

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

**Forschungsbericht für das Kuratorium des Fonds zur
Förderung der Wald- und Holzforschung Nr. 2004.02**

**Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit neuartiger Holz-
werkstoffe und Werkstoffverbunde**

A. FOGLIA, W. SONDEREGGER, P. NIEMZ, H. BADER, A. WEBER

Zürich, Juli 2006

Teil 1

**Untersuchungen zu ausgewählten Einflussfaktoren auf die
Wärmeleitfähigkeit von Holz- und Verbundwerkstoffen**

Zusammenfassung

An Holz und Holzverbundwerkstoffen wurde die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur und teilweise zusätzlich in Abhängigkeit von der Holzfeuchte gemessen. Weiter wurde an Massivholzplatten der Einfluss der Jahrringausrichtung und der Plattendicke, der Einfluss von Hohlräumen in den Mittellagen sowie der Einfluss von Holzwerkstoffplatten in den Mittellagen geprüft. Die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit der Temperatur variierte zwischen $0.13 \cdot 10^{-3}$ und $0.79 \cdot 10^{-3} \text{ W/mK}^2$ und war sowohl von der Plattendicke als auch von der Dichte abhängig. Die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Feuchte betrug zwischen 0.51% (Faserdämmplatte) und 1.81% (MDF-Fussbodenplatte) pro Prozent Holzfeuchte. Bei ein- und dreischichtigen Massivholzplatten aus Fichtenholz wurden 8-10% tiefere Wärmeleitfähigkeitswerte in tangentialer Richtung gegenüber Werten in radialer Richtung gemessen. Weiter konnte ein Einfluss der Plattendicke auf die Wärmeleitfähigkeit beobachtet werden. Durch den Hohlraumanteil in Mittellagen von Massivholzplatten konnte analog zur dadurch reduzierten Dichte eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit gegenüber Platten ohne Hohlräume gemessen werden. Durch die Verwendung von Holzwerkstoffen in den Mittellagen der Massivholzplatten erfolgte bei OSB und MDF als Mittellage ein geringer Anstieg der Wärmeleitfähigkeit, bei Faserdämmstoffen eine deutliche Reduktion der Wärmeleitfähigkeit. Bei thermisch behandelten einschichtigen Massivholzplatten aus Fichtenholz konnte die Wärmeleitfähigkeit um ca. 12% reduziert werden.

Inhaltsverzeichnis

1	EINFÜHRUNG.....	1
2	MATERIAL UND METHODEN.....	6
2.1	Versuchsmaterial.....	6
2.2	Wärmeleitfähigkeitsmessgerät.....	8
3	ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....	11
3.1	Überblick über die Resultate.....	11
3.2	Einfluss der Jahrringlage.....	12
3.3	Einfluss der Plattendicke.....	13
3.4	Einfluss von Hohlräumen in den Platten.....	14
3.5	Einfluss von Holzwerkstoffplatten in den Mittellagen.....	16
3.6	Einfluss der Feuchte.....	17
3.7	Weitere Einflüsse.....	18
4	SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	19
5	LITERATURVERZEICHNIS.....	20
ANHANG 1 – 5	Tabellen mit Wärmeleitfähigkeitswerten.....	23

1 Einführung

Bezüglich des Wärmeverhaltens besitzen Holz und Holzwerkstoffe gegenüber anderen Baustoffen erhebliche Vorteile (niedrige Wärmeleitfähigkeit und hohe Phasenverschiebung mit starker Reduzierung der Amplitude). Da im Bauwesen zunehmend neue Holzwerkstoffe eingesetzt werden (z.B. Massivholzplatten, OSB, Brettstapelelemente) ist es wichtig, exakte Materialkennwerte zu erhalten, da sonst für die Berechnung einer Konstruktion auf z.T. erheblich abweichende Schätzwerte zurückgegriffen werden muss. So beträgt z.B. in der SIA 279 der tabellierte Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit für Holzfaserdämmplatten 0.080 W/mK, während die überwachten Nennwerte bei 0.044-0.052 W/mK liegen.

Gemäss Zürcher und Frank (2004) sind bezüglich des Wärmeverhaltens von Bauten bauphysikalisch im Wesentlichen drei Arten des Wärmeaustausches zu beachten: Die Wärmeleitung (hauptsächlich in festen Körpern und stehenden Flüssigkeiten infolge Wärmeübertrags durch thermische Gitterschwingung und frei bewegliche Elektronen), die Wärmestrahlung und die Wärmeströmung (Konvektion).

In diesem Bericht wird auf die Wärmeleitung näher eingegangen und diese bei Fichtenholz und verschiedenen Holzwerkstoffen untersucht.

Als Messgrösse dient die Wärmeleitfähigkeit λ (= Wärmeleitzahl). Diese wird definiert als Wärmemenge, welche in 1 s zwischen zwei planparallelen Flächen von 1 m² im Abstand von 1 m bei einer Temperaturdifferenz von 1 K durch ein Material fliesst (Zürcher und Frank 2004).

Je geringer die Wärmeleitfähigkeit eines Werkstoffes ist, desto besser ist seine Wärmedämmwirkung. Die Wärmeleitfähigkeit ist jedoch bei vielen Baustoffen, speziell bei porösen Werkstoffen, keine konstante Grösse, da sie von der Zusammensetzung, der Rohdichte, der Porenstruktur, dem Feuchtegehalt und der Temperatur abhängt (Zürcher und Frank 2004). Bei Holz sind die wichtigsten Einflussfaktoren bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit die Holzart, die Dichte, der Feuchtegehalt, die Richtung des Wärmeflusses (Anisotropie), die Faserneigung und das Verhältnis zwischen Volumen bzw. Dicke der Probe und dem Feuchtegehalt (Suleiman et al. 1999). Dies gilt ähnlich auch für Holzwerkstoffe.

Den stärksten Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit hat die Rohdichte. Kollmann (1951) in Niemz (1993) hat für Vollholz in und quer zur Faserrichtung folgende Gleichungen bestimmt:

- In Faserrichtung:

$$\lambda_{\parallel} = 0,026 + 0,46 \cdot \rho \cdot 10^{-3} \quad \text{Gleichung 1}$$

- Senkrecht zur Faserrichtung:

$$\lambda_{\perp} = 0,026 + 0,195 \cdot \rho \cdot 10^{-3} \quad \text{Gleichung 2}$$

λ_{\perp} Wärmeleitzahl senkrecht zur Faserrichtung [W/(m·K)]

λ_{\parallel} Wärmeleitzahl in Faserrichtung [W/(m·K)]

ρ Rohdichte [kg/m³]

Aus Gleichung 2 lässt sich folgende Gleichung zur Dichtekorrektur der Wärmeleitfähigkeit von Vollholz quer zur Faserrichtung herleiten:

$$\lambda_{\perp,2} = \lambda_{\perp,1} + 0,195 \cdot (\rho_2 - \rho_1) \cdot 10^{-3} \quad \text{Gleichung 3}$$

$\lambda_{\perp,1}, \lambda_{\perp,2}$ = Wärmeleitzahl senkrecht zur Faserrichtung [W/(m·K)]
 ρ_1, ρ_2 = Rohdichte [kg/m³]

Für Spanplatten konnte anhand eines Diagramms in Schneider und Engelhardt (1977) eine analoge Gleichung hergeleitet werden:

$$\lambda_{s2} = \lambda_{s1} + 0,145 \cdot (\rho_2 - \rho_1) \cdot 10^{-3} \quad \text{Gleichung 4}$$

$\lambda_{s1}, \lambda_{s2}$ = Wärmeleitzahl von Spanplatten [W/(m·K)]
 ρ_1, ρ_2 = Rohdichte [kg/m³]

Weiter hat auch die Richtung des Wärmeflusses einen starken Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit sowohl von Holz als auch von Holzwerkstoffen, wie bereits aus den Gleichungen von Kollmann ersichtlich wurde (Gleichungen 1 und 2). So ist nach Schneider und Engelhardt (1977) die Wärmeleitfähigkeit im darrtrockenen Zustand in Faserrichtung bei Fichte 2.8 – 3.1mal, bei Buche 2.9 – 3.5mal und bei Kiefer 2.2 – 2.6mal so hoch wie quer zur Faserrichtung. Diese Tendenz nimmt mit Zunahme der Holzfeuchte ab (dies wird auch von Steinhagen (1977) bestätigt).

Zwischen dem Wärmefluss in radialer und tangentialer Richtung bestehen keine grossen Unterschiede. Oft wird deshalb einfach ein Wert quer zur Faserrichtung angegeben. In tangentialer Richtung ist jedoch die Wärmeleitfähigkeit allgemein etwas niedriger als in radialer Richtung. Dieser Unterschied wird einerseits vom Anteil der Holzstrahlen (Laubholz) und andererseits vom Spätholzanteil (Nadelholz) beeinflusst (Steinhagen 1977). Schneider und Engelhardt (1977) haben für Buche (15 – 19% höhere Werte in radialer Richtung) und Kiefer (11 – 16 % höhere Werte in radialer Richtung) dieselbe Tendenz festgestellt, während für Fichte ein gegenteiliges Verhalten (8-10% tiefere Werte in radialer Richtung) gemessen wurde (entgegen Steinhagen (1977), wo auch für Fichte leicht niedrigere Werte in tangentialer Richtung angegeben sind).

Bei Holzwerkstoffen bestehen grosse Unterschiede in und senkrecht zur Plattenebene. Nach Schneider und Engelhardt (1977) betrug die Wärmeleitfähigkeit in Plattenebene bei mit Phenol- und mit Harnstoffharz verleimten Spanplatten das 1.9 – 2.4fache des Wertes senkrecht zur Plattenebene.

Einen deutlichen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit haben auch die Temperatur und die Feuchte des Materials. Kanter (1957 in Steinhagen (1977)) hat für Birkenholz die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur zwischen -40°C und +100°C bei verschiedenen Holzfeuchten aufgezeichnet (Abbildung 1.1). Dabei zeigt sich, dass im darrtrockenen Zustand die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Temperatur zwischen -40°C und +100°C linear ansteigt, während oberhalb der Fasersättigung die Wärmeleitfähigkeit zwischen -40°C und 0°C abnimmt und erst ab 0°C mit zunehmender Temperatur ansteigt. Nach Suleiman et al. (1999) ist auch beim Einfluss der Temperatur eine Abhängigkeit von der Richtung des Wärmeflusses auszumachen. So nimmt bei Birkenholz die Wärmeleitfähigkeit zwischen 20°C und 100°C in longitudinaler Richtung um 14% (= 0.175%/K) und senkrecht zur Faserrichtung um 24% (=0.3%/K) zu.

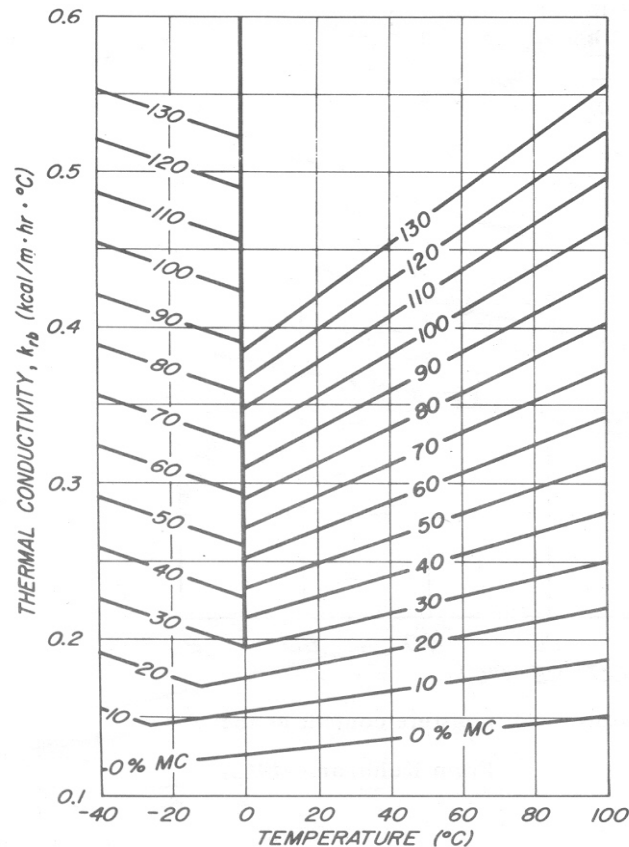


Abbildung 1.1: Wärmeleitfähigkeit von Birkenholz in radialer Richtung in Abhängigkeit von der Temperatur und der Holzfeuchte (nach Kanter (1957) in Steinhagen (1977))

Zum Einfluss der Feuchte auf die Wärmeleitfähigkeit erfolgte eine umfassende Zusammenstellung von Cammerer und Achtziger (1984) für verschiedene Baustoffe. Im Bereich von Vollholz wird die Wärmeleitfähigkeit von Fichte, Kiefer, Eiche und Buche, im Bereich der Holzwerkstoffe diejenige von Spanplatten in Abhängigkeit von der Feuchte dargestellt. Dabei beträgt die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit pro Prozent Holzfeuchte bei Vollholz 1 – 2% und bei den Spanplatten 1 – 2.4%.

Nach DIN 52612-2 wird ein Zuschlag von 15% zur Berücksichtigung des Feuchtigkeitseinflusses auf bei 10°C im trockenen Zustand gemessenen Holzwerkstoffplatten verlangt. Dies entspricht ca. 1% Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit pro 1% Wassergehalt.

Für die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Holzfeuchte bei Vollholz gilt nach Kollmann (1951) in Niemz (1993) folgende Formel:

$$\lambda_2 = \lambda_1 [1 - 0,0125(u_1 - u_2)] \quad \text{Gleichung 5}$$

λ_1 = Wärmeleitzahl bei Holzfeuchte u_1 [W/m·K]

λ_2 = Wärmeleitzahl bei Holzfeuchte u_2 [W/m·K]

u_1 = gemessene Holzfeuchte des Materials [%]

u_2 = Definierte Einheits-Holzfeuchte [%]

Gemäss Cammerer (1970) lässt sich der Einfluss der Feuchte auf die ca. 25fach höhere Wärmeleitfähigkeit von Wasser gegenüber der Luft zurückführen. Dadurch ergibt sich eine Erhöhung der Wärmeübertragung in feuchten Platten, da durch Feuchtigkeitsbewegungen auf-

grund von Diffusions-, Kapillar- und Sorptionsvorgängen zusätzlich Energie transportiert wird. Von Eis ist die Wärmeleitfähigkeit nochmals ca. viermal höher als von Wasser (Künzel 1994).

