

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 156 (2005)

Heft: 3-4

Artikel: Untersuchungen zur Feuchteverteilung und Spannungsbildung in Holzbauteilen bei Wechselklimalagerung

Autor: Niemz, Peter / Bärtschi, Hans / Howald, Martin

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1098034>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 02.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Untersuchungen zur Feuchteverteilung und Spannungsbildung in Holzbauteilen bei Wechselklimalagerung

PETER NIEMZ, HANS BÄRTSCHI UND MARTIN HOWALD

Keywords: Solid wood panels; moisture distribution; moisture transfer; internal stresses; modelling. FDK 81 : UDK 519.876.5

1. Einleitung

In zunehmendem Masse werden mehrschichtige Massivholzplatten für statisch beanspruchte Elemente aber auch für Fassaden eingesetzt. Durch die Absperrwirkung der abwechselnd im Winkel von 90 Grad zueinander verklebten Lagen kommt es bei Vorhandensein eines Feuchteprofils senkrecht zur Plattenebene zur behinderten Quellung und Schwindung und damit zu erheblichen Spannungen zwischen und auch innerhalb der Lagen (durch wechselnde Jahrringlagen). Während sich Druckspannungen in den Decklagen nicht sichtbar auswirken, kann es bei Zugspannungen durch Überschreiten der Quersugfestigkeit zur Rissbildung kommen. Praktisch können solche Risse auch entstehen, wenn die Lagen relativ feucht verklebt werden und danach im praktischen Gebrauch trocknen (z.B. in einem geheizten Innenraum). SONDEREGGER & NIEMZ (2004) führten entsprechende Untersuchungen durch. Werden Massivholzplatten mit relativ grossen Querschnitten (z.B. 60 mm Plattendicke) langfristig direkt frei bewittert, so kommt es zu erheblichen Rissen in den Decklagen. Dies zeigen eigene, bisher über drei Jahre laufende Versuche deutlich (PETZOLD *et al.* 2003, PACHLER 2001).

Mit steigender Dicke der Platten wird das Feuchteprofil deutlich ausgeprägter, die Spannungen werden entsprechend höher. Der Feuchtetransport erfolgt überwiegend durch Diffusion und ist recht langwierig. Risse zeichnen sich daher häufig erst nach einem längeren Gebrauch ab. Solche Eigenspannungen wurden auch in Brettschichtholz nachgewiesen (JÖNSSON & SVENSSON 2004).

Nachfolgend wird über die Feuchte- und Spannungsverteilung in Massivholzplatten mit unterschiedlicher Oberflächenbeschichtung im künstlich erzeugten Wechselklima feuchttrocken und in einem Differenzklima, wie es z.B. in einem Wandelement vorliegt (ausen kalt, innen warm), berichtet. Dabei wurde untersucht, inwieweit verschiedene Oberflächenbehandlungen diese Prozesse beeinflussen. Gleichzeitig wurde der Feuchtetransport rechnerisch simuliert.

2. Grundlagen der Feuchteverteilung und der Spannungsentstehung

2.1 Feuchtetransport

Holz unterliegt infolge seines strukturellen Aufbaus den Gesetzmässigkeiten kapillarporöser Körper. Innerhalb des hygroskopischen Bereichs kann Holz Wasser aus der Luft aufnehmen bzw. an diese abgeben. Direkt an der Probenoberfläche stellt sich eine von der relativen Luftfeuchte und Temperatur abhängige Gleichgewichtsfeuchte des Holzes ein. Der Feuchtetransport ins Probeninnere erfolgt überwiegend durch Diffusion (KOPFER 1974).

Für eine einfache mathematische Darstellung des Phänomens der Diffusion gelten die Fick'schen Diffusionsgesetze. Der Diffusionskoeffizient ist keine Konstante, da er stark von der Holzfeuchtigkeit beeinflusst wird (SIAU 1984, KÜNZEL

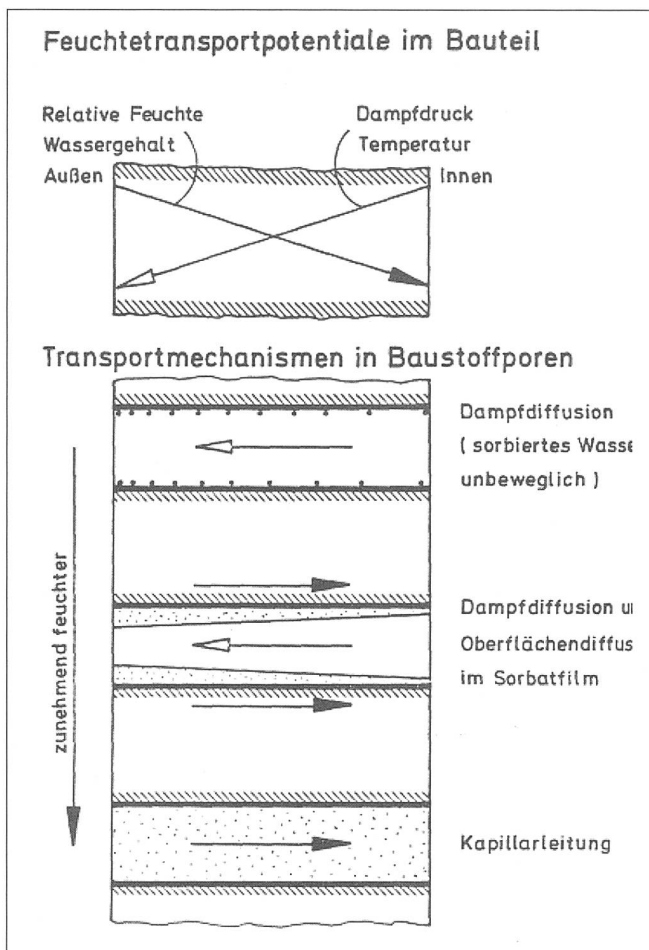


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Feuchtetransports in einem porösen hygroskopischen Baustoff bei entgegengerichteten Gradienten von Dampfdruck und relativer Feuchte (winterliche Bedingungen).

Je höher die Bauteilfeuchte, desto grösser wird der Flüssigtransport gegenüber der Dampfdiffusion (aus KÜNZEL 1994).

1994). Bei nicht isothermen Bedingungen kommt man mit diesem vereinfachten Ansatz (konstanter Diffusionswiderstand) jedoch eher zu unbefriedigenden Resultaten (VANEK & TEISCHINGER 1989). KÜNZEL (1994) empfiehlt, die Feuchtetransporte auf Oberflächen und in Mikrokapillaren in einem zweiten Ansatz neben der Dampfdiffusion zu behandeln.

Bei Holzwerkstoffen haben auch der verwendete Klebstoff und bei Sperrholz sowie Massivholzplatten die Anzahl der Lagen einen Einfluss auf den Diffusionswiderstand und damit auf das sich einstellende Feuchteprofil. POPPER *et al.* (2002) untersuchten den Diffusionswiderstand von Massivholzplatten mit unterschiedlichem Aufbau und stellten fest, dass dieser mit zunehmender Anzahl Schichten pro Plattendicke leicht zunahm. Dies deutet darauf hin, dass bei den Leimfugen durch den Klebstoff oder den Wechsel der Faserrichtung eine Hemmung des Feuchtetransports stattfindet.

