dem elastische Dehnung, Feuchtedeformation und mechano-sorptive Dehnung berücksichtigt werden, liefert gute Vorhersagen für die Ver-

formung von Massivholzplatten im Differenzklima. Im Weiteren können hier noch zylindrische Koordinatensysteme zur exakteren Wiedergabe der Holzeigenschaften eingeführt werden. Damit ist ein erster Schritt in Richtung wirklichkeitsgetreuer Modellierung von Massivholzplatten getan, es besteht aber sicherlich noch weiterer Forschungsbedarf. So soll der Einfluss des Plattenaufbaus, der Jahrringausrichtung und alternativer Mittellagenmaterialien, wie hier schon in experimentellen Untersuchungen ermittelt, analysiert werden. Erste Ansätze waren auch schon wie im ersten Teilbericht beschrieben in BLUMER[3] zu finden.

Das Fortsetzungsprojekt wird im Rahmen der COST Aktion E49 vom Bund finanziert. Das Ziel ist es, Einflüsse aus dem Plattenaufbau, der Feuchte vor der Verklebung und vorgespannter Decklagen auf Eigenspannungen und Verformungen zu ermitteln und diese zu nutzen, um den Plattenaufbau zu optimieren. Dazu soll auch das hier vorgestellte Rechenmodell genutzt werden. In einer Arbeit, die am Institut für Baustoffe stattfand, wurden Massivholzplatten aus Buchenholz und thermisch modifizierter Buche hergestellt (SCHNIDER [19]). Die dort erhaltenen Erkenntnisse sollen im Weiteren auch genutzt werden.

Literatur

- [1] DIN 68364: *Kennwerte von Holzarten - Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten*. 2003.
- [2] BATHE, K.-J.: *Finite-Element-Methoden*. Springer-Verlag, 1990.
- [3] BLUMER, S.: *Moisture induced stresses and deformations in parquet floors - An experimental and numerical study*. Diploma Thesis, Lund Institute of Technology, Lund University, 2006.
- [4] BODIG, J. und A. JAYNE: *Mechanics of wood and wood composites*. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1982.
- [5] CLAUSS, S.: *Untersuchungen zur Formänderung mehrschichtiger Holzwerkstoffplatten*. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 2006.
- [6] HANHIJÄRVI, A.: *Modelling of creep deformation mechanisms of wood*, Bd. 231 d. Reihe *VTT Publications*. Technical Research Centre of Finland, Espoo, 1995.
- [7] HUNT, D.: *Present knowledge of mechano-sorptive creep of wood*. Techn. Ber., 1994. in: Morlier, P. Creep in timber structures. RILEM Report 8.
- [8] KEUNECKE, D., W. SONDEREGGER, K. PERETEANU, T. LÜHTI und P. NIEMZ: *Determination of Young's and shear moduli of common yew and Norway spruce by means of ultrasonic waves*. Wood Science and Technology, 41:309–327, 2007.
- [9] KOLLMANN, F.: *Zur Theorie der Sorption*. Forschung im Ingenieurwesen, 29:33–41, 1963.
- [10] KONNERTH, J., W. GINDL und U. MÜLLER: *Elastic Properties of adhesive polymers. Part I: polymer films by means of electronic speckle pattern interferometry*. Journal of Applied Polymer Science, 103(6):3936–3939, 2007.
- [11] MÅRTENSSON, A.: *Mechanical behaviour of wood exposed to humidity variations*. Techn. Ber., Institute of Technology, Department of Structural Engineering, 1992.
- [12] MÅRTENSSON, A.: *Mechano-sorptive effects in wooden material*. Wood Science and Technology, 28(6):437–449, 1994.
- [13] NEUHAUS, F.-H.: *Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit*. Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, 1981.

-
- [14] NIEMZ, P.: *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 1993.
- [15] NIEMZ, P. und X. WANG: *Spannungsausbildung in dreischichtigen Massivholzplatten bei Klimawechsel*. *Holzforschung und Holzverwertung*, 4:82–83, 2002.
- [16] ORMARSSON, S.: *Numerical Analysis of Moisture-Related Distortions in Sawn Timber*. Doctoral Thesis, Chalmers University of Technology, 1999.
- [17] RANTA-MAUNUS, A.: *Impact of mechano-sorptive creep to the long-term strength of timber*. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 48(2):67–71, 1990.
- [18] SANTAOJA, K., T. LEINO, A. RANTA-MAUNUS und A. HANHIJÄRVI: *Mechano-sorptive structural analysis of wood by the ABAQUS finite element program*. Techn. Ber., Technical Research Center of Finland, 1991.
- [19] SCHNIDER, T.: *Eignung mittlerer Stammabschnitte aus Schweizer Laubholz*. Diplomarbeit, Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau, 2007.
- [20] SCHREIBER, J., P. NIEMZ und D. MANNES: *Vergleichende Untersuchungen zu ausgewählten Eigenschaften von Holzpartikelwerkstoffen bei unterschiedlicher Belastungsart*. *Holztechnologie*, 48, 2007.
- [21] SCHWAB, E., A. STEFFEN und C. KORTE: *Feuchtebedingte Längenänderungen von Holzwerkstoffen in Plattenebene*. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 55:227–233, 1997.
- [22] SIAU, J. F.: *Wood: Influence of moisture on physical properties*. Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, USA, 1995.
- [23] TOBISCH, S.: *Methoden zur Beeinflussung ausgewählter Eigenschaften von dreilagigen Massivholzplatten aus Nadelholz*. Doktorarbeit, Universität Hamburg, 2006.
- [24] TOBISCH, S. und D. KRUG: *Dreilagige Massivholzplatten mit substituierter Mittellage*. *Holz*, 3, 2002.
- [25] VANEK, M. und A. TEISCHINGER: *Diffusionskoeffizienten und Diffusionswiderstandszahlen von verschiedenen Holzarten*. *Holzforschung und Holzverwertung*, 1:3–6, 1989.