Zur Berechnung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit von (mineralischen) Baustoffen, wo im Gegensatz zu Holz und Holzwerkstoffen oft der volumetrische und nicht der massebezogene Feuchtegehalt verwendet wird, eignet sich nach Künzel (1986) folgende Beziehung:

$$\lambda_{uv} = \lambda_{tr} \cdot \left(1 + b \frac{1000}{\rho} u_v \right) \quad \text{Gleichung 6}$$

- λ_{uv} Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffes [W/mK]
 λ_{tr} Wärmeleitfähigkeit des trockenen Baustoffes [W/mK]
 ρ Rohdichte des trockenen Baustoffes [kg/m³]
 b Wärmeleitfähigkeitszuschlag [%/%]
 u_v Volumetrischer Feuchtegehalt des Baustoffes [-]

Wegen dem hygroskopischen Verhalten von Holz, das auf den massebezogenen Feuchtegehalt bezogen wird, ist die Verwendung des volumetrischen Feuchtegehaltes weniger geeignet. Dieser wird jedoch z.T. für die Simulation des Wärme- und Feuchtetransportes benötigt.

Tabelle 1.1 gibt eine Übersicht über die Wärmeleitfähigkeit quer zur Faser und die spezifische Wärmekapazität einiger Holzarten nach Gieck und Gieck (1995). Oft wird jedoch bei der spezifische Wärmekapazität nicht zwischen den Holzarten unterschieden. So wird in der DIN EN 12524 für die spezifische Wärmekapazität von Vollholz und Sperrholz allgemein ein Wert von 1600 J/kgK, für Spanplatten, OSB und Faserplatten ein Wert von 1700 J/kgK und für Faserdämmplatten ein Wert von 1400 J/kgK angegeben. Die spezifische Wärmekapazität ist wie die Wärmeleitfähigkeit von der Holzfeuchte abhängig und nimmt mit zunehmender Feuchte zu. Gemäss dem Holz-Lexikon (Lohmann et al. 2003) beträgt die spezifische Wärmekapazität bei Vollholz im Darrzustand 1300 J/kgK, bei 10% Holzfeuchte 1600 J/kgK und bei 100% Holzfeuchte 2800 J/kgK.

Tabelle 1.1: Wärmeleitfähigkeitswerte bei 20°C und spezifische Wärmekapazität im Temperaturbereich zwischen 0°C und 100°C für verschiedene Holzarten nach Gieck und Gieck (1995).

Holzart	Dichte ρ [g/cm ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Spez. Wärmekapazität c_p [kJ/(kg·K)]
Ahorn	~ 0.75	0.16	1.6
Birke	~ 0.65	0.142	1.9
Buche	~ 0.72	0.17	2.1
Eiche	~ 0.85	0.17	2.4
Erle	~ 0.55	0.17	1.4
Esche	~ 0.75	0.16	1.6
Fichte	~ 0.45	0.14	2.1
Kiefer	~ 0.75	0.14	1.4
Lärche	~ 0.75	0.12	1.4
Pappel	~ 0.50	0.12	1.4
Holzkohle	~ 0.4	0.084	0.84

In Tabelle 1.2 sind weitere Wärmeleitfähigkeitswerte aufgeführt.

Tabelle 1.2: Wärmeleitfähigkeitswerte bei 20°C für verschiedene Materialien gemäss Wärmeatlas (1974) in Krischer und Kast (1992).

Material	Dichte ρ [g/cm³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Spez. Wärmekapazität c_p [kJ/(kg·K)]
Balsaholz	101	0.040	-
Sägemehl (lufttrocken)	190 - 215	0.06	-
Hobelspäne (lufttrocken)	95 - 140	0.06	-
Strohfaser	140	0.045	-

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsmaterial

An zwei am Institut für Baustoffe (Holzphysik) der ETH Zürich durchgeführten Diplomarbeiten (Bader 2005, Weber 2006) wurde gezielt die Wärmeleitfähigkeit verschieden aufgebauter Dreischichtplatten untersucht. Die Verklebung der Platten erfolgte mit den 1-Komponenten Polyurethanklebstoffen PURBOND HB 181 (Bader) und PURBOND HB 110 (Weber). Vor der Prüfung der Wärmeleitfähigkeit wurden die Platten bei 20°C/65% relativer Luftfeuchte bis zur Massekonstanz klimatisiert und danach bei einer mittleren Prüftemperatur von 10°C, 25°C und 40°C (Bader) bzw. 10°C, 20°C und 30°C (Weber) nach DIN 52612 Teil 1 geprüft.

Es wurden folgende Eigenschaften untersucht:

- Massivholzplatten mit unterschiedlicher Ausrichtung der Jahrringe in den Lagen (tangential = stehende Jahrringe (Riftschnitt); radial = liegende Jahrringe) (Bader, Weber)
- Massivholzplatten unterschiedlicher Dicken (Bader)
- Massivholzplatten mit Hohlräumen in den Mittellagen, d.h. geschlitzten Mittellagen oder Abständen zwischen den Lamellen in der Mittellage (Bader)
- Dreischichtplatten mit Mittellagen aus Holzwerkstoffen (OSB, MDF, leichte Faserplatten) (Bader, Weber)

Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die von Bader (Nr. 1 – 14) und von Weber (Nr. 15 – 20) untersuchten Platten. Es wurden jeweils 3 Platten pro Variante geprüft. Bei Weber wurden zusätzlich vor der Verklebung die Einzelschichten der Platten gemessen. Die Massivholzlagen bzw. –lamellen bestanden ausschliesslich aus Fichtenholz und wurden bei den Varianten 1 – 6, 8 – 14 und 17 – 20 von der Schilliger Holz AG (Küssnacht), bei der Variante 7 von der Schuler AG und bei den Varianten 15 und 16 am Institut für Baustoffe (Holzphysik) der ETH Zürich hergestellt.

Tabelle 2.1: Überblick über die von Bader (Nr. 1 – 14) und von Weber (Nr. 15 – 20) untersuchten Platten

Nr.	Plattenaufbau (Schichtdicken in mm)	Lamellenbreite (Mittellage)	Lamellenbreite (Decklagen)
1	10/10/10	70 mm, verleimt	70 mm, verleimt
2	10/20/10	70 mm, verleimt	70 mm, verleimt
3	10/40/10	70 mm, verleimt	70 mm, verleimt
4	7/14 _G /7	50-80 mm, verleimt, doppelseitig geschlitzt (11 mm tief, im Abstand von 10 mm alternierend)	100 mm, verleimt
5	20/30 _G /20	70 mm, verleimt, doppelseitig, geschlitzt (20 mm tief, im Abstand von 16 mm alternierend)	70 mm, verleimt
6	10 _{st} /10/10 _{st}	70 mm, verleimt	70 mm, verleimt, stehende Jahrringe
7	14 _{st} /14 _{st} /14 _{st}	25 mm, verleimt, stehende Jahrringe	25 mm, verleimt, stehende Jahrringe
8	10/19 _{MDF} /10	MDF-Platte	70 mm, verleimt
9	10/17 _{OSB} /10	OSB-Platte	70 mm, verleimt
10	10/10 ₀ /10	70 mm, unverleimt	70 mm, verleimt
11	10/10 ₅ /10	70 mm, mit 5 mm Abstand	70 mm, verleimt
12	10/10 ₁₀ /10	70 mm, mit 10 mm Abstand	70 mm, verleimt
13	10/10 ₃₀ /10	70 mm, mit 30 mm Abstand	70 mm, verleimt
14	10 _l /10/10 _l	70 mm, verleimt	70 mm, verleimt, liegende Jahrringe

Tabelle 2.1: Fortsetzung

Nr.	Plattenaufbau (Schichtdicken in mm)	Lamellenbreite (Mittellage)	Lamellenbreite (Decklagen)
15	10 _l /10 _l /10 _l	70-80 mm, verleimt	70-80 mm, verleimt
16	10 _{st} /10 _{st} /10 _{st}	70-80 mm, verleimt	70-80 mm, verleimt
17	10/18 _{Isorooft} /10	Weichfaserplatte	70 mm, verleimt
18	10/35 _{Isorooft} /10	Weichfaserplatte	70 mm, verleimt
19	10/52 _{Isorooft} /10	Weichfaserplatte	70 mm, verleimt
20	10/18 _{WP50} /10	MDF-Platte	70 mm, verleimt

G = geschlitzt; st = stehende Jahrringe; l = liegende Jahrringe; 0, 5, 10, 30 = Abstand zwischen den Lamellen; Isorooft = Weichfaserplatte (Pavatex AG); WP50 = MDF-Wandplatte (Kronospan Schweiz AG); MDF, OSB = MDF-, OSB-Platten (Kronospan Schweiz AG)

Weiter wurden am Institut für Baustoffe (Holzphysik) der ETH Zürich Holzwerkstoffplatten verschiedener holzverarbeitender Betriebe bezüglich ihrer Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur (Messtemperaturen 10°C, 20°C, 30°C bzw. 10°C, 25°C, 40°C) nach einer Klimatisierung bei Normalklima (20°C/65% relativer Luftfeuchte) untersucht. Zusätzlich wurde an ausgewählten Platten auch die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Holzfeuchte bestimmt. Dazu wurden die Platten bei verschiedenen Klima (20°C und 40%, 65% bzw. 80% relativer Luftfeuchte) bis zum Erreichen der Massekonstanz klimatisiert und danach gemessen.

Es wurden folgende Holzwerkstoffe geprüft:

a) Massivholz- und Sperrholzplatten

Schilliger Holz AG, Küssnacht am Rigi:

- Massivholzplatte, 70 mm (15/40/15), Mittellage einseitig geschlitzt
- Massivholzplatte, 70 mm (15/40/15), Mittellage zweiseitig geschlitzt

Hess & CO. AG, Döttingen:

- Buche Multiplex, 25 mm (Furnier: 2,5 mm, 11 Lagen), beidseitig geschliffen
- Buche Multiplex, 30 mm (Furnier: 2,5 mm, 13 Lagen), beidseitig geschliffen
- Buche Multiplex, 35 mm (Furnier: 2,5 mm, 15 Lagen), beidseitig geschliffen
- Buche Multiplex, 50 mm (Furnier: 2,5 mm, 21 Lagen), beidseitig geschliffen (Mittellagen jeweils 1,5 mm, Decklagen auf 1,5 – 2 mm heruntergeschliffen)

Balz Holz AG, Langnau i.E.:

- Massivholzplatten aus Fichte, einschichtig, unbehandelt und thermisch behandelt

b) MDF- und Spanwerkstoffplatten

Kronospan Schweiz AG, Menznau:

- Spanplatte V20: 10 mm, 16 mm, 19 mm, 40 mm
- OSB 3: 18 mm
- MDF V20: 3 mm, 6 mm, 16 mm, 19 mm, 40 mm
- MDF Fubo grün: 7 mm
- WP50 / DP50 (MDF Wand- und Dachplatte): 15 mm

c) Weichfaserplatten

Pavatex AG, Cham:

- Pavatherm, 60 mm
- Isolant (Pavatex Weichfaserplatte standard), 19 mm

GUTEX Holzfaserplattenwerk, H. Henselmann GmbH + Co KG, Waldshut-Tiengen:

- Thermowall: 20 mm, 60 mm, 100 mm
- Thermosafe: 20 mm, 60 mm, 100 mm
- Thermosafe-wd: 20 mm, 60 mm, 100 mm
- Ultratherm: 50 mm, 80 mm
- Multiplex-top: 18 mm, 36 mm

d) Wand- und Fensterrahmenelemente

Fensterfabrik Albisrieden AG, Zürich:

- Stropoly: Strofaserplatte (54 mm); PMDI verleimt; mit Grundierfolie beschichtet.
- Frinorm: Dreischichtige Verbundwerkstoffplatte: Spanlattendecklagen (V100, 16 mm); Mittellage aus PUR Hartschaum (22 mm); mit Grundierfolie beschichtet.

Nägeli AG, Gais:

- Vollholz-Wandelemente (zusammengesetzt aus gedübelten Brettern)

2.2 Wärmeleitfähigkeitsmessgerät

Für die Messungen wurde das Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät λ -Meter EP500 der Firma Lambda-Messtechnik GmbH, Dresden verwendet (Abbildung 2.1). Damit können Messungen an Werkstoffplatten von 500 mm x 500 mm Fläche im Temperaturbereich zwischen 10°C und 40°C bei Plattendicken von 10 – 120 mm durchgeführt werden. Der Anpressdruck kann zwischen 50 N/m² und 2500 N/m² variiert werden. Für die Weichfaserplatten wurde entsprechend der Norm DIN EN 13171 ein Anpressdruck von 250 N/m², für die übrigen Platten der höchst mögliche Anpressdruck von 2500 N/m² verwendet.



Abbildung 2.1: λ -Meter EP500

Abbildung 2.2 zeigt schematisch den Aufbau des Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerätes und anhand eines Beispiels das Temperaturfeld innerhalb einer zu prüfenden Werkstoffplatte. Das Anbringen von Schutzheizringen und eines Kühlringes ermöglicht das Messen im oben genannten Temperaturbereich, ohne dass die Raumtemperatur angepasst werden muss.

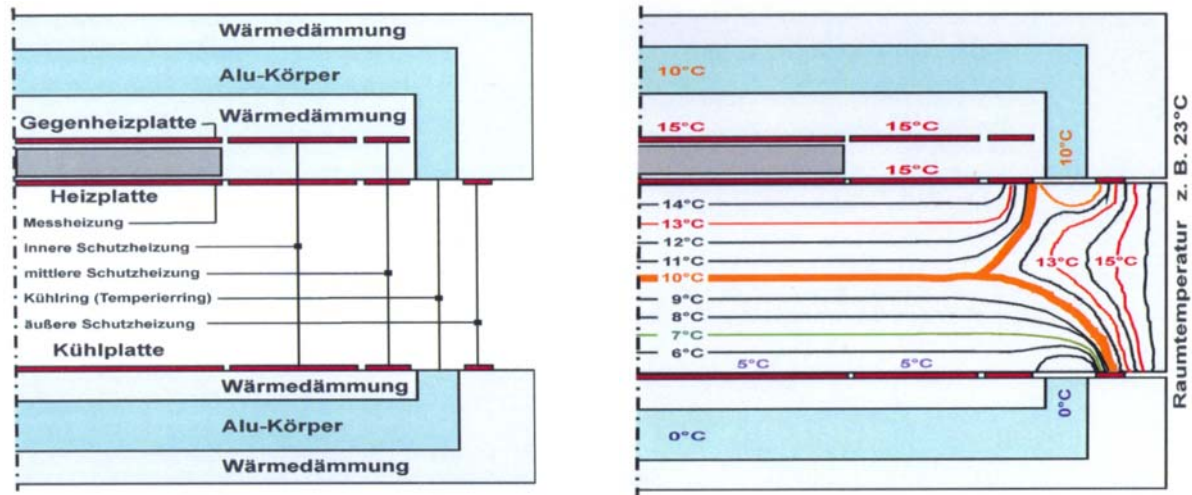


Abbildung 2.2: Vereinfachte Darstellung des inneren Aufbaus des Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerätes (links) und eines Temperaturfeldes in einem Prüfkörper (rechts) gemäss Produktebeschreibung des Herstellers.