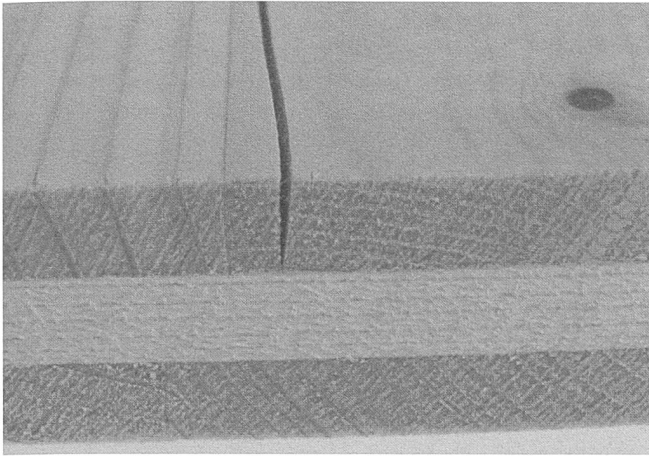


Abbildung 2: Riss in radialer Richtung.

Linke Lamelle: stehende Jahrringe; rechte Lamelle: liegende Jahrringe; Dicke der Massivholzplatte: 24 mm.

Fick'sches Gesetz: $F = -D \cdot \frac{\Delta u}{\Delta x}$

- F Diffusionsstrom ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)
- D Diffusionskoeffizient ($\text{m}^2 : \text{s}$)
- Δu Feuchtedifferenz (%)
- Δx Distanz (m)

Im praktischen Gebrauch kommt es häufig zu einem Differenzklima. Dabei ist es im Winter z.B. auf der Innenseite einer Wand warm und auf der Aussenseite kalt. Bedingt durch das Wasserdampfdruckgefälle fließt in der Regel ein Dampfdiffusionsstrom in Richtung der kalten Seite. Da auf der kälteren Seite die Wasserdampfaufnahmekapazität der Luft geringer ist, steigt die relative Luftfeuchte und damit die Feuchte des Bauteils an dieser Stelle. Steigt die relative Luftfeuchte auf 100%, kommt es zur Taupunktüberschreitung. Bei diesen Holzfeuchten wird dann ein zweiter Transportvorgang wirksam, nämlich die kapillare Wasserleitung, welche dem Wassergehaltsgefälle folgt und unter Umständen in der entgegengesetzten Richtung zur Dampfdiffusion verläuft. (vgl. *Abbildung 1*). Solche Vorgänge können zu Veränderungen in den Holzfeuchteprofilen mit den damit verbundenen Spannungen, Ver-

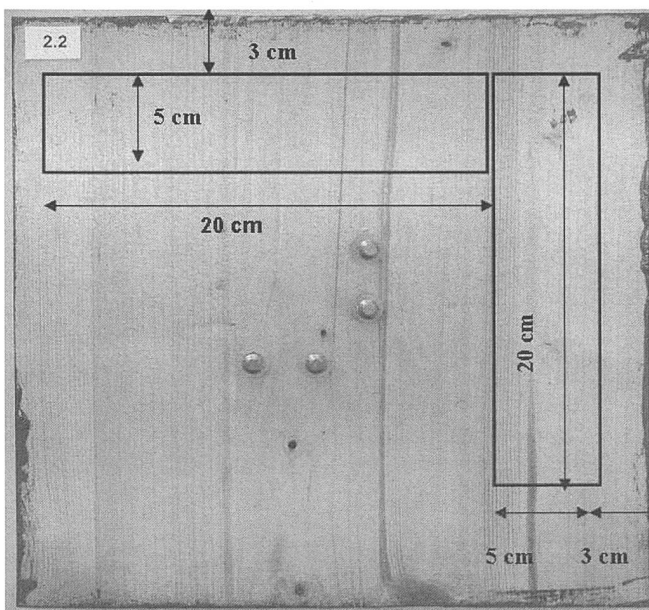


Abbildung 3: Schema für die Anordnung der Feuchtemessstellen und die Entnahme der Proben zur Ermittlung der Eigenspannungen.

formungen und auch Rissen (*Abbildung 2*) der Bauteile führen. Übersteigt die Holzfeuchte etwa 20%, so ist an der betreffenden Stelle zudem mit Pilzbefall zu rechnen. *Abbildung 1* zeigt schematisch den Feuchtetransport in einem Bauteil.

2.2 Einfluss von Oberflächenbehandlungen

Ein Oberflächenschutz hat vielfältige Aufgaben. Neben der Funktion als Licht-, Wärme-, Verfärbungs- und Verschmutzungsschutz hat er die Aufgabe, starke Feuchteschwankungen zu vermeiden oder zumindest zu verringern, damit eine möglichst gleichmäßige Holzfeuchte im Bauteil herrscht (CERLIANI & BAGGENSTOSS 2000). Dies verringert innere Spannungen, Verformungen und damit auch Risse in der Oberfläche.

3. Versuchsmaterial und Versuchsdurchführung

3.1 Wechselklima (feucht-trocken)

3.1.1 Versuchsmaterial

Untersucht wurden industriell gefertigte dreischichtige Massivholzplatten aus Fichtenholz mit 60 mm Plattendicke (Plattenaufbau 20/20/20) im Format von 300 mm x 300 mm. Je Variante wurden drei Platten geprüft. Folgende Varianten wurden einbezogen:

- unbehandeltes Holz,
- thermisch vergütetes Holz (24 Stunden bei 180 °C im belüfteten Trockenschrank behandelt),
- Decklagen alle 50 mm parallel zur Faserrichtung 12 mm tief eingenutet (Entlastungsfugen für die sich aufbauenden Spannungen),
- Oberfläche mit Pento-Fluid IP beschichtet (191 g/m²); Kombination aus Leinöl und Fischöl,
- Oberfläche mit Aquagrund BIP (113 g/m²) und danach mit Lasinol UV (94 g/m²) beschichtet.

Um eine erhöhte Feuchteaufnahme über die Schmalflächen zu verhindern, wurden diese bei allen Platten mit Acrylfarbe und mit Aluminiumband versiegelt.

Zur Messung des Feuchteprofils über der Probendicke wurden Einschlagelektroden 10 mm und 30 mm tief in die Proben eingebracht (*Abbildung 3*). Der Abstand der Elektroden vom Probenrand betrug jeweils mindestens 100 mm. Die Bohrlöcher der Einschlagelektroden wurden am Rand mit Silikon abgedichtet. Die Feuchtemessung erfolgte mit einem Gerät Combo 100 der Firma Bollmann. Bei sämtlichen Platten wurde abschliessend an zwei Proben pro Schicht die Feuchte mittels Darmmethode bestimmt, um einen Referenzwert für die elektrische Feuchtemessung zu erhalten.

3.1.2 Klimatisierung

Alle Platten wurden zunächst vier Wochen im Normalklima bei 20 °C und 65% relativer Luftfeuchte klimatisiert.

In einer Klimakammer wurden die Proben danach einem Klimazyklus ausgesetzt (*Tabelle 1*).

Tabelle 1: Klimazyklus.