Für die Messungen mit dem Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät λ -Meter EP500 ist die Konformität zu folgenden Normen nachgewiesen:

- ISO 8302
- EN 1946-2
- EN 12667
- EN 12664
- EN 12939
- DIN 52612

Die Wärmeleitfähigkeit wird beim Einplattenverfahren folgendermassen berechnet (nach DIN 52612 Teil1):

$$\lambda = \frac{\Phi \cdot s}{A \cdot (\vartheta_w - \vartheta_k)} \quad \text{Gleichung 7}$$

- λ Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
 Φ Wärmestrom, der im stationären Zustand senkrecht zur Probenoberfläche durch die Probe strömt [W]
 A Fläche der Heizplatte [m²]
 s Mittlere Dicke einer Probe [m]
 ϑ_w Mittlere Temperatur der Oberfläche der Probe auf der Heizplattenseite in °C
 ϑ_k Mittlere Temperatur der Oberfläche der Probe auf der Kühlplattenseite in °C

Dabei gilt für den Wärmestrom:

$$\Phi = U \cdot I \quad \text{Gleichung 8}$$

U Spannung [V]

I Strom [A]

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Überblick über die Resultate

Die Tabellen 3.1 und 3.2 geben einen Überblick über die von Bader und Weber gemessenen Wärmeleitfähigkeitsmessungen. Die übrigen Werte der am Institut an Holzwerkstoffen von verschiedenen holzverarbeitenden Betrieben gemessenen Wärmeleitfähigkeiten befinden sich in den Anhängen 1 - 5. Dort sind die Messwerte bei den jeweilig gemessenen Temperaturen sowie die auf Grund einer Regression bei 10°C bestimmten Werte und der Temperaturkoeffizient aufgelistet.

Tabelle 3.1: Wärmeleitzahlen der Diplomarbeit Bader (2005)

Variante	Plattenaufbau [mm]	Rohdichte [kg/m ³]	Holzfeuchte [%]	Wärmeleitzahl			Temperatur- einfluss
				λ -10	λ -10 (u = 12%)	λ -10 ($\rho = 437 \text{ kg/m}^3$)	T_c
				[W/m·K]	[W/m·K]	[W/m·K]	[W/m·K] ·10 ⁻³
1	10/10/10	417	11.65	0.091	0.092	0.096	0.28
2	10/20/10	436	12.27	0.096	0.096	0.096	0.24
3	10/40/10	432	12.58	0.099	0.098	0.099	0.43
4	7/14 _G /7	435 (462)	11.55	0.095	0.096	0.096 (0.091)	0.30
5	20/30 _G /20	394 (417)	12.59	0.094	0.093	0.101 (0.097)	0.48
6	10 _{st} /10/10 _{st}	424	11.57	0.088	0.088	0.091	0.22
7	14 _{st} /14 _{st} /14 _{st}	467	10.78	0.104	0.106	0.100	0.26
8	10/19 _{MDF} /10	596	9.20	0.105	-	-	0.30
9	10/17 _{OSB} /10	544	10.47	0.107	-	-	0.27
10	10/10 ₀ /10	446	12.00	0.101	0.101	0.099	0.29
11	10/10 ₅ /10	443 (450)	12.56	0.100	0.100	0.099 (0.098)	0.31
12	10/10 ₁₀ /10	418 (435)	12.39	0.094	0.094	0.098 (0.094)	0.30
13	10/10 ₃₀ /10	397 (441)	11.67	0.091	0.091	0.099 (0.090)	0.38
14	10 _l /10/10 _l	441	12.03	0.096	0.096	0.095	0.26

T_c = Temperaturkoeffizient von λ ; G = geschlitzt; st = stehende Jahrringe; l = liegende Jahrringe; 0, 5, 10, 30 = Abstand zwischen den Lamellen; in Klammern = Dichte der Platten ohne Hohlräume (nur Holz) und entsprechende dichtekorrigierte λ -Werte

Tabelle 3.2: Wärmeleitzahlen der Diplomarbeit Weber (2006)

Nr.	Plattenart (Schichtdicken in mm)	Feuchte [%]	Rohdichte [kg/m ³]	$\lambda \perp$ bei 10°C [W/mK]	n	$\lambda \perp$ bei 20°C [W/mK]	n	$\lambda \perp$ bei 30°C [W/mK]	n
Platten (Vollholz- und Verbundplatten)									
15	Vollholz (Fi), liegende Jahrringe: 10/10/10	13.9	446	0.108	3	0.111	3	0.112	3
16	Vollholz (Fi), stehende Jahrringe: 10/10/10	13.9	456	0.101	3	0.103	3	0.105	3
17	10/18 _{Isoroof} /10	11.0	355	0.066	3	0.068	3	0.071	3
18	10/35 _{Isoroof} /10	10.9	321	0.061	3	0.063	3	0.066	3
19	10/52 _{Isoroof} /10	10.8	304	0.057	3	0.061	3	0.065	3
20	10/18 _{WP50} /10	10.1	486	0.090	3	0.092	3	0.094	3
Einzellagen									
15e	Vollholz (Fi), liegende Jahrringe, 10 mm	–	431	0.101	3	0.104	9	0.105	3
16e	Vollholz (Fi), stehende Jahrringe, 10 mm	–	443	0.091	3	0.096	9	0.096	3
16- 20d	Vollholz (Fi), Jahrringe nicht ausgerichtet, 10mm	–	426	0.088	6	0.092	24	0.093	6
17m	Isoroof, 18 mm	–	226	–	–	0.048	3	–	–
18m	Isoroof, 35 mm	–	242	–	–	0.050	3	–	–
19m	Isoroof, 52 mm	–	239	–	–	0.052	3	–	–
20m	WP50, 15 mm	–	538	–	–	0.083	3	–	–

n = Anzahl Proben; e = Einzelschichten; d = Deckschichten; m = Mittelschichten; Isoroof = Weichfaserplatte; WP50 = MDF-Wandplatte

3.2 Einfluss der Jahrringlage

Weber hat den Einfluss der Jahrringlage auf die Wärmeleitfähigkeit an einschichtigen und dreischichtigen Massivholzplatten untersucht. Dazu wurden astfreie Platten mit stehenden Jahrringen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in tangentialer Richtung und Platten mit liegenden Jahrringen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in radialer Richtung im Labor-massstab hergestellt. Dabei ergaben sich um ca. 8-10% tiefere Werte in tangentialer Richtung entgegen Messungen von Schneider und Engelhardt (1977) zu dieser Holzart, jedoch in Übereinstimmung mit dem Verhalten anderer Holzarten (Buche, Kiefer) und Werten bei Steinhagen (1977). Bei den von Schilliger hergestellten, nicht in einer bestimmten Richtung (radial, tangential) ausgerichteten Platten ergaben sich noch tiefere Werte (Abbildung 3.1).

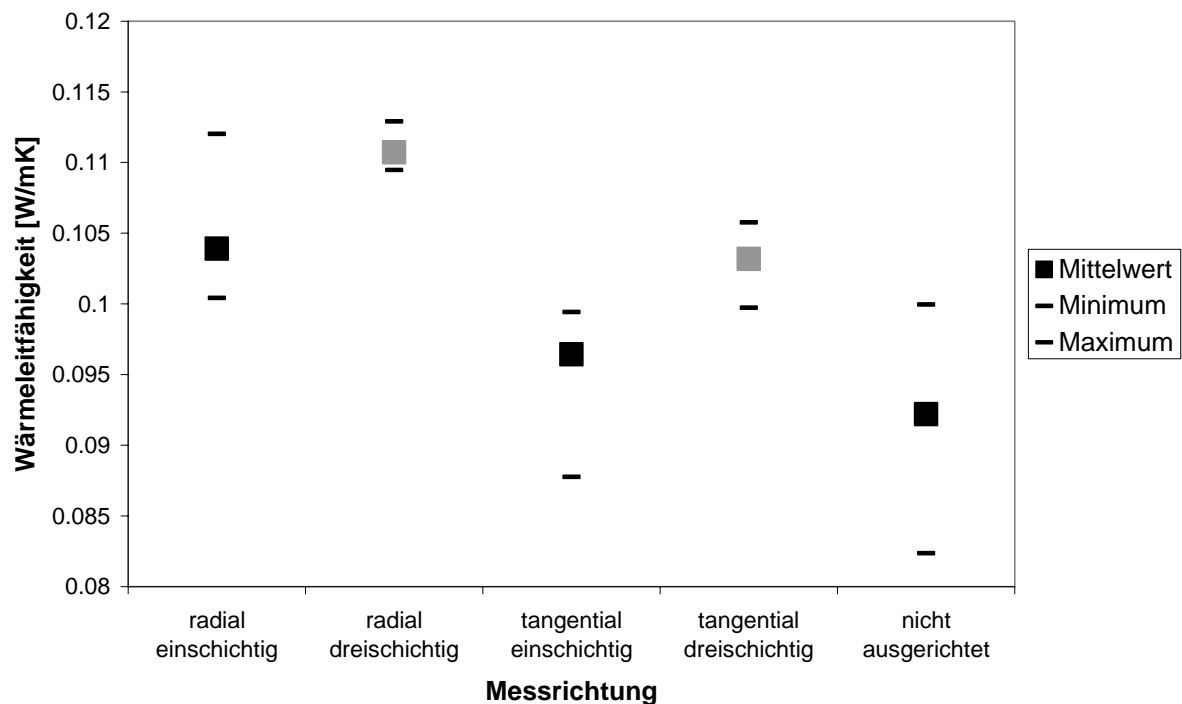


Abbildung 3.1: Einfluss der Jahrringlage (stehende Jahrringe = tangentielle Messrichtung; liegende Jahrringe = radiale Messrichtung) bei ein- und dreischichtigen Massivholzplatten aus Fichtenholz auf die Wärmeleitfähigkeit bei 20°C.

3.3 Einfluss der Plattendicke

In Abbildung 3.2 ist der Einfluss der Plattendicke auf die Wärmeleitfähigkeit bei drei verschiedenen Holzwerkstoffen dargestellt. Dazu wurden die Wärmeleitfähigkeiten pro Werkstoff auf eine einheitliche Dichte von 800 kg/m^3 bei den MDF-Platten, von 650 kg/m^3 bei den Spanplatten und von 437 kg/m^3 bei den Massivholzplatten umgerechnet. Für die Massivholzplatten wurde für die Umrechnung Gleichung 3 verwendet (vgl. auch Tabelle 3.1, Varianten 1 - 3). Für die Spanplatten und wegen mangelnder Datenlage auch für die MDF-Platten wurde Gleichung 4 verwendet. Die stärkste Abhängigkeit von der Plattendicke konnte bei den MDF-Platten festgestellt werden, die geringste Abhängigkeit bei den Massivholzplatten.

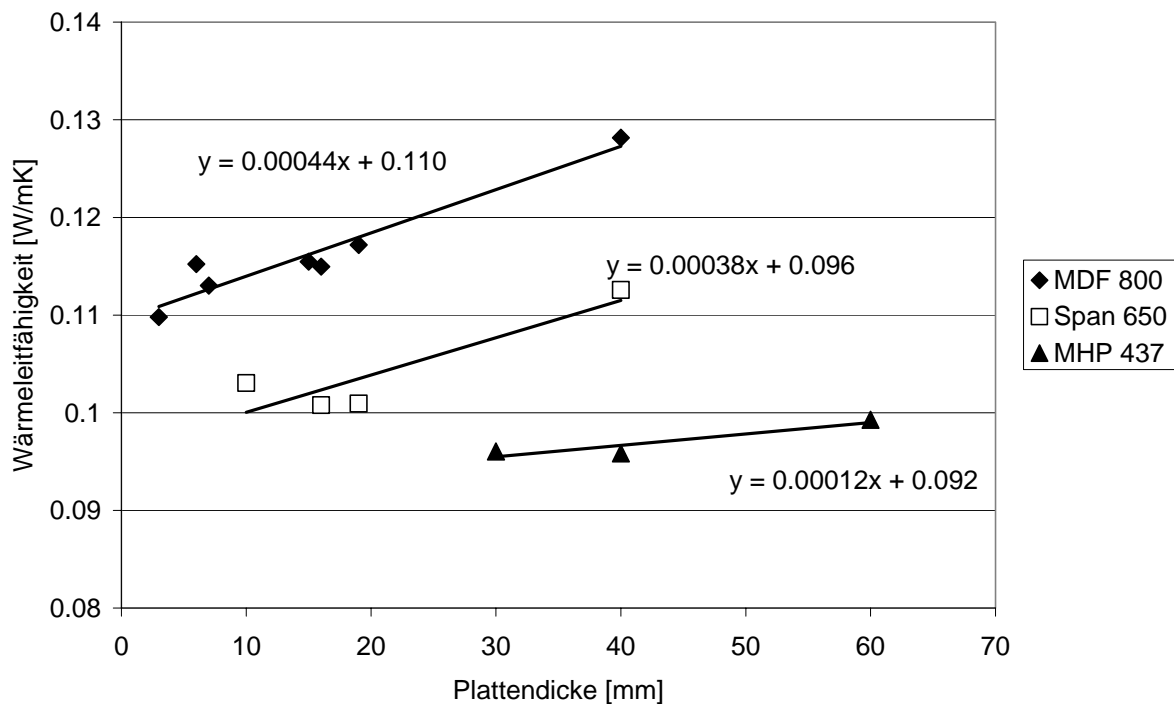


Abbildung 3.2: Einfluss der Dicke auf die Wärmeleitfähigkeit bei MDF-, Span- und Massivholzplatten bezogen auf eine Rohdichte von 800, 650 bzw. 437 kg/m³

3.4 Einfluss von Hohlräumen in den Platten

Bader hat den Einfluss von Hohlräumen in Massivholzplatten auf die Wärmeleitfähigkeit untersucht. Dazu wurden Platten mit geschlitzten Mittellagen oder mit Abständen zwischen den Lamellen in der Mittellage verwendet. Es wurden die Plattentypen Nr. 4, 5, 11, 12 und 13 sowie zum Vergleich die Plattentypen ohne Hohlräume Nr. 1 und 10 (s. Tabelle 3.1) untersucht. Um einen Trend sichtbar zu machen, wurden die Daten in Abbildung 3.3 anhand Gleichung 3 auf eine Holzfeuchte von 12% und eine Rohdichte von 437 kg/m³ (Vollholzanteil ohne Hohlraum) umgerechnet. Dabei ist eine deutliche Abnahme der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmendem Hohlraumanteil zu beobachten.

Sofern die Wärmeleitfähigkeit jedoch auf eine einheitliche Plattendichte von 437 kg/m³ umgerechnet wird, ist kein Trend mehr sichtbar (Abbildung 3.4), d.h. die Abnahme der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmendem Hohlraumanteil ist einzig auf die durch die Hohlräume bedingte niedrigere Plattendichte zurückzuführen. Demnach können, sofern von der Plattendichte und nicht von der Dichte des Vollholzes ausgegangen wird, für Platten mit Hohlräumen in den Mittellagen an die Dichte angepasste Wärmeleitfähigkeitswerte von Platten ohne Hohlräume verwendet werden.

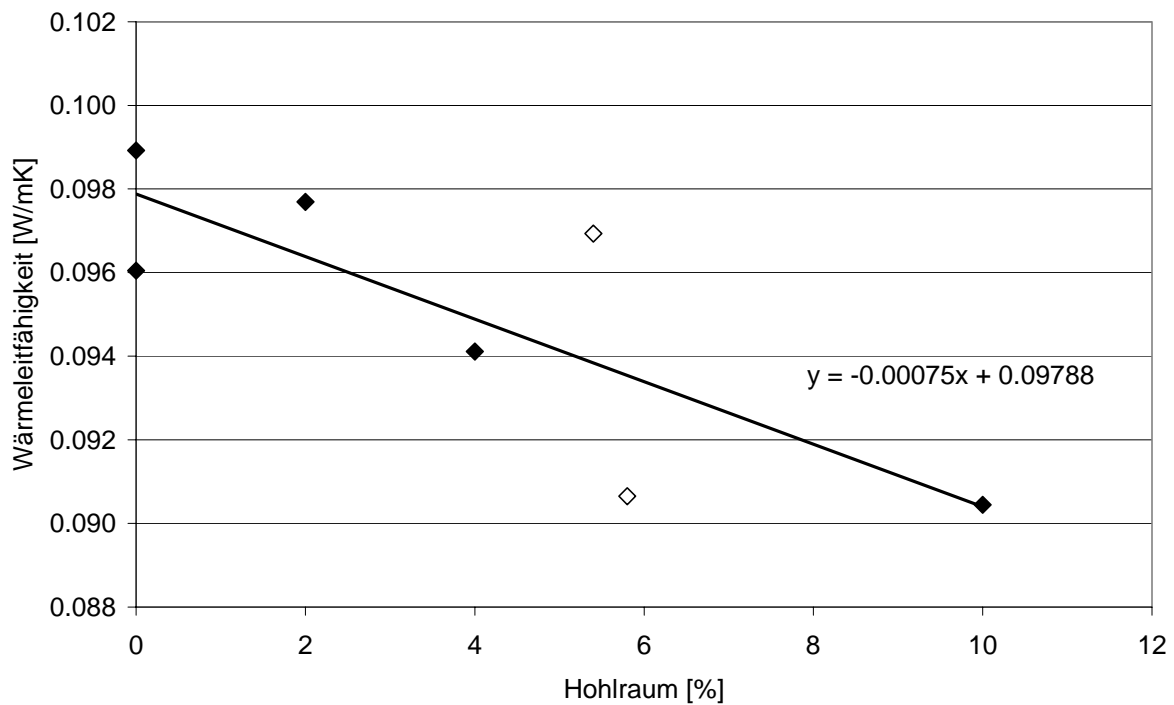


Abbildung 3.3: Einfluss von Hohlräumen (in Volumenprozent der ganzen Platte) in den Mittellagen von Massivholzplatten auf die Wärmeleitfähigkeit anhand von Daten von Bader. Wärmeleitfähigkeit bei 10°C korrigiert auf eine einheitliche Holzdicke. \diamond = Geschlitzte Mittellagen; \blacklozenge = Mittellagen mit Abständen zwischen den Lamellen.

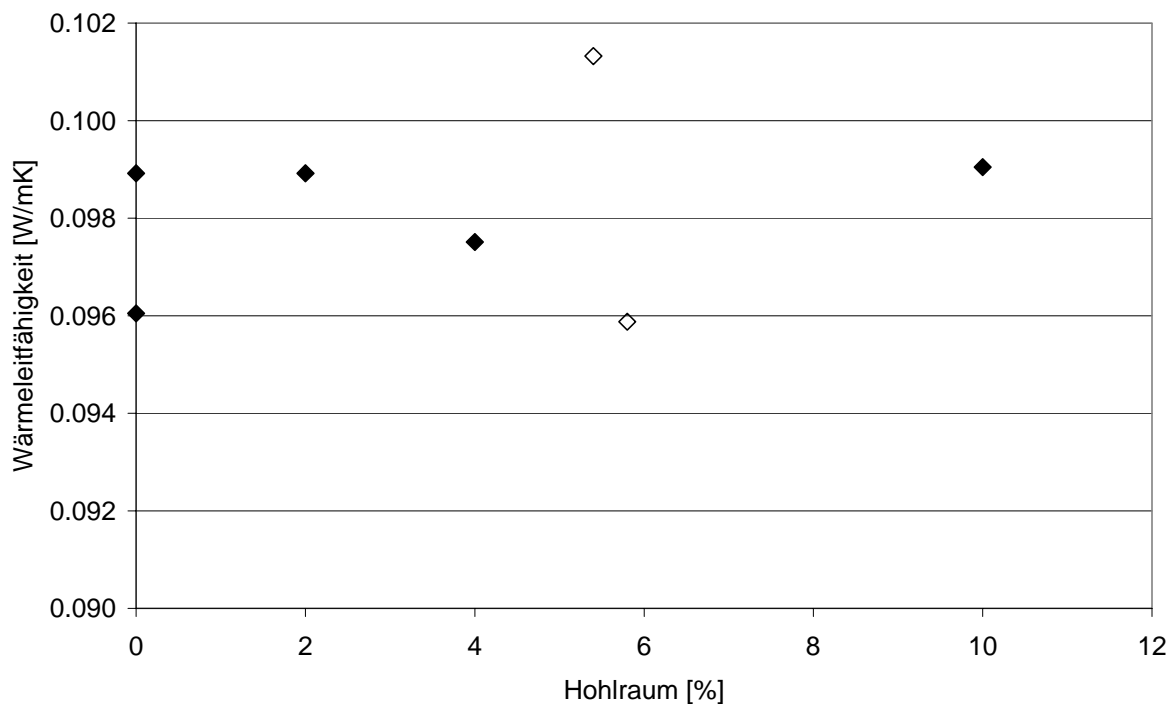


Abbildung 3.4: Einfluss von Hohlräumen (in Volumenprozent der ganzen Platte) in den Mittellagen von Massivholzplatten auf die Wärmeleitfähigkeit anhand von Daten von Bader. Wärmeleitfähigkeit bei 10°C korrigiert auf eine einheitliche Plattendicke. \diamond = Geschlitzte Mittellagen; \blacklozenge = Abstände zwischen den Lamellen der Mittellage.

3.5 Einfluss von Holzwerkstoffplatten in den Mittellagen

Abbildung 3.5 zeigt den Einfluss der Variation der Holzwerkstoffe in den Mittellagen auf die Wärmeleitfähigkeit anhand der Messungen von Bader. Dabei zeigt sich sowohl bei den Platten mit OSB- als auch mit MDF-Mittellagen eine deutlich tiefere Wärmeleitfähigkeit gegenüber Vollholz gleicher Dichte.

Jedoch wurden auch bei den Platten mit Vollholz-Mittellagen fast durchwegs niedrigere Werte gegenüber der von Kollmann (1951) allgemein für Holz quer zur Faserrichtung bestimmten Abhängigkeit (Gleichung 2) gemessen.

Gegenüber einer Vollholzmittellage führt die OSB bzw. MDF in der Mittellage infolge deren deutlich grösserer Rohdichte zu einem Anstieg der Wärmeleitzahl, während die Wärmeleitfähigkeit bei einer WP50-Mittellage trotz höherer Dichte etwa gleich bleibt und durch den Einsatz von Weichfaserplatten (IsorooF) als Mittellage bereits schon bei dünnen Platten deutlich gesenkt werden kann (Abbildung 3.6).

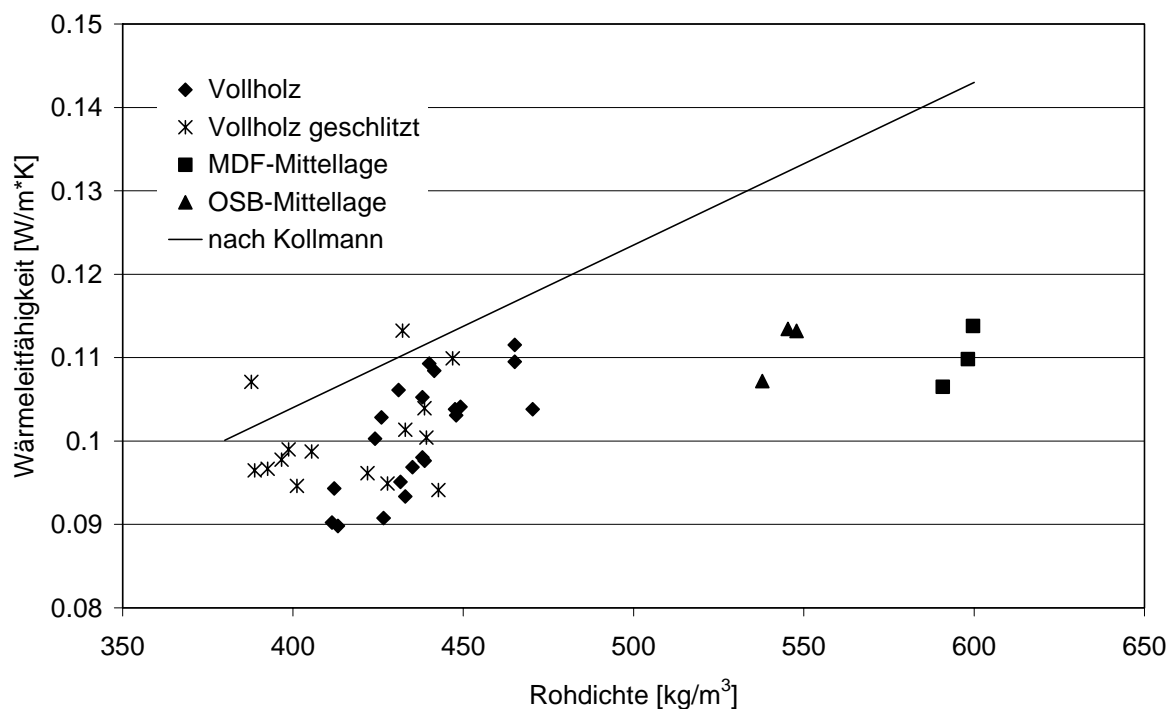


Abbildung 3.5: Einfluss der Rohdichte auf die Wärmeleitfähigkeit (Messwerte bei 25°C und 65% Luftfeuchte) und Vergleich mit den Werten von Kollmann (lineare Regression (Gl. 4) aus Messungen bei 27°C und 12% Holzfeuchte)

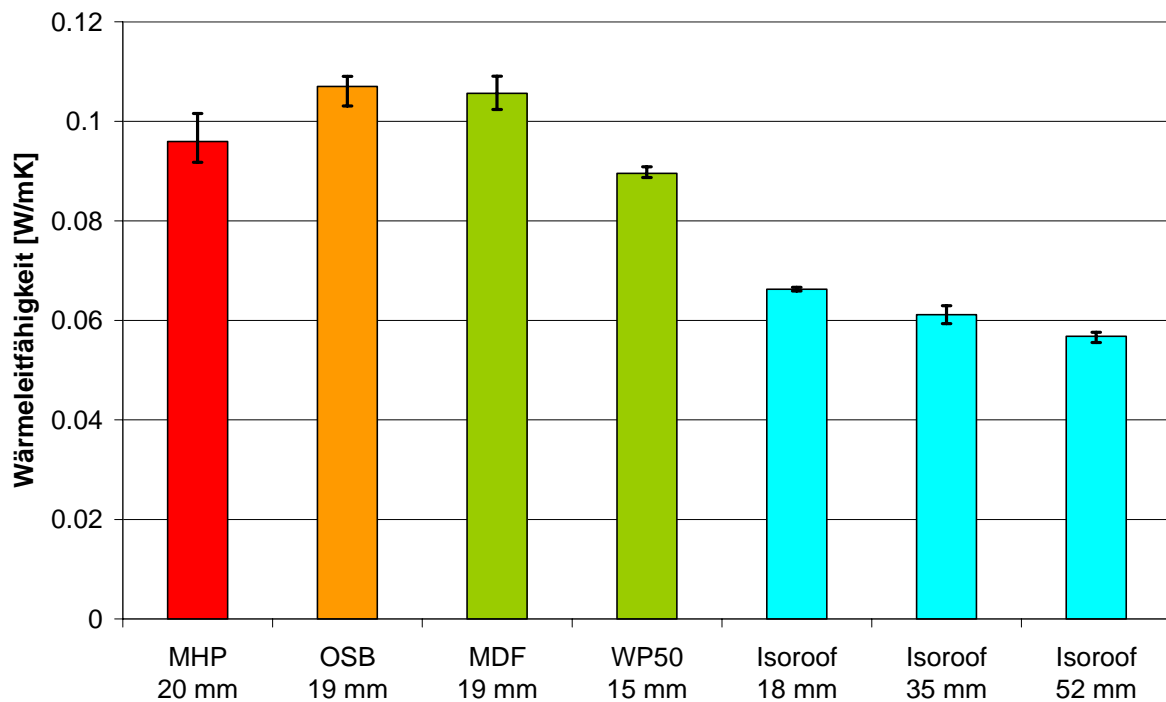


Abbildung 3.6: Einfluss der Mittellage auf die Wärmeleitfähigkeit von dreischichtigen Massivholzplatten. Angegeben ist jeweils die Mittellage; die Decklagen bestanden bei allen Platten aus Fichten-Vollholz.

3.6 Einfluss der Feuchte

An ausgewählten Holzwerkstoffen wurde die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Holzfeuchte gemessen. Dazu wurde die Wärmeleitfähigkeit bei den entsprechenden Holzfeuchten nach Klimatisierung bei 20°C und 40%, 65% und 80% relativer Luftfeuchte bestimmt. Die Abbildung 3.7 zeigt die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Feuchte für die gemessenen Holzwerkstoffe. Die ausführlichen Werte sind in Anhang 5 aufgeführt. In Tabelle 3.3 sind die anhand einer Regressionsgeraden extrapolierten Werte für λ bei 0% Holzfeuchte und die Zunahme von λ mit zunehmender Holzfeuchte in Prozent pro Prozent Holzfeuchte angegeben. Die Zunahme bei der dreischichtigen Massivholzplatte aus Fichtenholz liegt im unteren Bereich der von Cammerer und Achtziger (1984) für Fichten-Vollholz angegebenen Werte, die Zunahme bei der Sperrholzplatte aus Buchenholz etwas über dem oberen Wert der ebenda für Buchen-Vollholz angegebenen Werte.