Temperatur [°C]	relative Luftfeuchte [%]	Dauer in Tagen
20	95	15
20	35	13
20	95	18
20	35	14

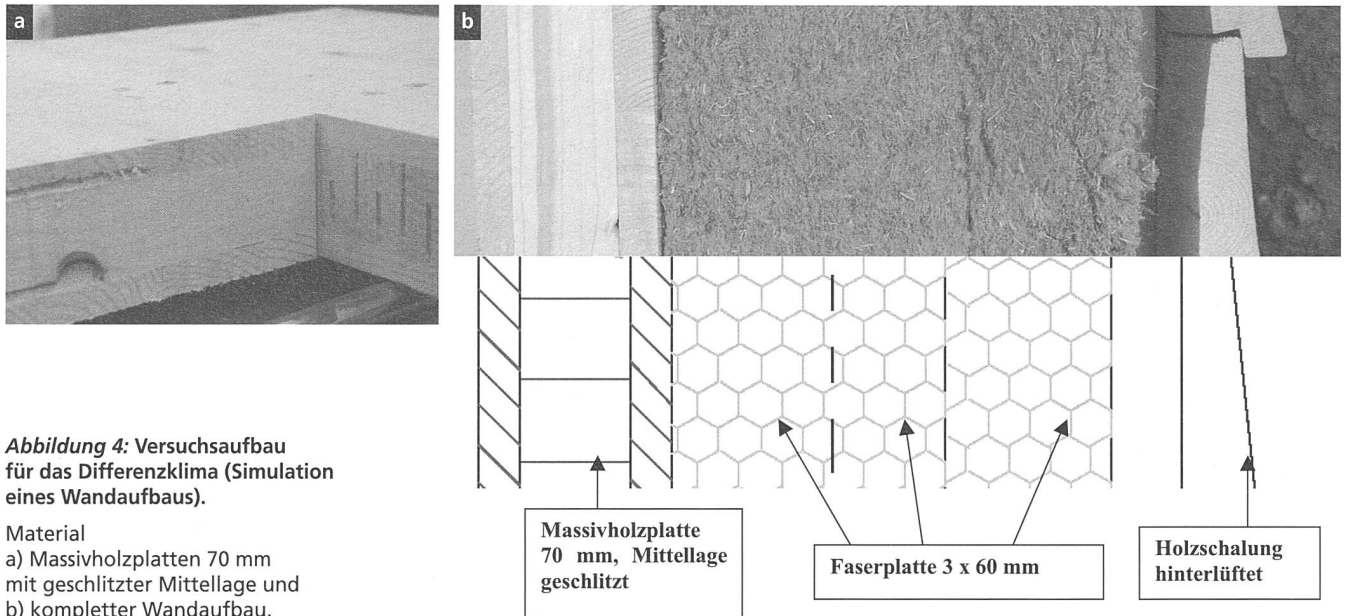


Abbildung 4: Versuchsaufbau für das Differenzklima (Simulation eines Wandaufbaus).

Material
 a) Massivholzplatten 70 mm mit geschlitzter Mittellage und
 b) kompletter Wandaufbau.

3.1.3 Messung der Eigenspannungen und Risse

Die Eigenspannungen wurden analog der zur Ermittlung von Trocknungsspannungen üblichen Methode bestimmt (JÖNSSON & SVENSSON 2004), PACHLER 2001, HOWALD 2002). Aus jeder Platte wurden zwei Streifen von 200 mm Länge und 50 mm Breite herausgeschnitten, ein Streifen mit Faserverlauf parallel zur Decklage und ein zweiter senkrecht dazu (vgl. *Abbildung 3*). Zunächst wurde die Gesamtlänge der Streifen gemessen. Mit einer Bandsäge wurden anschliessend die Streifen in die drei einzelnen Lagen aufgetrennt. Nach dem Auftrennen kommt es durch die Eigenspannungen zu Längenänderungen (Verlängerung bei Druckspannungen, Verkürzung bei Zugspannungen).

Aus der Längenänderung lässt sich die Dehnung ε berechnen. Unter Nutzung des E-Moduls kann die Spannung nach dem Hooke'schen Gesetz berechnet werden. Es gilt:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

- σ Spannung in N/mm²
- ε Dehnung in %
- E E-Modul in N/mm²

3.1.4 Risse

Die Längen der einzelnen Risse wurden mit einem Massstab gemessen, in Gruppen eingeteilt und anschliessend aufsummiert. Es wurden drei Klassen gebildet: grosse Risse > 0,5 mm; kleine Risse < 0,5 mm; Leimfugen offen.

3.2 Differenzklima

3.2.1 Versuchsmaterial

Ergänzend wurden ein Wandaufbau gemäss *Abbildung 4* in einer Doppelklimakammer sowie Massivholzplatten mit unterschiedlichem Aufbau und verschiedener Oberflächenbehandlung eingesetzt.

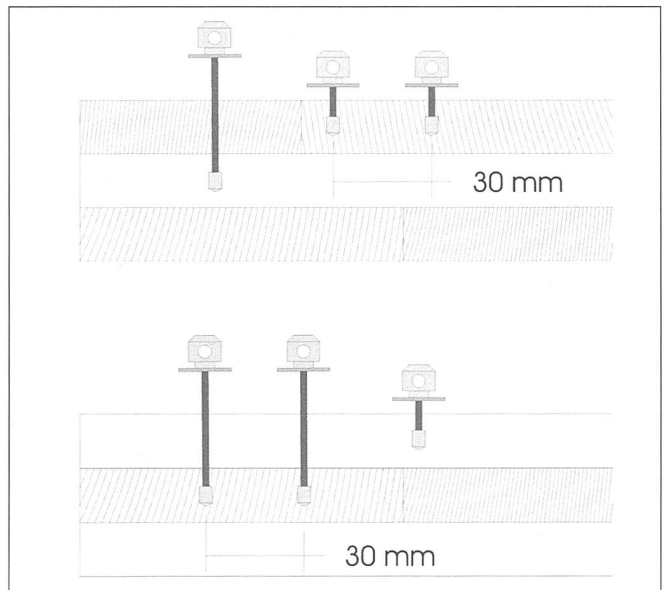


Abbildung 5: Positionierung der Einschlagelektroden für die Holzfeuchtemessung in den Platten.

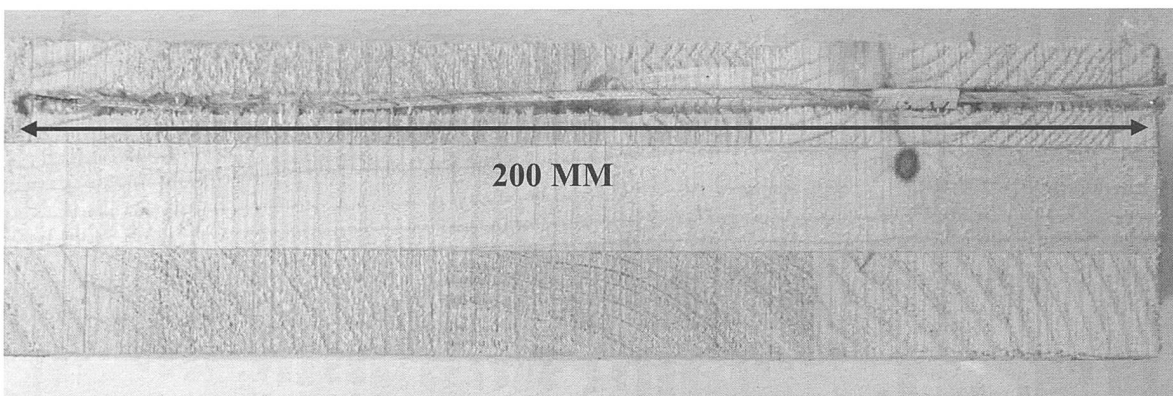


Abbildung 6: Sensor zur Temperaturmessung.