Tabelle 3.3: Einfluss der Holzfeuchte auf die Wärmeleitfähigkeit an ausgewählten Holzwerkstoffen

Holzwerkstoff	Dicke [mm]	Dichte ¹⁾ [kg/m ³]	$\lambda_{0,reg}$ ²⁾ [W/mK]	Zunahme λ pro % Holzfeuchte [%/%]
Dreischichtige Massivholzplatte (MHP) Fichte	30	417	0.081	1.25
Sperrholzplatte: Multiplex Buche	25	747	0.138	1.38
MDF V20	16	744	0.101	0.81
MDF Fubo grün	7	877	0.110	1.81
Weichfaserplatte: Thermosafe	20	148	0.038	0.51

¹⁾ Rohdichte bei einem Klima von 20°C/65% relativer Luftfeuchte

²⁾ Wärmeleitfähigkeit bei 0% Holzfeuchte, bestimmt durch lineare Regression anhand der Werte in Anhang 5

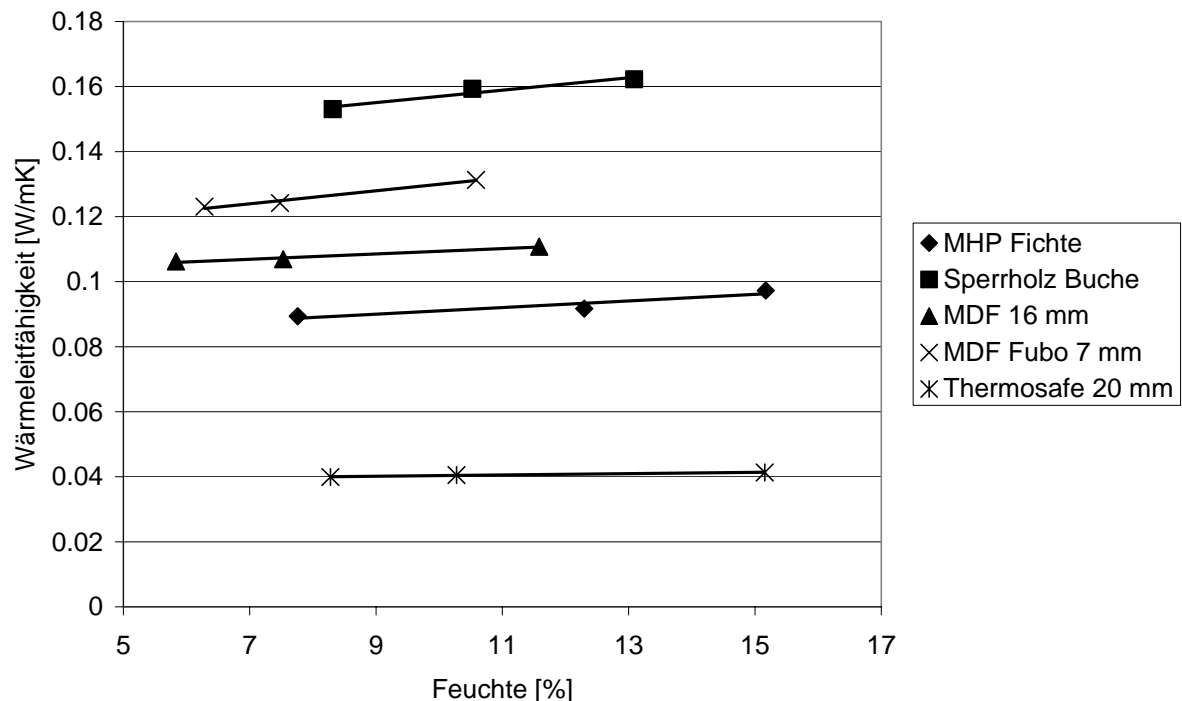


Abbildung 3.7: Einfluss der Holzfeuchte auf die Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Holzwerkstoffen.

3.7 Weitere Einflüsse

Bei den untersuchten einschichtigen, wärmebehandelten Fichtenproben der Firma Balz Holz AG ergab sich in tangentialer Richtung (Riftschnitt) eine um ca. 12% niedrigere Wärmeleitfähigkeit gegenüber der unbehandelten Probe (s. Anhang 1).

4 Schlussfolgerungen

Es war ein deutlicher Einfluss der Temperatur und der Feuchte auf die Wärmeleitfähigkeit zu beobachten. Die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit der Temperatur variierte zwischen $0.13 \cdot 10^{-3}$ und $0.79 \cdot 10^{-3} \text{ W/mK}^2$ und war sowohl von der Plattendicke als auch von der Dichte abhängig. Die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Feuchte betrug zwischen 0.51% (Faserdämmplatte) und 1.81% (MDF-Fussbodenplatte) pro Prozent Holzfeuchte und liegt damit im oder unterhalb des Bereichs, den Cammerer und Achtziger (1984) für Vollholz und Spanplatten angegeben haben.

Weiter konnte ein Einfluss der Plattendicke auf die Wärmeleitfähigkeit beobachtet werden.

Für Fichtenholz wurden vorwiegend niedrigere Wärmeleitfähigkeitswerte gemessen als auf Grund einer dichteabhängigen Mittelwertskurve von Kollmann (1951) aus Daten zu verschiedenen Holzarten zu erwarten gewesen wäre.

Entgegen anderen Werten in der Literatur (Schneider und Engelhardt 1977) wurden bei ein- und dreischichtigen Massivholzplatten aus Fichtenholz 8-10% tiefere Wärmeleitfähigkeitswerte in tangentialer gegenüber Werten in radialer Richtung gemessen, womit sich Fichtenholz ähnlich verhält wie andere Nadel- und Laubhölzer.

Der Hohlraumanteil in Mittellagen von Massivholzplatten aus Fichtenholz wirkte sich nur insofern auf die Wärmeleitfähigkeit der Platten aus, dass durch die Hohlräume eine geringere Dichte der Platten und dadurch eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit resultierte. Ein anderweitiger Einfluss der Hohlräume konnte nicht beobachtet werden.

Durch die Verwendung von Holzwerkstoffen in den Mittellagen der Massivholzplatten erfolgte bei der Verwendung von OSB und MDF trotz der wesentlich höheren Dichte nur ein geringer Anstieg der Wärmeleitfähigkeit, bei der Verwendung von Faserdämmstoffen zeigte sich dagegen eine deutliche Reduktion der Wärmeleitfähigkeit.

Durch die Verwendung von thermisch behandeltem Holz konnte die Wärmeleitfähigkeit um ca. 12% reduziert werden.

5 Literaturverzeichnis

- Anonymus 2004: Produktebeschrieb für das Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät λ -Meter EP500. Stand: Februar 2004. Lambda-Messtechnik GmbH, Dresden.
- Bader, H. 2005: Etude visant à améliorer les propriétés des panneaux en bois massif multicouches en optimisant leur constitution. Diplomarbeit am Institut für Baustoffe, Holzphysik der ETH Zürich
- Cammerer, W. F. 1970: Wärmeleitfähigkeit und Diffusionswiderstand von Holzwerkstoffen. Holz als Roh- und Werkstoff 28 (11): 420-423
- Cammerer, J., Achtziger, J. 1984: Einfluss des Feuchtegehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Dämmstoffen. Bauforschungsbericht des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn, F 1988, IRB Verlag, Stuttgart, 239 S.
- DIN 52612 Teil 1, 1979: Wärmeschutztechnische Prüfungen. Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät. Durchführung und Auswertung.
- DIN 52612 Teil 2, 1984: Wärmeschutztechnische Prüfungen. Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät. Weiterbehandlung der Messwerte für die Anwendung im Bauwesen.
- DIN 52612 Teil 3, 1979: Wärmeschutztechnische Prüfungen. Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät. Wärmedurchlasswiderstand geschichteter Materialien für die Anwendung im Bauwesen.
- DIN EN 1946 Teil 2, 1999: Wärmetechnisches Verhalten von Bauprodukten und Bauteilen – Technische Kriterien zur Begutachtung von Laboratorien bei der Durchführung der Messungen von Wärmeübertragungseigenschaften – Teil 2: Messung nach Verfahren mit dem Plattengerät.
- DIN EN 12524, 2000: Baustoffe und -produkte – Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte.
- DIN EN 12664, 2001 (SIA 180.217): Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten. Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät. Trockene und feuchte Produkte mit mittlerem und niedrigem Wärmedurchlasswiderstand.
(Teilweiser Ersatz für DIN 52612-1)
- DIN EN 12667, 2001 (SIA 180.218): Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten. Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät. Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand.
(Teilweiser Ersatz für DIN 52612-1)
- DIN EN 12939, 2001 (SIA 180.220): Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten. Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit

- dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät. Dicke Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand.
(Teilweiser Ersatz für DIN 52612-1)
- DIN EN 13171, 2001 (SIA 279.171): Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmässig hergestellte Produkte aus Holzfasern (WF) - Spezifikation
- Gieck, K., Gieck, R. 1995: Technische Formelsammlung. 30. Auflage. Gieck Verlag, Germering.
- ISO 8302, 1991: Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Guarded hot plate apparatus.
- Kanter, K. R. 1957: [The thermal properties of wood]. Drev. Prom. 6 (7): 17-18. [In Russ.]
- Kollmann, F. 1951: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Erster Band: Anatomie und Pathologie, Chemie, Physik, Elastizität und Festigkeit. 2. Auflage. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1050 S.
- Krischer, O., Kast, W. 1992: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. 3. Auflage. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 494 S.
- Künzel, H. 1986: Bestimmt der volumen- oder der massebezogene Feuchtegehalt die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen? Bauphysik 8 (2): 33-39
- Künzel, H. M. 1994: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart, 104 S. + Anhang.
- Lohmann et al. 2003: Holz-Lexikon. Band 2. 4. Auflage. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 689 S.
- Niemz, P. 1993: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 243 S.
- Schneider, A., Engelhardt F. 1977: Vergleichende Untersuchungen über die Wärmeleitfähigkeit von Holzspan- und Rindenplatten. Holz als Roh- und Werkstoff 35: 273-278
- SIA 279, 2004: Wärmedämmstoffe. Allgemeine Anforderungen. Nenn- und Bemessungswert des Wärmedurchlasswiderstandes und der Wärmeleitfähigkeit.
- Steinhagen, H. P. 1977: Thermal conductive properties of wood, green or dry, from -40° to +100° C: A literature review. Forest Products Laboratory, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, Madison Wisconsin, 10 S.
- Suleiman, B. M., Larfeldt, J., Leckner, B., Gustavsson, M. 1999: Thermal conductivity and diffusivity of wood. Wood Science and Technology 33: 465-473
- Wärmeatlas 1974: 2. Auflage. VDI-Verlag, Düsseldorf

Weber, A. 2006 : Untersuchungen zur Optimierung von Massivholz- und Verbundplatten.
Diplomarbeit am Institut für Baustoffe, Holzphysik der ETH Zürich

Zürcher, C., Frank, T. 2004: Bauphysik. Bau und Energie. Leitfaden für Planung und Praxis.
2. Auflage. Vdf Hochschulverlag, Zürich, 245 S.

Anhang 1: Wärmeleitfähigkeitswerte von Massivholz- und Sperrholzplatten bei unterschiedlichen Prüftemperaturen

Holzwerkstoff	n	Dicke [mm]	Klima	Feuchte [%]	Dichte [kg/m ³]	λ_{10} [mW/m·K]	λ_{20} [mW/m·K]	λ_{25} [mW/m·K]	λ_{30} [mW/m·K]	λ_{40} [mW/m·K]	$\lambda_{10,reg}$ [mW/m·K]	$\Delta\lambda/\Delta T$ [mW/m·K ²]
Schilliger Holz AG:												
MHP einseitig geschlitzt	6	70.8	20/65	11.6	415	94.5 ± 3.3	101.4 ± 3.3		106.4 ± 3.4		94.8 ± 3.3	0.60
MHP zweiseitig geschlitzt	6	70.5	20/65	11.7	406	98.1 ± 9.4	104.6 ± 9.7		109.5 ± 9.9		98.3 ± 9.4	0.57
Hess Holz AG:												
Multiplex Buche, 25 mm	5	26.4	20/65	10.5	741	158.9 ± 3.2	166.3 ± 3.1		171.1 ± 3.4		159.3 ± 3.2	0.61
Multiplex Buche, 30 mm	1	30.7	20/65	10.5	777	163.6	169.3		176.1		163.4	0.62
Multiplex Buche, 35 mm	5	35.7	20/65	10.3	777	172.7 ± 4.4	178.9 ± 4.8		184.4 ± 4.6		172.8 ± 4.5	0.59
Multiplex Buche, 50 mm	5	50.4	20/65	10.7	748	167.7 ± 1.3	173.4 ± 1.3		178.3 ± 1.4		167.8 ± 1.3	0.53
Balz Holz AG:												
Fichte wärmebehandelt, Riftschnitt	1	26.4	20/65	8.1	378	79.3	81.1		82.2		79.5	0.14
Fichte wärmebehandelt, variable Jahrringlagen	1	26.3	20/65	7.9	372	85.8	88.1		89.7		85.9	0.19
Fichte, Riftschnitt	1	26.7	20/65	11.7	390	90.5	92.6		94.1		90.6	0.18

MHP = Massivholzplatten; n = Anzahl; λ_x = Wärmeleitfähigkeit bei Temperatur x mit Standardabweichung; $\lambda_{10,reg}$ = durch Regression ermitteltes λ bei 10°C; $\Delta\lambda/\Delta T$ = Temperaturkoeffizient von λ

Anhang 2: Wärmeleitfähigkeitswerte von MDF- und Spanwerkstoffplatten bei unterschiedlichen Prüftemperaturen

Holzwerkstoff	n	Dicke [mm]	Klima	Feuchte [%]	Dichte [kg/m ³]	λ_{10} [mW/m·K]	λ_{20} [mW/m·K]	λ_{25} [mW/m·K]	λ_{30} [mW/m·K]	λ_{40} [mW/m·K]	$\lambda_{10,reg}$ [mW/m·K]	$\Delta\lambda/\Delta T$ [mW/m·K ²]
Kronospan AG:												
Spanplatte V20, 10 mm	5	10.4	20/65	9.0	710	111.0 ± 2.7		118.3 ± 2.9		121.5 ± 3.2	111.7 ± 2.7	0.35
Spanplatte V20, 16 mm	5	16.2	20/65	9.1	657	101.8 ± 1.6		109.8 ± 1.6		117.3 ± 2.0	101.9 ± 1.6	0.52
Spanplatte V20, 19 mm	5	18.9	20/65	8.8	637	99.0 ± 1.1		106.1 ± 0.8		112.3 ± 0.5	99.1 ± 1.1	0.45
Spanplatte V20, 40 mm	5	38.5	20/65	8.3	624	108.8 ± 1.5	112.6 ± 1.7		116.1 ± 1.8		108.8 ± 1.5	0.36
OSB 3, 18 mm	5	18.2	20/65	-	617	102.7 ± 2.3	106.9 ± 2.7		111.0 ± 2.0		102.8 ± 2.3	0.41
MDF V20, 3 mm ¹⁾	5	3	20/65	6.2	839	115.0	122.3		126.5		115.5	0.58
MDF V20, 6 mm ²⁾	5	6.1	20/65	7.6	840	120.6 ± 1.1	124.9 ± 0.7		127.0 ± 0.5		121.0 ± 1.0	0.32
MDF V20, 16 mm	5	16.4	20/65	7.5	744	106.5 ± 0.4		112.3 ± 0.5		115.8 ± 0.7	106.9 ± 0.4	0.31
MDF V20, 19 mm	5	18.9	20/65	7.7	808	117.7 ± 1.2	123.8 ± 0.8		126.1 ± 0.7		118.3 ± 1.1	0.42
MDF V20, 40 mm	5	40.3	20/65	6.9	763	122.6 ± 1.0	126.8 ± 1.0		129.4 ± 1.4		122.8 ± 1.0	0.34
MDF Fubo grün, 7 mm ²⁾	5	6.4	20/65	7.5	877	123.7 ± 2.4	129.4 ± 1.8		132.3 ± 2.0		124.1 ± 2.3	0.43
WP50 / DP50	5	15.1	20/65	8.8	529	76.2 ± 0.8		81.5 ± 0.9		87.3 ± 0.9	76.1 ± 0.8	0.37

n = Anzahl; λ_x = Wärmeleitfähigkeit bei Temperatur x mit Standardabweichung; $\lambda_{10,reg}$ = durch Regression ermitteltes λ bei 10°C; $\Delta\lambda/\Delta T$ = Temperaturkoeffizient von λ

¹⁾ Alle 5 Proben miteinander geprüft

²⁾ Zwei Prüfungen mit 2 bzw. 3 Proben

Anhang 3: Wärmeleitfähigkeitswerte von Weichfaserplatten bei unterschiedlichen Prüftemperaturen

Holzwerkstoff	n	Dicke [mm]	Klima	Feuchte [%]	Dichte [kg/m ³]	λ_{10} [mW/m·K]	λ_{20} [mW/m·K]	λ_{25} [mW/m·K]	λ_{30} [mW/m·K]	λ_{40} [mW/m·K]	$\lambda_{10,reg}$ [mW/m·K]	$\Delta\lambda/\Delta T$ [mW/m·K ²]
Pavatex AG:												
Isolant 19 mm	5	20.5	20/65	10.3	228	44.6 ± 0.2		47.2 ± 0.2		50.2 ± 0.2	44.6 ± 0.2	0.19
	5	19.3	darrtrocken	0.3	221	41.9 ± 0.4		44.0 ± 0.4		46.1 ± 0.4	41.9 ± 0.4	0.14
Pavatherm 60 mm	5	60.6	20/65	10.1	174	39.4 ± 0.2	42.6 ± 0.3		45.7 ± 0.3		39.4 ± 0.2	0.32
	5	58.6	darrtrocken	0.1	163	38.4 ± 0.2		40.5 ± 0.3		42.4 ± 0.3	38.4 ± 0.2	0.13
GUTEX Holzfaserplattenwerk:												
Thermowall 20 mm	5	20.9	20/65	10.3	193	41.6 ± 1.1		43.6 ± 1.0		46.3 ± 1.0	41.5 ± 1.1	0.16
Thermowall 60 mm	5	61.3	20/65	10.0	173	41.5 ± 0.3	44.7 ± 0.4		47.0 ± 0.3		41.7 ± 0.3	0.27
Thermowall 100 mm	2	99.2	20/65	10.5	168		46.5					
Thermosafe 20 mm	5	21.7	20/65	10.3	148	40.7 ± 0.8		42.7 ± 0.8		45.5 ± 0.9	40.5 ± 0.8	0.16
Thermosafe 60 mm	5	60.9	20/65	10.3	156	41.5 ± 0.4	44.2 ± 0.7		46.8 ± 0.2		41.5 ± 0.5	0.26
Thermosafe 100 mm	2	101.5	20/65	10.3	155		40.7					
Thermosafe-wd 20 mm	5	21.4	20/65	10.1	170	41.3 ± 0.5		43.3 ± 0.5		46.1 ± 0.4	41.2 ± 0.5	0.16
Thermosafe-wd 60 mm	5	60.9	20/65	9.9	204	43.8 ± 0.5	46.7 ± 0.7		48.9 ± 0.6		43.9 ± 0.6	0.26
Thermosafe-wd 100 mm	2	101.3	20/65	10.0	174		42.7					
Ultratherm 50 mm	5	52.0	20/65	10.0	217	45.5 ± 0.3	47.8 ± 0.4		49.5 ± 0.3		45.6 ± 0.4	0.20
Ultratherm 80 mm	5	82.1	20/65	9.6	218	41.9 ± 0.3	50.7 ± 0.2		57.8 ± 0.6		42.2 ± 0.3	0.79
Multiplex-top 18 mm	5	19.5	20/65	9.8	258	47.4 ± 0.5		49.8 ± 0.5		52.4 ± 0.6	47.4 ± 0.5	0.16
Multiplex-top 36 mm	5	37.7	20/65	9.4	262	48.7 ± 0.3		50.6 ± 0.2		53.7 ± 0.3	48.5 ± 0.3	0.17

n = Anzahl; λ_x = Wärmeleitfähigkeit bei Temperatur x mit Standardabweichung; $\lambda_{10,reg}$ = durch Regression ermitteltes λ bei 10°C; $\Delta\lambda/\Delta T$ = Temperaturkoeffizient von λ

Anhang 4: Wärmeleitfähigkeitswerte von Wand- und Fensterrahmenelementen bei unterschiedlichen Prüftemperaturen

Holzwerkstoff	n	Dicke [mm]	Klima	Feuchte [%]	Dichte [kg/m ³]	λ_{10} [mW/m·K]	λ_{20} [mW/m·K]	λ_{25} [mW/m·K]	λ_{30} [mW/m·K]	λ_{40} [mW/m·K]	$\lambda_{10,reg}$ [mW/m·K]	$\Delta\lambda/\Delta T$ [mW/m·K ²]
Fensterfabrik Albisrieden AG:												
Stropoly	3	56.0	20/65	7.7	467	81.7 ± 1.6		85.4 ± 1.6		89.7 ± 1.5	81.6 ± 1.6	0.26
Frinorm	3	54.3	20/65	7.3	432	51.8 ± 0.2		52.1 ± 0.4		56.4 ± 0.4	51.1 ± 0.2	0.15
Nägeli AG:												
Wandelemente, 18 cm	4			15.2	416			98.2 ± 3.4 ¹⁾				
Wandelemente, 15 cm	2			14.0	410			95.0 ± 1.7 ¹⁾				

n = Anzahl; λ_x = Wärmeleitfähigkeit bei Temperatur x mit Standardabweichung; $\lambda_{10,reg}$ = durch Regression ermitteltes λ bei 10°C; $\Delta\lambda/\Delta T$ = Temperaturkoeffizient von λ

¹⁾ Messungen bei 23°C

Anhang 5: Wärmeleitfähigkeitswerte ausgewählter Holzwerkstoffe bei unterschiedlichen Feuchten und Prüftemperaturen

Holzwerkstoff	n	Dicke [mm]	Klima	Feuchte [%]	Dichte [kg/m ³]	λ_{10} [mW/m·K]	λ_{20} [mW/m·K]	λ_{25} [mW/m·K]	λ_{30} [mW/m·K]	λ_{40} [mW/m·K]	$\lambda_{10,reg}$ [mW/m·K]	$\Delta\lambda/\Delta T$ [mW/m·K ²]
MHP Fichte, 27 mm	3	26	20/30	7.8	399	89.3 ± 6.4	91.6 ± 6.6		93.4 ± 6.4		89.4 ± 6.5	0.21
	3	26	20/65	12.3	417	91.0 ± 6.0		95.8 ± 6.4		100.2 ± 6.3	91.7 ± 6.1	0.28
	3	26.7	20/80	15.2	416	97.3 ± 6.5	99.6 ± 6.5		102.1 ± 6.3		97.3 ± 6.6	0.24
Multiplex Buche, 25 mm	5	25.9	20/40	8.3	740	152.7 ± 3.3	159.0 ± 3.4		163.2 ± 3.1		153.0 ± 3.3	0.53
	5	26.2	20/65	10.5	747	158.9 ± 3.2	166.3 ± 3.1		171.1 ± 3.4		159.3 ± 3.2	0.61
	5	26.6	20/80	13.1	754	161.8 ± 4.5	169.2 ± 4.1		174.1 ± 3.7		162.2 ± 4.6	0.62
MDF V20, 16 mm		16.4	20/40	5.8	733	105.7 ± 0.9	110.6 ± 1.2		112.4 ± 1.4		106.2 ± 0.9	0.33
	5	16.4	20/65	7.5	744	106.5 ± 0.4		112.3 ± 0.5		115.8 ± 0.7	106.9 ± 0.4	0.31
		17.2	20/80	11.6	734	110.5 ± 1.1	114.9 ± 1.2		118.1 ± 1.3		110.7 ± 1.1	0.38
MDF Fubo grün, 7 mm ¹⁾	5	6.3	20/40	6.3	884	122.8 ± 2.5	126.6 ± 2.4		128.6 ± 2.6		123.0 ± 2.4	0.29
	5	6.4	20/65	7.5	877	123.7 ± 2.4	129.4 ± 1.8		132.3 ± 2.0		124.1 ± 2.3	0.43
	5	6.6	20/80	10.6	869	131.1 ± 2.3	135.2 ± 2.9		138.1 ± 3.1		131.3 ± 2.3	0.35
Thermosafe 20 mm	5	21.3	20/40	8.3	149	39.9 ± 0.4	41.2 ± 0.4		42.6 ± 0.4		39.9 ± 0.4	0.13
	5	21.7	20/65	10.3	148	40.7 ± 0.8		42.7 ± 0.8		45.5 ± 0.9	40.5 ± 0.8	0.16
	5	22.0	20/80	15.2	153	41.3 ± 0.3	42.6 ± 0.3		44.1 ± 0.3		41.3 ± 0.3	0.14

MHP = Massivholzplatten; n = Anzahl; λ_x = Wärmeleitfähigkeit bei Temperatur x mit Standardabweichung; $\lambda_{10,reg}$ = durch Regression ermitteltes λ bei 10°C; $\Delta\lambda/\Delta T$ = Temperaturkoeffizient von λ

¹⁾ Zwei Prüfungen mit 2 bzw. 3 Proben

Teil 2

Untersuchungen zu ausgewählten Einflussfaktoren auf den Diffusionswiderstand von Holz- und Verbundwerkstoffen

Zusammenfassung

Zur Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ wurde das in der Norm (DIN EN ISO 12572 2001) beschriebene Messprinzip, das als Schalenmethode bekannt ist, angewendet. Mit dieser Methode wurden die Wasserdampfdiffusionsmessungen an un- und beschichteten Vollholzproben aus Fichten- und Buchenholz, an mehrschichtigen Massiv- und Brettschichtholzplatten aus Fichtenholz, sowie an Verbundplatten (Decklage: Fichte; Mittellage: MDF oder OSB) durchgeführt. Einflussfaktoren sind der Feuchtebereich, die Temperatur und der Standort.

Bei den Varianten 1 bis 6 wurde die Diffusion an Vollholzprobekörpern aus Buchen- und Fichtenholz in tangentialer, radialer und axialer Richtung und in unterschiedlichen Feuchtebereichen (100-65), (0-65) und (0-35) geprüft. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen μ erwiesen sich als eine Funktion der Holzfeuchte. Es liegt eindeutig ein exponentieller Abfall der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ mit steigendem Wassergehalt vor. Nach VANEK und TEISCHINGER liegt der Grund dafür in der durch den steigenden Holzfeuchtegehalt deutlich verbesserten Diffusionsfähigkeit der Zellwände (Vanek and Teischinger 1989).

Holz-Klebstoff-Kombinationen (Varianten 7 bis 11) können zur Klärung des Diffusionsverhaltens in schichtweise aufgebauten Proben beitragen. Dazu wurde die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ von ein-, zwei-, drei- und fünfschichtigen Fichtenbrettschichtholzproben bestimmt. Die gefundenen Mittelwerte zeigen, dass die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ mit zunehmender Anzahl der Klebfugen steigt. Weiter besteht, wie dies schon bei den Varianten 1 bis 6 festgestellt wurde, eine starke Abhängigkeit zwischen der Holzfeuchte und dem μ – Wert. Mit steigender Holzfeuchte sinkt die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ .

Bei den untersuchten Massivholz- und Verbundplatten streuen die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen μ im Nass- und Trockenbereich zwischen 1 und 820. Wie schon bei Brettschichtholz festgestellt wurde, hat auch bei den Massivholzplatten die Jahrringlage in den einzelnen Schichten einen grossen Einfluss auf den Diffusionswiderstand.

Weiter wurde festgestellt, dass bei einer Zunahme der Hohlräume in der Mittelschicht die μ – Werte kleiner werden.

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ der Probekörper (Dichte: 581 kg/m³) mit einer MDF Mittellage (Decklagen aus Vollholz) war kleiner als eine Reverenzprobe (alle drei Schichten aus Vollholz; Dichte: 447 kg/m³). Dies wird durch den hohen Aufschlussgrad des Holzes bei den Faserplatten erklärt. Die hohe Zahl von Faserteilchen führt zu einem verzweigten System von Diffusionskanälen.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	Ziel der Untersuchungen.....	1
1.2	Erkenntnisstand	2
2	GRUNDLAGEN UND BEGRIFFE	7
2.1	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	7
2.2	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Luft.....	8
2.3	Effektiver Luftdruck	8
2.4	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient	8
2.5	Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient	9
2.6	Wasserdampf-Diffusionsstromdichte.....	9
2.7	Dampfdruckdifferenz über den Prüfkörper.....	10
2.8	Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke	10
2.9	Rohdichte.....	10
2.10	Feuchtigkeitsgehalt	11
2.11	Zeichen und Einheiten.....	12
3	VERSUCHSMATERIAL UND –DURCHFÜHRUNG.....	13
3.1	Versuchsmaterial	13
3.2	Versuchsmethodik	15
3.2.1	Messprinzip.....	15
3.2.2	Prüfgeräte	15
3.2.3	Konditionierung	16
3.2.4	Vorbereitung der Probekörper und der Prüfordnung	16
3.2.5	Durchführung der Prüfung	16

4	RESULTATE UND DISKUSSIONEN	18
4.1	Diffusion in axialer, radialer und tangentialer Richtung bei den Probekörpern der Dicke 20 mm (Varianten 1 bis 6).....	18
4.2	Diffusionstechnisches Verhalten von verlebten Brettschichtholzprobekörpern mit stehenden Jahrringen (Varianten 7 bis 11).....	23
4.3	Diffusionsverhalten von verschiedenen Massivholz- und Verbundwerkstoffplatten (Variante 12 bis 25)	24
4.4	Wasserdampf-Diffusionswiderstand beschichteter Fichtenholzplatten (Varianten 26 bis 31)	27
5	SCHLUSSFOLGERUNGEN	29
6	LITERATURVERZEICHNIS	31

1 Einleitung

1.1 Ziel der Untersuchungen

In den letzten Jahren konnte die Kenntnis des bauphysikalischen Verhaltens von Holzwerkstoffen und damit ihre Eignung zu Bauzwecken immer weiter verbessert und vervollkommen werden. Diese Tatsache ermöglichte eine umfassende Verwendung von Holzelementen, wie Massivholz- und Verbundkonstruktionen. Bei deren Herstellung werden verschiedene Bau- und Werkstoffe, jeder mit unterschiedlichen bauphysikalischen Eigenschaften ausgestattet, derartig hintereinander angeordnet, dass die resultierenden Eigenschaften des gesamten Verbundsystems den baulich erwünschten oder durch Normen vorgeschriebenen Erfordernissen entsprechen.