	Warmseite		Kaltseite		Dauer
	Klima	Dampfdruck ¹	Klima	Dampfdruck ¹	
Vorklima	20 °C, 65% r.L.	1521 Pa	20 °C, 65% r.L.	1521 Pa	4 Wochen + 1 Tag ² 15 Tage
Differenzklima	23 °C, 50% r.L.	1405 Pa	-15 °C, ~70% r.L.	115 Pa	

Tabelle 2: Klima bei Versuchen im Differenzklima in der Doppelklimakammer.

¹ Wasserdampfpartialdruck aus Lutz et al. 1994.

² zusätzliche Klimatisierung nach Einbau in Doppelklimakammer.

Folgende vier Varianten (Plattengrösse von 600 x 700 mm) wurden untersucht:

- Wandaufbau mit Isolation und Schalung gemäss *Abbildung 4*,
- Massivholzplatte Fichte 70 mm mit einem Lamellenverhältnis von 15/40/15 mm, Mittellage geschlitzt,
- Massivholzplatte Fichte 60 mm mit Lamellenverhältnis 20/20/20 mm (Mittellage nicht geschlitzt), Oberfläche unbehandelt,
- Massivholzplatte Fichte 60 mm mit Lamellenverhältnis 20/20/20 mm (Mittellage nicht geschlitzt), Oberfläche mit Lasur behandelt (Aquagrund BIP, Lasinol UV, Firma Pentol, Auftragsmenge je 95 g/m²).

3.2.2 Klimatisierung

Die Proben wurden zunächst vier Wochen im Normalklima bei 20 °C und 65% relativer Luftfeuchte (r.L.) klimatisiert. Danach wurden sie in eine Doppelklimakammer eingebaut. Um einen eventuellen Feuchteverlust beim Einbau zu kompensieren, wurden die Platten nach dem Einbau nochmals einen Tag im Normalklima in der Doppelklimakammer klimatisiert. Danach wurden sie 15 Tage dem Differenzklima (23 °C, 50% relative Luftfeuchte und -15 °C, 70% relative Luftfeuchte) ausgesetzt (*Tabelle 2*). Die Doppelklimakammer ermöglicht es, Klimadifferenzen zwischen zwei Seiten eines Bauelements (z.B. kalt-warm, feucht-trocken) zu simulieren. Bedingt durch die Anlagetechnik erfolgte in Abständen von etwa sechs Stunden eine Abtauphase, in welcher die Temperatur auf der Kaltseite für kurze Zeit über null °C stieg. Die kaltseitige Luftfeuchtigkeit konnte mit dieser Anlage nicht mehr gesteuert werden. Sie schwankte zwischen 60 und 70% zwischen den Abtauphasen und stieg während den Abtauphasen auf 100%.

3.2.3 Feuchtemessung

Die Feuchtemessung erfolgte mit Einschlagelektroden in allen drei Schichten der Massivholzplatten. *Abbildung 5* zeigt die Lage der Messelektroden parallel und senkrecht zur Faserrichtung der Decklagen.

Bei den 60 mm dicken Platten wurde in einer Tiefe von 10 mm, 30 mm und 50 mm gemessen, bei den 70 mm dicken Platten in einer Tiefe von 10 mm, 35 mm sowie 60 mm. Es wurde ein elektrisches Feuchtemessgerät verwendet. Insgesamt wurden elf Messungen über einen Zeitraum von 15 Tagen vorgenommen.

Da die Leitfähigkeit von Holz neben der Holzfeuchte auch massgeblich von der Temperatur bestimmt wird, war es notwendig, Temperaturmessungen in der gleichen Tiefe wie die Feuchtemessung durchzuführen, damit die Werte entsprechend korrigiert werden konnten. Verwendet wurden Thermoelemente (NiCr-Ni), welche von der Schmalseite 200 mm in die Platte eingebracht wurden. (vgl. *Abbildung 6*).

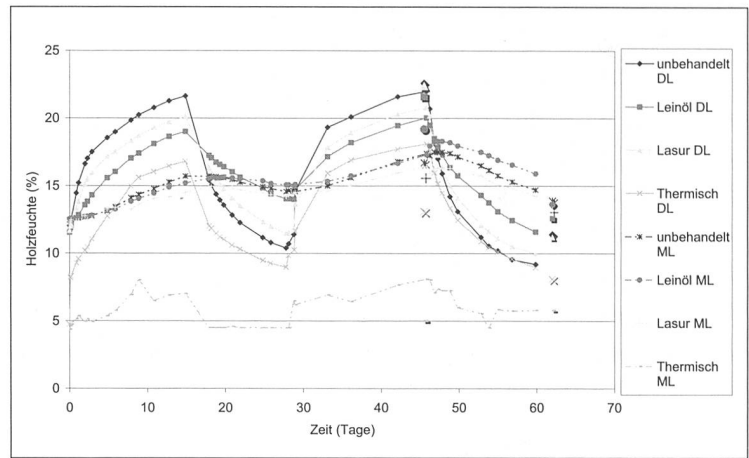


Abbildung 7: Verlauf der Holzfeuchte im Wechselklima.

DL: Decklage, ML: Mittellage. Die freistehenden Punkte bei 47 und 62 Tagen sind die Ergebnisse der Darrproben.

Tag 1 bis 15: 20 °C, 95% r.L.; Tag 16 bis 28: 20 °C, 35% r.L.; Tag 29 bis 47: 20 °C, 95% r.L.; Tag 48 bis 62: 20 °C, 35% r.L.

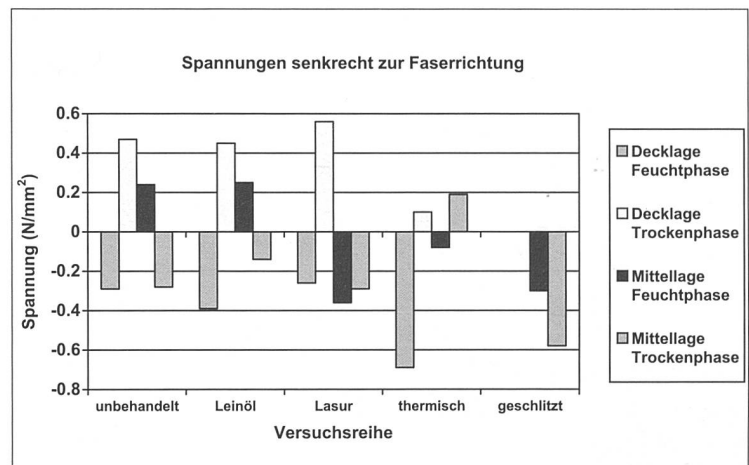


Abbildung 8: Spannungsbildung im Wechselklima.

Zugspannungen +; Druckspannungen -.

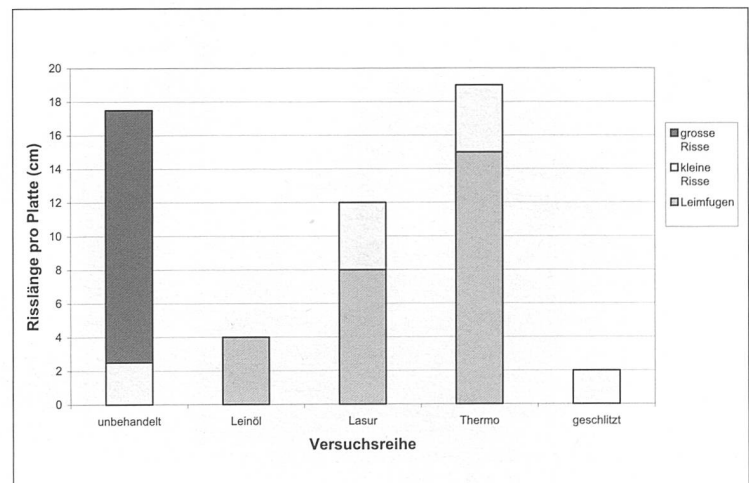


Abbildung 9: Risslänge in den Decklagen pro Platte nach Versuchsreihen.