Dabei ist zu bedenken, dass sich bereits die verschiedenen bauphysikalischen Eigenschaften eines einzelnen Werkstoffes, wie sein wärme-, diffusions- und schalltechnisches Verhalten, seine Festigkeit, Elastizität und Steifigkeit hinsichtlich ihrer absoluten Beträge gegenseitig mehr oder weniger beeinflussen. Die Verhältnisse werden noch komplexer, wenn verschiedene Werkstoffe miteinander kombiniert werden.

Man wird beim Aufbau von mehrschichtigen Konstruktionen darauf angewiesen sein, die Anforderungen an den Verbundkörper vorher genau zu kennen, um einen günstigen Kompromiss zu finden, da mit einem erträglichen Aufwand in der Regel nicht sämtliche erforderlichen Eigenschaften optimal eingestellt werden können.

Hinsichtlich des wärme- und feuchtigkeitstechnischen Verhaltens von Holzwerkstoffen, soll in diesem Teil der Arbeit vorwiegend das Letztere betrachtet werden. Die Möglichkeit, das diffusionstechnische Verhalten in geschichteten Konstruktionen auf theoretischem Wege aus den Materialkonstanten der Einzelstoffe zu bestimmen (z.B. Material, Klebstoff), setzt die Kenntnis dieser Materialkonstanten voraus, die nur experimentell ermittelt werden können.

In den kommenden Jahren wird die Bauindustrie in zunehmendem Masse durch moderne Holzwerkstoffe erschlossen (Abbildung 1) (Deppe and Ernst 2000), die sich in erster Linie durch noch günstigere akustische und wärmetechnische Eigenschaften, noch besseres elastisches Verhalten und ihre im Vergleich zu ihrem Gewicht noch höhere Festigkeit auszeichnen werden. Ein kritischer Punkt wird jedoch nach wie vor ihr Verhalten gegenüber Luftfeuchtigkeitseinwirkungen sein.

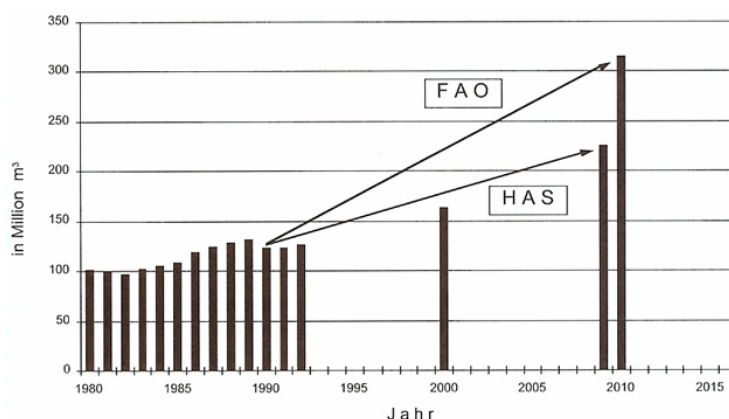


Abbildung 1 Prognosen für die Entwicklung des weltweiten Holzwerkstoffverbrauchs nach FAO und H. A. Simons Ltd., aus DEPPE and ERNST (2000)

Die Vielfalt dieser Einwirkungsmöglichkeiten von flüssigem und dampfförmigem Wasser und die Reaktionsmöglichkeiten der Werkstoffe auf diese Einwirkungen wird in der vorliegenden Arbeit nur am Rande erörtert (Kapitel 2.3: Vom Fick'schen Gesetz zur Norm DIN EN ISO 12572 (2001)).

Es wird angestrebt, aus den Ergebnissen (Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ und wasserdampffäquivalente Luftschichtdicke s_d), die aus stationären Messungen (beidseits des Bauteils herrscht die gleiche Temperatur) an un- und beschichteten Vollholzproben aus Fichten- und Buchenholz, an mehrschichtigen Massiv- und Brettschichtholzplatten aus Fichtenholz und an Verbundplatten (Decklage: Fichte; Mittellage: MDF oder OSB) ermittelt wurden, weitere Einblicke in die Gesetzmässigkeiten der Feuchtigkeitsbewegung in Holzwerkstoffen zu gewinnen. Darüber hinaus wird Aufschluss über Natur und Intensität der verschiedenen Parameter in ihrer direkten Wirkung sowie in ihrer gegenseitigen Beeinflussung hinsichtlich der Zielgrössen erwartet.

1.2 Erkenntnisstand

KRISCHER begann als erster, die bis dahin nur qualitativ bestimmten unterschiedlichen Bewegungsarten der Feuchtigkeit im Holz auch quantitativ zu erfassen (Krischer 1963). Er ermittelte die Bewegungsbeiwerte für die dampfförmige Bewegung, die durch die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ , und für die Kapillarwasserbewegung, die durch die kapillare Leitzahl κ_c gekennzeichnet wird (Abbildung 2). Darüber hinaus bestimmte er den Anteil der einzelnen Bewegungsarten in Abhängigkeit der Temperatur und der Materialfeuchte (Abbildung 3).

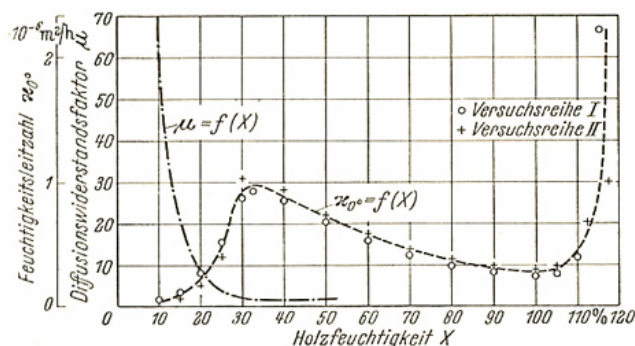


Abbildung 2 Abhängigkeit der Feuchteleitzahl κ_c und der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ von der Feuchtigkeit X, aus VOIGT (1940)

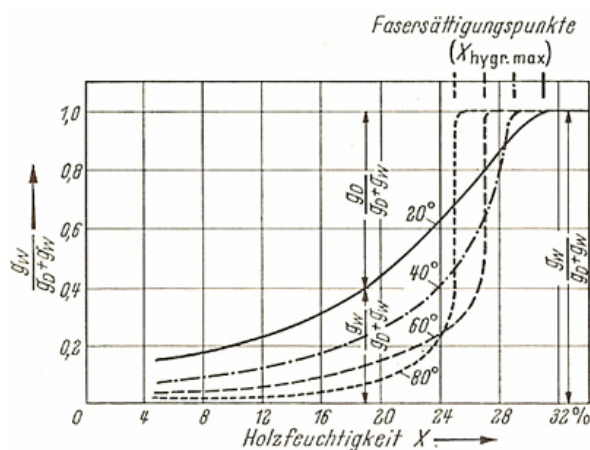


Abbildung 3 Anteil der durch Diffusion und Kappilarkräfte bewegten Feuchtigkeitsmenge bei konstanter Temperatur; aus KRISCHER (1963)

Methodisch etwas anders als KRISCHER gingen die meisten amerikanischen Forscher vor, die sich mit dem Wassertransport durch Holz beschäftigten (Krischer 1963). Zwar unterschieden auch sie die verschiedenen Stoffbewegungsarten, versuchen jedoch, den gesamten Transport mit einem einzigen, wenn auch veränderlichen Beiwert zu erfassen.

STAMM und RALEIGH versuchten, diesen Gesamtbeiwert in gesetzmässige Beziehung zu den von ihnen ermittelten Einzelbewegungsbeiwerten zu bringen (Stamm and Raleigh 1967). COMSTOCK geht vom zweiten Fick'schen Gesetz aus, das an sich bei instationären Vorgängen angewandt wird, und wendet es auch auf einen quasi-stationären Vorgang an, mit der Begründung, auch dabei gäbe es keinen konstanten Diffusionskoeffizienten D , selbst wenn man ihn messen würde. Der gemessene Diffusionskoeffizient D sei immer nur ein integraler. Integral deshalb, weil der Diffusionskoeffizient aus der Integration des Feuchtigkeitsgradienten, mit dessen Verlauf D verknüpft ist (Comstock 1963) (Abbildung 4).

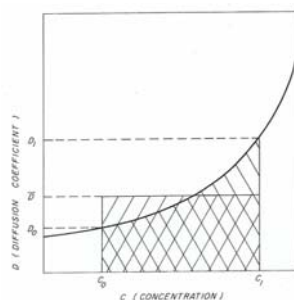


Abbildung 4 Graphische Darstellung eines integralen Diffusionskoeffizienten D ; aus COMSTOCK (1963)

Auf die verschiedenen Wegmöglichkeiten im Holz ging CHOONG ein (Choong 1965). Er stellte die Theorie auf, dass die Wegmöglichkeiten der Dampfdiffusion durch die Zelllumina in Serie mit der Bewegung gebundenen Wassers durch die Zellwände, der wichtigste Transportweg, sowohl quer zur Faser, wie auch in Faserrichtung darstellt. Sein relativer Anteil an allen Transportwegen wächst mit steigender Feuchtigkeit, aber fällt ab mit ansteigender Rohdichte. Andererseits ist der Weg durch die Zelllumina in Serie mit den Tüpfelporen wichtig bei niedrigen Feuchtigkeiten und hoher Temperatur, wird aber fast vernachlässigbar, zumindest quer zur Faser, bei höherer Feuchtigkeit und Temperatur.

Über die Diffusionsvorgänge in Holz und Holzwerkstoffen sind, wie oben angedeutet, zahlreiche Arbeiten aus den 60er und 70er Jahren vorhanden (Horn 1969; Kisseloff 1969; Cammerer 1970; Frühwald 1973).

VANEK und TEISCHINGER führten diese Untersuchungen weiter (Vanek and Teischinger 1989). Unter stationären Bedingungen wurden für verschiedene Holzarten über die Auswertung der Diffusionsströme und der Holzfeuchteverteilungen die Abhängigkeit der Diffusionskoeffizienten D und der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ von der Holzfeuchtigkeit in radialer und tangentialer Diffusionsrichtung bestimmt.

Die Auswertungen wurden in Anlehnung an die Norm DIN 52615 (1987) und auf der Basis des ersten Fick'schen Gesetzes durchgeführt und die Ergebnisse graphisch dargestellt.

Das Ziel von JENSEN und EMMER war die Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes μ von MDF und Holzspanplatten (Jensen and Emmeler 1996). Weiter wurde der Einfluss der Dichte auf den Wasserdampfdiffusionswiderstand μ untersucht und mit den Ergebnissen von CAMMERER und HORN verglichen (Horn 1969; Cammerer 1970).

Die neuesten Untersuchungen von POPPER et al. liefern Resultate über die Wasserdampfdiffusionsstromdichte g und die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ von drei- bis fünfschichtigen Massivholzplatten unterschiedlicher Dicken sowie unterschiedlicher verwendeter Klebstoffe (Popper et al. 2002; Popper et al. 2004).

Zu den in den letzten Jahren neu entwickelten Massivholzplatten und Verbundkonstruktionen liegen aber meist nur Angaben aus Prospekten der Plattenhersteller vor. Diese sind vielfach nur abgeschätzt und variieren stark.

Die folgende Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen μ für verschiedene Holzarten, Holzfeuchten und Temperaturen, nach verschiedenen Autoren und Herstellern:

Tabelle 1 Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen μ für verschiedene Holzarten und Holzfeuchten nach verschiedenen Autoren

Holzart	Dichte ρ [kg/m ³]	Feuchtigkeit u [%]	μ [-]	Autor
Fichte radial	400	4	230	(Cammerer 1956)
Buche radial	600	6	160	
		8	110	
		10	70	
		15	11	
		20	8.5	
		30	2	
		40	1.5	
		50	1.9	
Mittelwert (Eiche, Buche, Fichte, Kiefer, Tanne)	-	-	50	(Seiffert 1974)
Fichte (μ abnehmend mit zunehmender Feuchtigkeit)	-	8-4	110-230	
Buche (μ abnehmend mit zunehmender Feuchtigkeit)	-	50-10	2-36	
Fichte quer zur Faser	400	4	230	(Bobran 1982)
Buche quer zur Faser	600	6	160	
		8	110	
		10	70	
		15	11	
		20	8.5	
		30	2	
		40	1.5	
		50	1.9	
Fichte radial	-	4	∞	(Vanek and Teischinger 1989)
Fichte tangential	-	6	210	
		8	130	
		4	∞	
Buche radial	-	6	300	
		8	150	
		10	50	
Buche tangential	-	15	20	
		20	10	
		10	80	
		15	25	
Fichte radial	-	20	10	
		6.7	180	
Fichte tangential	-	19.8	21	(Kiessel and Möller 1989)
		6.3	180	
Fichte axial	-	19.0	18	
Buche radial	-	Trockenbereich	164	
		Nassbereich	3	
Buche tangential	-	7.2	120	
		18.9	21	
Buche axial	-	5.8	100	
		18.3	20	
		Trockenbereich	-	
		Nassbereich	-	

Tabelle 1 Fortsetzung

Holzart	Dichte ρ [kg/m ³]	Feuchtigkeit u [%]	μ [-]	Autor
MDF	785	Trockenbereich	31	(Cammerer 1956)
Fichte quer zur Faser- richtung	450	Trockenbereich Nassbereich	180 20	(Gösele et al. 1997)
Massivholzplatten	400-490	-	20-250	(Merz et al. 1997)
MDF	600-900	-	40-60	
OSB	670-730	-	110-180	
Massivholzplatten (drei- / fünfflagig)	400-500	-	50 / 400	(Radovic et al. 1997)
MDF	600-900	-	70	
OSB	600-700	-	50-320	
Fichte radial	-	4 6 8 10 12 16 20	230 160 110 70 40 20 10	(Bösch 1999)
Dreischichtige 10-10- 10 mm Massivholzplatte, Fichte, PUR verklebt	520 450	20.2 10.2	17 41	
Dreischichtige 20-20-20 mm Massivholzplatte, Fichte, Mirapur (9520) verklebt	440 380	19.8 11.3	11 18	
Dreischichtige 10-10-10 mm Massivholzplatte Fichte	470 420 450	20.2 7.4 11.1	20 39 43	
Dreischichtige 20-20-20 mm Massivholzplatte Fichte	450 440 440	20.1 8.5 11.2	11 18 24	
Fichte quer zu Faserrich- tung	450 450 430	19.6 7.4 10	17 30 43	
Massivholzplatten	-	Trockenbereich	100-300	(Devanthier 2005)
OSB	-	Nassbereich	50-120	
		Trockenbereich Nassbereich	300-1400 90-500	
Kronotex MDF: Dicke 12 bis 18 mm Dicke 30 bis 40 mm	510-550 330-400	- -	11 5	(Kronoply 2006)
Kronoply OSB 3: Dicke 8 bis < 18 Dicke 18 bis 25	640 640	- -	350-450 300-400	
Kronoply OSB 4: Dicke 8 bis < 18 Dicke 18 bis ≤ 30 Dicke >30 bis 40	620 600 580	- - -	200 400 600	

2 Grundlagen und Begriffe

Nachfolgend werden die Grundlagen zur Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ in kurzer Form zusammengefasst (DIN EN ISO 12572 2001).