Tabelle 4: Feuchteverlauf im Wechselklima (elektrisch gemessen).

DL: Decklage, ML: Mittellage, Holzfeuchte in %.

Klima	Zeit	unbehandelt		Leinöl		Lasur		Thermoholz	
		DL	ML	DL	ML	DL	ML	DL	ML
20/95	0	12,0	12,4	11,5	12,5	11,7	12,1	4,7	4,4
	2	16,6	12,7	13,6	12,7	15,1	12,8	10,2	5,0
	9	20,2	14,3	17,4	14,0	18,7	13,6	15,6	8,0
	15	21,6	15,7	19,0	15,2	20,1	14,5	16,8	7,0
20/35	18	15,4	15,7	17,2	15,5	16,3	14,9	12,0	4,5
	22	12,3	15,3	15,6	15,5	13,5	14,7	10,3	4,5
	28	10,4	14,6	14,0	15,1	11,5	14,2	9,0	4,5
20/95	29	14,6	14,6	14,7	15,1	13,6	14,5	11,7	6,2
	36	20,1	15,6	18,2	15,7	18,9	15,0	16,9	6,4
	46	22,0	17,4	20,0	17,3	20,8	16,4	18,1	8,1
20/35	48	15,9	17,5	17,3	18,3	16,4	16,4	14,5	7,3
	54	10,6	16,2	13,8	17,3	11,6	15,5	10,5	4,5
	60	9,2	14,7	11,6	15,9	10,0	14,3	9,0	5,8

Tabelle 5: Vergleich von elektrischer Feuchtemessung und Darmmethode am Schluss der letzten Feuchtphase (feucht) bzw. der letzten Trockenphase (trocken).

DL: Decklage, ML: Mittellage; Δ Differenz zwischen Mittel- und Decklage.

Platte	Holzfeuchte nach Widerstand (%)			Holzfeuchte nach Darrprobe (%)			Differenz Widerstand-Darrprobe (%)		
	DL	ML	Δ	DL	ML	Δ	DL	ML	Δ
unbehandelt	21,7	17,2	+4,5	22,6	16,7	+5,9	-0,9	+0,5	-1,4
Leinöl	20,5	16,2	+4,3	21,6	16,2	+5,4	-1,1	0,0	-1,1
Lasur	20,7	16,7	+4,0	22,4	15,7	+6,7	-1,7	+1,0	-2,7
Thermoholz	17,5	6,8	+10,7	13,1	5,0	+8,1	+4,4	+1,8	+2,6
unbehandelt	9,2	14,7	-5,5	11,4	13,9	-2,5	-2,2	+0,8	-3,0
Leinöl	11,6	15,9	-4,3	12,6	13,8	-1,2	-1,0	+2,1	-3,1
Lasur	10,0	14,2	-4,2	11,4	13,3	-1,9	-1,4	+0,9	-2,3
Thermoholz	8,9	5,8	+3,1	8,1	5,8	+2,3	-0,8	0,0	-0,8

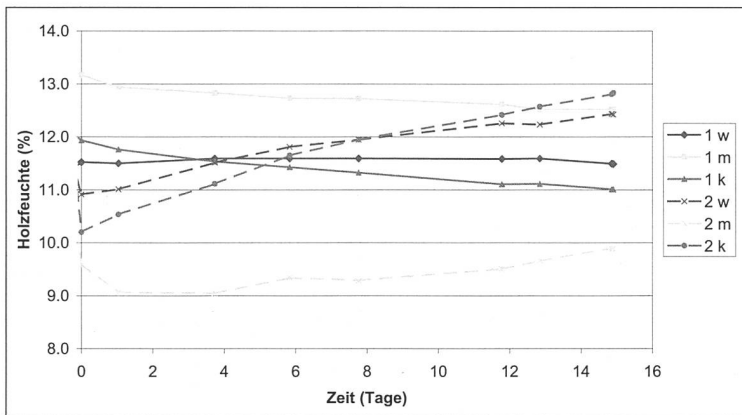


Abbildung 10: Vergleich des Feuchteverlaufs zwischen der Platte mit Isolation (1) und derjenigen ohne Isolation (2).

w: warmseitige Decklage, m: Mittellage, k: kaltseitige Decklage.

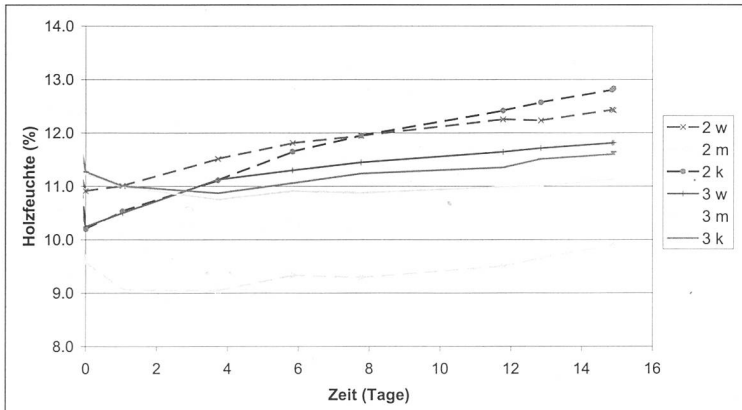


Abbildung 11: Vergleich des Feuchteverlaufs zwischen der Platte mit geschlitzter Mittellage (2) und derjenigen ohne Schlitz (3).

w: warmseitige Decklage, m: Mittellage, k: kaltseitige Decklage.

Beim Wandaufbau wurden zusätzlich folgende Messsonden installiert:

- Einschlagelektroden zur Feuchtebestimmung in der Schalung,
- Temperatursonden alle 60 mm in der Isolationsschicht,
- eine kombinierte Luftfeuchte- und Temperatursonde in der Isolation,
- eine kombinierte Luftfeuchte- und Temperatursonde zwischen Isolation und Schalung.

Alle Temperatur- und Luftfeuchtwerte wurden kontinuierlich gemessen und in einem Datenlogger gespeichert. Als Referenz zu den Holzfeuchtemessungen aus dem elektrischen Widerstand wurden unmittelbar nach dem Beenden des Versuchs Darrproben aus den Platten genommen (ebenso vom Isolationsmaterial).

3.3 Simulation der Feuchteverteilung

Zur Simulationsrechnung diente das Programm Delphin des Institutes für Bauphysik der TU Dresden (siehe FUNK & GRÜNEWALD 2001, PETZOLD et al. 2003).

Es wurden je zwei Varianten mit unterschiedlichen Ansätzen durchgerechnet:

Simulation 1

Bei dieser Variante wurde mit einer feuchteabhängigen Diffusionswiderstandszahl gerechnet. Für die Simulation wurde die von VANEK & TEISCHINGER (1989) ermittelte Feuchteabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten und der Diffusionswiderstandszahl verwendet.

Simulation 2

Als weitere Variante wurde mit Materialkennwerten aus der im Programm Delphin vorhandenen Datenbank gearbeitet. Als Material wurde Fichte gewählt. Dabei wird der Feuchte-transport aus Dampfdiffusion im Zelllumen und dem Flüssigwassertransport, welcher mit zunehmender Holzfeuchte ansteigt und dem Wassergehaltsgefälle folgt, berechnet. *Tabelle 3* zeigt wichtige Kennwerte dieser Berechnung.

Tabelle 3: Wichtigste Materialkennwerte für die Berechnung.

Dichte	450 kg/m ³
Wärmekapazität	2500 J/kgK
Wärmeleitfähigkeit	0,1 W/mK
Dampfdiffusionswiderstandszahl Holz (Simulation 2)	40
Dampfdiffusionswiderstandszahl geschlitztes Holz	2

4. Versuchsergebnisse

4.1 Wechselklima (feucht-trocken)

4.1.1 Feuchteverlauf

Bei Klimaänderung reagierte die Holzfeuchte in den Decklagen sehr schnell, in den Mittellagen leicht verzögert und weniger ausgeprägt. *Tabelle 4* und *Abbildung 7* zeigen die Ergebnisse.

Zwischen den verschiedenen Versuchsreihen zeigten sich deutliche Unterschiede. Die Änderungen der

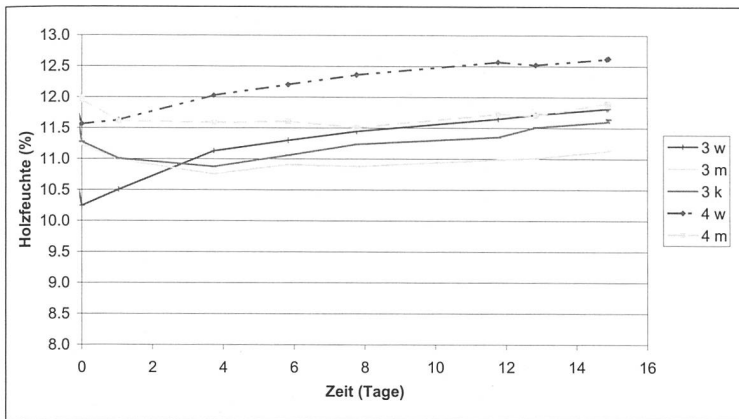


Abbildung 12: Vergleich des Feuchteverlaufs im Differenzklima zwischen der behandelten Platte (4) und der unbehandelten (3).

w: warmseitige Decklage, m: Mittellage, k: kaltseitige Decklage.

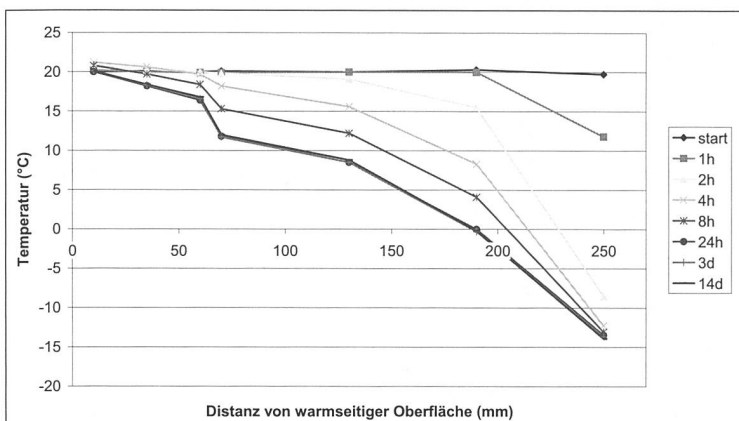


Abbildung 13: Temperaturprofil beim kompletten Wandaufbau über die Zeit.

h: Stunden, d: Tage.

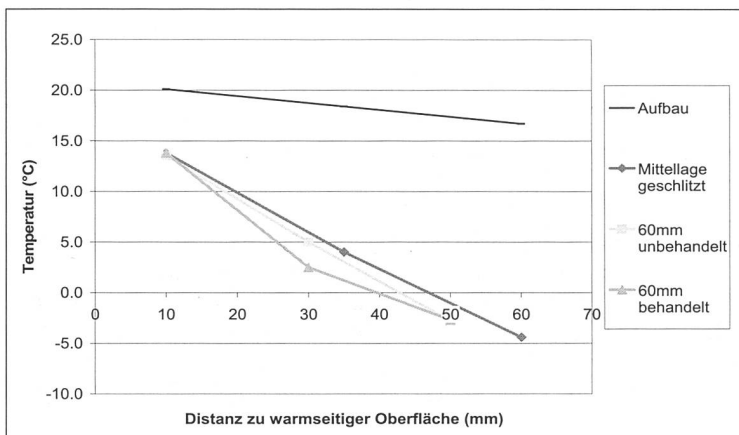


Abbildung 14: Temperaturprofil bei geschlitzter und ungeschlitzter Mittellage.

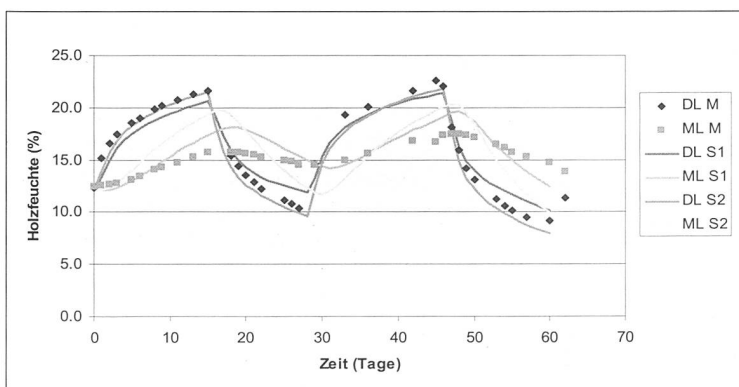


Abbildung 15: Vergleich der gemessenen und der berechneten Feuchten bei der unbehandelten Platte.

ML: Mittellage, DL: Decklage, M: Messung, S1: Simulation 1, S2: Simulation 2.

Holzfeuchtigkeit waren bei den unbehandelten Platten am ausgeprägtesten, gefolgt von den mit Lasur behandelten Platten. Die mit Lein-/Fischöl behandelten Proben wiesen die geringsten Feuchteänderungen auf. Hier ist der unterschiedliche Diffusionswiderstand der Beschichtungen bemerkbar.

Beim thermisch behandelten Holz sind die Ausgleichsfeuchten deutlich tiefer als bei unbehandeltem Holz. Die Feuchteänderung in der Mittellage ist gering. Speziell die gravimetrische Feuchtebestimmung deutet darauf hin, dass der Feuchtetransport in die Mittellage deutlich langsamer erfolgt als bei unbehandelten Platten. Beim thermisch behandelten Holz ist der Unterschied zwischen der elektrisch gemessenen Feuchte sowie der gravimetrisch bestimmten teilweise erheblich. Hier muss eine veränderte Widerstandskennlinie genutzt werden. Bei den anderen Varianten stimmen die mittels Darmmethode bestimmten Werte recht gut mit den elektrisch ermittelten überein. Im Allgemeinen lieferte die Holzfeuchte über den Widerstand gemessen in der Decklage tiefere und in der Mittellage höhere Werte im Vergleich zur Darmmethode (vgl. *Tabelle 5*).

4.1.2 Eigenspannungen

Aufgrund des hohen E-Moduls und des geringen Quellmasses von Holz in Faserrichtung, waren die Dimensionsänderungen bei den vorhandenen Spannungen zu gering, um sie in erforderlicher Genauigkeit bestimmen zu können. In Faserrichtung wurden daher keine Spannungen gemessen.

Nachfolgend werden nur die Spannungen senkrecht zur Faserrichtung behandelt. *Abbildung 8* zeigt die Ergebnisse. Insgesamt betragen die errechneten Spannungen maximal $0,7 \text{ N/mm}^2$. Ein deutlicher Einfluss der Oberflächenbeschichtung war nicht nachweisbar.

4.1.3 Rissbildung

Die Risse wurden in grosse und kleine sowie in Risse entlang von Leimfugen eingeteilt. Es wurde eine Häufung der Risse in Klebfugennähe festgestellt, vermutlich bedingt durch den veränderten Faserverlauf. Zwischen den Versuchsreihen sind recht deutliche Unterschiede vorhanden.

Am stärksten war die Bildung von Rissen bei den unbehandelten Platten. Bei den mit Lein-/Fischöl behandelten war sie etwas geringer als bei den mit Holzschutzlasur behandelten. Sehr gering war die Rissbildung in der Platte mit geschlitzter Decklage. Dort erfolgte die Rissbildung in der Nut, der Stelle mit der höchsten Spannungskonzentration. Die Risse in den Nuten wurden nicht berücksichtigt, da sie vom Nutzer nur schwer wahrgenommen werden können. Beim Thermoholz kam es häufig zum Öffnen der Leimfugen. Dies weist auf Verklebungsprobleme hin (*Abbildung 9*).

4.2 Differenzklimalagerung

4.2.1 Feuchteprofil

Insgesamt sind die Feuchteveränderungen während des Versuchs relativ gering, da der Klimawechsel nur eine verhältnismässig kurze Zeit umfasste.

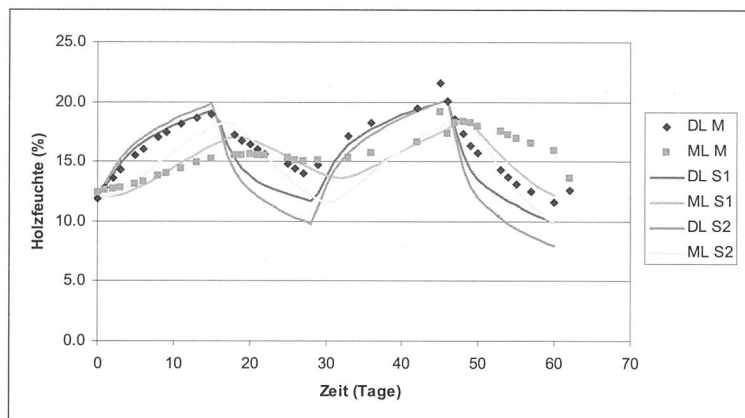


Abbildung 16: Vergleich der gemessenen und der berechneten Feuchten für die mit Lein-/Fischöl behandelten Platten.

ML: Mittellage, DL: Decklage, M: Messung, S1: Simulation 1, S2: Simulation 2.

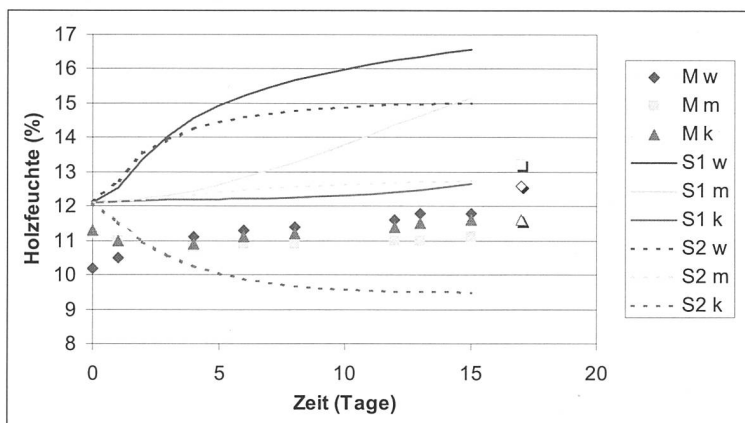


Abbildung 17: Gemessener und berechneter Feuchteverlauf für die unbehandelte Platte im Differenzklima.

Die freistehenden Punkte am Ende stellen die Werte der Darrproben dar. M: Messung, S1: Simulation 1, S2: Simulation 2, w: warmseitige Decklage, m: Mittellage, k: kaltseitige Decklage.

Vergleich mit und ohne Wärmeisolation

Beim Aufbau mit Isolation (simuliertes Wandelement nach *Abbildung 4*) wurden in der Massivholzplatte nur geringe Feuchteveränderungen gemessen. Auf der Kaltseite nahm die Holzfeuchte um etwas mehr als 1% zu, in der Mittellage nahm sie um 0,5% ab und in der warmseitigen Decklage blieb sie annähernd konstant. Demgegenüber waren in der 70-mm-Platte ohne Isolation grössere Änderungen feststellbar. In beiden Decklagen, sowohl die der kalten wie auch die der warmen Seite zugeordneten, war eine deutliche Zunahme der Holzfeuchte um rund 2,5 bzw. 1,5% festzustellen. In der Mittellage nahm die Feuchte zunächst ab um anschliessend wieder zuzunehmen (vgl. *Abbildung 10*).

Aus den Faserdämmplatten wurde mittels Darrprobe die Feuchte bestimmt. Auf der wärmeren Seite betrug die Holzfeuchte 13,4%, in der Mitte 10,6% und auf der kälteren Seite 11,1%. Im Normalklima bei 20 °C und 65% relativer Luftfeuchte betrug die Gleichgewichtsfeuchte 7,8%.

Vergleich geschlitzte und ungeschlitzte Mittellage

Bei beiden Platten war ein ähnlicher Verlauf des Feuchteprofils festzustellen. Zunächst sank in der Mittelschicht die Holzfeuchte und stieg anschliessend an. In den Decklagen war auf der Warmseite eine kontinuierliche Zunahme zu verzeichnen. Auf der kälteren Seite stieg bei der Platte mit geschlitzter Mittellage die Holzfeuchte um 2,5%, bei der ungeschlitzten um 0,3%. (vgl. *Abbildung 11*).

Einfluss der Oberflächenbehandlung

Der Einfluss der Oberflächenbeschichtung macht sich deutlich bemerkbar, die Feuchteaufnahme wird reduziert bzw. verzögert.

Der Feuchteverlauf war bei beschichteten wie unbeschichteten Platten sehr ähnlich. Zunächst war in der Mittellage ein Absinken und anschliessend ein Wiederanstieg festzustellen. Auf der Warmseite war ein leichter, stetiger Anstieg um etwa 1,5% Holzfeuchte zu verzeichnen (vgl. *Abbildung 12*).

Bei der unbehandelten 60-mm-Platte lieferte die Messung in der kaltseitigen Lage deutlich zu tiefe Werte, was vermutlich auf Kontaktschwierigkeiten zwischen Elektroden und Holz zurückzuführen war.

4.2.2 Temperaturprofil

Die Temperaturen änderten sich relativ schnell nach dem Starten des Differenzklima. Anschliessend blieben die Temperaturprofile für die gesamte Versuchszeit nahezu konstant. Am langsamsten stellte sich das Temperaturprofil beim kompletten Wandaufbau ein. Dort waren erst nach 24 Stunden keine Veränderungen mehr festzustellen (vgl. *Abbildung 13*). Die Wärmeisolation der Faserdämmplatten machte sich deutlich bemerkbar. Die Temperaturprofile bei den drei Platten ohne Isolation waren sich relativ ähnlich. (vgl. *Abbildung 14*).

4.3 Feuchtesimulation

4.3.1 Wechselklima

Die berechneten Werte stimmen insbesondere in den Decklagen recht gut mit den gemessenen Werten überein (vgl. *Abbildung 15*). In der Mittellage sind dagegen die berechneten Holzfeuchtigkeiten höher als die gemessenen. Dies betrifft insbesondere die Variante 2 der Simulation (Werte aus Materialdatenbank).

Beim Versuch mit der Beschichtung von Lein-/Fischöl (*Abbildung 16*) ist zu berücksichtigen, dass die Rechenwerte mit einem angenommenen Dampfdiffusionskoeffizienten von 400 und einer Schichtdicke von 0,09 ermittelt wurden. Hierzu müssen in weiteren Untersuchungen die exakten Kennwerte bestimmt werden. So stimmt der Anstieg der berechneten Feuchte in den Deckschichten gut mit den gemessenen Werten überein. Allerdings nimmt sie während den Trockenperioden deutlich zu schnell ab. Bei den Mittellagen verhält es sich ähnlich wie bei den unbehandelten Platten. Die berechneten Feuchteveränderungen sind im Vergleich mit den gemessenen Werten zu gross.

4.3.2 Differenzklima

Abbildung 17 zeigt die Mess- und Rechenergebnisse für das Differenzklima.

Zuerst wurden die Temperaturen verglichen. Bei der vorgegebenen Einstellung lagen die berechneten Werte etwas zu tief. Nach der Reduktion des kaltseitigen Wärmeübergangskoeffizienten von 25 W/m²K auf 17 W/m²K, war eine bessere Übereinstimmung zu verzeichnen.

Die gemessenen Änderungen sind insgesamt deutlich geringer als die berechneten. Insbesondere für die warmseitige Decklage liefert das Programm stark zunehmende Holzfeuchten, welche beim Versuch nicht gemessen wurden. Zwischen den zwei Berechnungsvarianten sind relativ grosse Unterschiede vorhanden.

Zusammenfassung

Untersucht wurde das Feuchteverhalten von dreischichtigen, 60 bis 70 mm dicken Massivholzplatten mit verschiedener Behandlung bzw. unterschiedlichem Aufbau bei klimatischer Beanspruchung. In einem ersten Versuch wurde ein Wechselklima mit zwei Zyklen feucht-trocken gefahren, wobei die Feuchte über die Zeit in Deck- und Mittellage elektrisch mittels Widerstandsmessung gemessen wurde. Am Ende der letzten Feucht- sowie der letzten Trockenphase wurde an einigen Platten die Spannung zwischen den Lagen mittels Freischneiden bestimmt. Zudem wurde die Rissbildung in den Decklagen aufgezeichnet. In einem zweiten Versuch wurde ein Differenzklima mit einer kalten und einer warmen Seite gefahren, wobei der Feuchteverlauf über die Zeit in den drei Lagen elektrisch gemessen wurde.

Résumé

Etude de la répartition hydrique et de la formation de tension dans les éléments de construction en bois soumis à un changement de climat lors du stockage

Le comportement hydrique de panneaux massifs trois plis, mesurant entre 60 et 70 mm d'épaisseur et traités ou construits selon différentes méthodes a été étudié dans le cadre de contraintes climatiques. Une première expérience a consisté à faire varier le climat lors de deux cycles: l'un humide et l'autre sec. La mesure électrique de la résistance a permis de suivre l'évolution de la teneur hydrique dans les couches extérieure et intérieure. Au terme de chaque phase humide et sèche, on a déterminé, pour quelques panneaux, la tension exercée entre les couches en les incisant. La formation de fissures a en outre été enregistrée dans les plis extérieurs. Une deuxième expérience a consisté à faire varier le climat lors d'un cycle froid et d'un cycle chaud. La variation hydrique a été mesurée électriquement au fil du temps dans les trois couches.

Traduction: CLAUDE GASSMANN

Summary

Investigation of moisture distribution and stress formation in timber construction materials under changing climatic conditions

The work examined the behaviour of moisture in three-layered, massive, 60 to 70 mm thick wood panels using various methods or diverse structures under climatic stress. In a first test samples were subjected to an alternating wet/dry climate, whereby the moisture was continuously measured for resistance in the outer and middle layer using an electric charge. At the end of each humid and dry phase the tension between the layers on some panels was determined by cutting them open. In addition the occurrence of cracks in the outer layers was recorded. In a second test a climatic difference with a cold and a warm side were carried out, whereby the moisture distribution in the three layers was continuously measured using an electric charge.

Translation: ANGELA RAST-MARGERISON

Literatur

- CERLIANI, C.; BAGGENSTOSS, T. 2000: Holzplattenbau. Baufachverlag/Lignum, Zürich.
 FUNK, M.; GRÜNEWALD, J. 2001: Das Simulationsprogramm Delphin 4.2 für gekoppelten Massen- und Energietransport in porösen Stoffen. Gesundheits-Ingenieur 122, 6: 297–305.

- HOWALD, M. 2002: Untersuchungen zur Formbeständigkeit von HDF-Platten bei der Produktion von Laminatfußböden. Diplomarbeit ETH Zürich, unveröffentlicht.
 JÖNSSON, J.; SVENSSON, S. 2004: A contact free measurement method to determine internal stresses states in glulam. Holzforschung 58, 2: 148–153.
 KOPFER, H. 1974: Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen. Bauverlag GmbH, Wiesbaden.
 KÜNZEL, H.M. 1994: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Stuttgart.
 LUTZ, P. et al. 1994: Lehrbuch der Bauphysik: Schall, Wärme, Feuchte, Licht, Brand, Klima, 3. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Teubner, Stuttgart, 624 S.
 PACHLER, R. 2001: Feuchteverhalten von Massivholzplatten. Diplomarbeit, Fachhochschule Kuchl.
 PETZOLD, H.; NIEMZ, P.; HÄUPL, P. 2003: Untersuchungen zur Messung und Simulation der Feuchteänderung von dreischichtigen Massivholzplatten bei Klimawechsel. Holz als Roh- und Werkstoff 61, 1: 8–12.
 POPPER, R.; NIEMZ, P.; EBERLE, G. 2002: Diffusionsvorgänge in Holzbauplatten unter stationären Bedingungen. Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit im Trocken- und Nassbereichverfahren. Interner Bericht ETHZ.
 SIAU, J.F. 1984: Transport in wood. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.
 SONDEREGGER, W.; NIEMZ, P. 2004: Untersuchung der Rissbildung an bei unterschiedlicher Feuchte verklebten Massivholzplatten. Holz, Mering 11/12: 32–34.
 VANEK, M.; TEISCHINGER, A. 1989: Diffusionskoeffizienten und Diffusionswiderstandszahlen von verschiedenen Holzarten. Holzforschung und Holzverwertung 43,1: 3–7.

Dank

Die Autoren danken der Firma Formateam für die Unterstützung bei der Materialbereitstellung.

Autoren

- Prof. Dr.-Ing. habil. PETER NIEMZ, ETH Zürich, Institut für Baustoffe (IfB), Holzphysik, Schafmattstrasse 6, 8093 Zürich. E-Mail: niemz@ifb.baug.ethz.ch.
 HANS BÄRTSCHI, dipl. Forsting. ETH, ETH Zürich, Institut für Baustoffe (IfB), Holzphysik, Schafmattstrasse 6, 8093 Zürich.
 MARTIN HOWALD, dipl. Forsting. ETH, ETH Zürich, Institut für Baustoffe (IfB), Holzphysik, Schafmattstrasse 6, 8093 Zürich.