2.1 Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

Als Mass für die Dichtigkeit eines Werkstoffgefüges gegen diffundierende Wassermoleküle wird die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ , die auch als Diffusionswiderstandsfaktor benannt wird (Popper et al. 2002), benützt (Lutz et al. 1994) und ist der Quotient aus dem Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Luft δ_a und dem Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient δ (DIN EN ISO 12572 2001). Sie ist eine dimensionslose Grösse, deren Zahlenwert angibt, wie viel Mal dichter das betreffende Stoffgefüge gegen diffundierende Wassermoleküle ist, als eine ruhende, gleich dicke Luftschicht (Lutz et al. 1994), d.h. wie viel Mal grösser der Diffusionsdurchlasswiderstand des Stoffes ist, als der einer gleich dicken ruhenden Luftschicht gleicher Temperatur (Niemz 1993; Gösele et al. 1997; Popper et al. 2002). Die μ -Werte sind Vergleichszahlen zwischen der Diffusionsfähigkeit des Materials (z.B. Holz) und jener der Luft (Lutz et al. 1994) und liegen für die wichtigsten Baustoffe in tabellierter Form auf (DIN 4108 Teil 4 1985). Zwei Gründe kann man angeben, weshalb es sinnvoll ist, bei der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ das bei einem beliebigen Stoff gegebene Ausmass der Durchlässigkeit auf die Durchlässigkeit ruhender Luft zu beziehen:

Würde man einen zunächst sehr dichten Stoff durch immer weitere Vergrösserung des Porenraumes entmaterialisieren, so würde die Wasserdiffusionswiderstandszahl μ von anfänglich grossen Zahlenwerten ausgehend immer kleiner werden. Wenn das die Poren bildende Festkörpergerüst schliesslich fast verschwunden ist, wie z.B. bei Mineralwolle, so steht den Wassermolekülen praktisch nur noch die ruhende Luft als Hindernis entgegen. Das ist die kleinste mögliche Behinderung für die diffundierenden Wassermoleküle in der Erdatmosphäre. Da der Widerstand in ruhender Luft als Bezugspunkt dient, hat diese die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl $\mu = 1$ (Allenspach 2004). Das heisst aber, der mögliche Wertebereich von Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen liegt zwischen Unendlich und Eins.

$$1 \leq \mu \leq \infty$$

Gegen diffundierende Wassermoleküle absolut dichte Werkstoffgefüge, entsprechend einer unendlich grossen Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ , haben nur Metalle und Glas, alle anderen Stoffe sind mehr oder weniger wasserdampfdurchlässig.

Zweitens ist die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl wegen ihres Bezuges auf die Dichtigkeit ruhender Luft eine Strukturgrösse, die sich in theoretische Betrachtungen in hervorragender Weise einfügt (Lutz, Jenisch et al. 1994).

Für die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ gilt nach der Norm (DIN EN ISO 12572 2001):

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (1)$$

wobei: δ_a	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Luft, bezogen auf den Dampfteildruck [kg/(m·s·Pa)]
δ	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient, bezogen auf den Dampfteildruck [kg/(m·s·Pa)]
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]

2.2 Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Luft

Die Schirmersche Formel (Schirmer 1938) bildet die Grundlage zur Berechnung des Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten (DIN EN ISO 12572 2001). Er ist gleich der Wassermenge [kg], die in einer Stunde [h] durch einen Quadratmeter [m²] eines Stoffes in Richtung des Dampfdruckgefälles hindurchfließt (Popper et al. 2002). Die nachfolgende Gleichung (2) wurde mit dem Faktor $1/3600$ korrigiert, um die in der Norm vorgeschriebene Einheit zu erhalten (Bader 2005).

$$\delta_a = \frac{0.083 \cdot p_0}{R_v \cdot T \cdot p} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{1.81} \cdot \frac{1}{3600} \quad (2)$$

wobei: δ_a Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Luft, bezogen auf den Dampfdruck [kg/(m·s·Pa)]
 p_0 Normaler Luftdruck = 101325 [Pa]
 R_v Gaskonstante für Wasserdampf = 462 [N·m/(kg·K)]
 T Thermodynamische Temperatur [K]
 p Effektiver Luftdruck [Pa]

2.3 Effektiver Luftdruck

Die barometrische Höhenformel zeigt, dass der Schweredruck eines Gases mit steigender Höhe h über dem Ausgangsniveau exponentiell abfällt, und gilt, wenn in jeder Höhe dieselbe Temperatur θ herrscht (Hering et al. 2002).

Für die Normatmosphäre ist für eine Lufttemperatur von $\theta = 0$ °C; $p_0 = 1.01325 \cdot 10^5$ Pa und $\rho_0 = 1.293$ kg/m³. Somit beträgt der Exponent in der barometrischen Höhenformel $\rho_0 \cdot g / p_0 = 1.256 \cdot 10^{-4}$ m⁻¹

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{\rho_0 \cdot g}{p_0} \cdot h} \quad (3)$$

wobei: p Effektiver Luftdruck [Pa]
 p_0 Normaler Luftdruck [Pa]
 g Fallbeschleunigung [m/s²]
 h [m ü. M.]
 ρ_0 Dichte der Luft 1.293 [kg/m³]
 e Eulersche Zahl $e = 2.718281...$

2.4 Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient

Der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient wird aus dem Produkt von Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient und der Dicke des homogenen Probekörpers gebildet (DIN EN ISO 12572 2001).

$$\delta = W \cdot d \quad (4)$$

wobei: δ	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient, bezogen auf den Dampfteil- druck [kg/(m·s·Pa)]
W	Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient, bezogen auf den Dampfteil- druck [kg/m ² ·s·Pa]
d	mittlere Probendicke [m]

2.5 Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient

Der Quotient aus der Wasserdampfdiffusionsstromdichte g und der Wasserdampfdruckdifferenz zwischen beiden Seiten des Prüfkörpers (DIN EN ISO 12572 2001) ergibt den Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient W .

$$W = \frac{G}{A \cdot \Delta p_v} \quad (5)$$

wobei: G	Wasserdampfdiffusionsstrom durch den Probekörper [kg/s]
A	Probekörperfläche [m ²]
Δp_v	Dampfdruckdifferenz über den Probekörper [Pa]
W	Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient [kg/(m ² ·s·Pa)]

Die im Prüfgefäß befindliche Luftschicht zwischen der Unterseite des Probekörpers und dem Trockenmittel, bzw. der Wasseroberfläche, stellt einen Widerstand für den Wasserdampfdiffusionsstrom dar. Für die meisten Stoffe ist dieser viel kleiner als der Widerstand des Stoffes; bei sehr durchlässigen Stoffen oder dünnen Membranen kann er jedoch zu einer signifikanten Messabweichung führen.

Wenn die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschicht s_d kleiner als 0,2 m ist, ist der gemessene Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient nach folgender Gleichung zu korrigieren (DIN EN ISO 12572 2001, Normanhang G).

$$W_c = \frac{1}{\frac{A \cdot \Delta p_v}{G} - \frac{d_a}{\delta_a}} \quad (6)$$

wobei: d_a	Dicke der Luftschicht [m]
δ_a	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Luft, bezogen auf den Dampfteil- druck [kg/(m·s·Pa)] nach Gleichung (2)
W_c	Korrigierter Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient [kg/(m ² ·s·Pa)]

2.6 Wasserdampf-Diffusionsstromdichte

Der Wasserdampf-Diffusionsstrom gibt die Wasserdampfmasse an, welche unter der Wirkung eines Dampfdruckgefälles auf die Zeit bezogen in Richtung der Flächennormalen diffundiert. Der auf die Flächeneinheit bezogene Wasserdampfdiffusionsstrom wird als Wasserdampfdiffusionsstromdichte g bezeichnet. Für g gilt nach der Norm DIN EN ISO 12572 (2001):

$$g = \frac{G}{A} \quad (7)$$

wobei: g Wasserdampfdiffusionsstromdichte [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
 A Probekörperfläche [m^2]
 G Wasserdampfdiffusionsstrom durch den Probekörper [kg/s]. Die Regressionsgerade zwischen Masse und Zeit ist ohne Berücksichtigung des vorangehenden, nicht linearen Teils der Prüfung zu bestimmen. Die Steigung der Geraden wird als G (Wasserdampfdiffusionsstrom durch den Probekörper) in Kilogramm je Sekunde ausgedrückt und wird zur Berechnung des Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizienten W verwendet (Gleichung (5)) (DIN EN ISO 12572 2001).

2.7 Dampfdruckdifferenz über den Prüfkörper

Δp_v wird aus dem Mittelwert der gemessenen Temperatur und der relativen Luftfeuchte über den Prüfzeitraum berechnet (DIN EN ISO 12572 2001; Bader 2005).

$$\Delta p_v = p_{sat,ext} - p_{sat,int} \quad (8)$$

$$p_{sat,ext} = \varphi_{ext} \cdot 610.5 \cdot e^{\frac{17.269 \cdot \theta}{237.3 + \theta}} \quad (9)$$

$$p_{sat,int} = \varphi_{int} \cdot 610.5 \cdot e^{\frac{17.269 \cdot \theta}{237.3 + \theta}} \quad (10)$$

wobei: Δp_v Dampfdruckdifferenz über den Probekörper [Pa]
 $p_{sat,ext}$ Dampfdruck ausserhalb der Prüfanordnung [Pa]
 $p_{sat,int}$ Dampfdruck innerhalb der Prüfanordnung [Pa]
 φ_{ext} Relative Luftfeuchtigkeit ausserhalb der Prüfanordnung [-]
 φ_{int} Relative Luftfeuchtigkeit innerhalb der Prüfanordnung [-]
 θ Temperatur in Grad Celsius [$^{\circ}\text{C}$]
 e Eulersche Zahl $e = 2.718281...$

2.8 Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke

Die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke ist die Dicke einer ruhenden Luftschicht, die den gleichen Wasserdiffusions-Durchlasswiderstand hat wie der Probekörper (DIN EN ISO 12572 2001). Sie ergibt sich nach:

$$s_d = \mu \cdot d \quad (11)$$

wobei: s_d Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke [m]
 μ Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]
 d Mittlere Probendicke [m]

2.9 Rohdichte

Die Rohdichte ρ_u ist der Quotient aus der Masse des Holzes (einschliesslich des in den Poren enthaltenen Wassers) m_u und dem äusseren Volumen V_u des Holzes (einschliesslich der Hohlräume) bei einem definierten Feuchtegehalt u .

Da der Feuchtegehalt schwanken kann und sich zum anderen mit der Veränderung des Feuchtegehaltes unterhalb des Fasersättigungsbereiches auch das Volumen des Holzes ändert, ist

die Rohdichte ρ_u feuchteabhängig. Bei Untersuchungen wird daher stets der sich bei einem definierten Klima (z.B. 20 °C und 65 % relative Luftfeuchte = Normalklima) einstellende Feuchtegehalt (Gleichgewichtsfeuchte) angegeben. Dieser beträgt bei Normalklima für Holz ca. 12 % (Niemz 1993).

Die Rohdichte wird nach folgender Beziehung berechnet (DIN 52182 1976; Niemz 1993):

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \quad (12)$$

wobei: ρ_u Rohdichte [g/cm³]
 m_u Masse des Holzes beim Feuchtegehalt u [g]
 V_u Äusseres Volumen des Holzes beim Feuchtegehalt u [cm³]

2.10 Feuchtigkeitsgehalt

Der prozentuale Feuchtigkeitsgehalt der Probe u ist das Verhältnis zwischen der Masse des in der Probe enthaltenen Wassers und der Masse der wasserfreien (darrtrockenen) Probe (DIN 52183 1977). Die Darrmethode ist ein sehr exaktes und direktes Messverfahren zur Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes (Kollmann and Höcke 1962; Kober and Plinke 1989). Es ist zunächst die Masse des feuchten Prüfkörpers (m_u) zu bestimmen. Danach ist der Prüfkörper bei 103 °C ± 2 K in einem gut belüfteten Trockenschrank bis zur Massenkonstanz zu darren, d.h. Trocknung und Wägung werden abwechselnd fortgesetzt bis das Probengewicht sich nicht mehr ändert (Kollmann and Höcke 1962; Kober and Plinke 1989). Anschliessend werden die Proben in einem mit Kieselgel gefüllten Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt. Zum Schluss ist die Darrmasse (m_{dtr}) des Prüfkörpers zu bestimmen (Niemz 1993). Aus den erhaltenen Messwerten wird nach DIN 52183 (1977) der Feuchtegehalt des Prüfkörpers nach folgender Gleichung bestimmt (Niemz 1993):

$$u = \frac{m_u - m_{dtr}}{m_{dtr}} \cdot 100 \text{ [\%]} \quad (13)$$

wobei: u Feuchtegehalt [%]
 m_u Masse des feuchten Holzes [g]
 m_{dtr} Masse des darrtrockenen Holzes [g]

Der Vorteil dieses gravimetrischen Verfahrens zur Bestimmung des Feuchtegehaltes ist, dass keine von der Materialbeschaffenheit abhängige physikalische Hilfsgrösse benötigt wird. Es sind jedoch folgende Nachteile zu nennen und zu berücksichtigen:

Das Verfahren kann nur an einer Probe angewendet werden, ist also nicht zerstörungsfrei durchführbar (Vanek and Teischinger 1987; Kober and Plinke 1989).

Das Verfahren ist zeitaufwendig und nimmt je nach Geschwindigkeit der Trocknung einige Minuten bis Stunden in Anspruch (Kober and Plinke 1989).

Es kann oft nicht verhindert werden, dass bei der Trocknung ausser Wasser auch sonstige Inhaltsstoffe austreten oder eine Gewichtszunahme durch Oxidation stattfindet (Vanek and Teischinger 1987).

Es kann ebenfalls nicht immer sichergestellt werden, dass beim Trocknen bis zur Gewichtskonstanz das gesamte Wasser austritt. Fest gebundene Wassermoleküle können in der Probe

verbleiben, oder aussen liegende Zonen des Probekörpers können sich so verändern, dass Wasser aus dem Kernbereich nicht mehr hinaus gelangt (Kübler 1968).

Die Methode ist aber trotz dieser Nachteile am weitesten verbreitet und wird in der Regel als Referenz zur Überprüfung indirekter Feuchtemessverfahren herangezogen (Vanek and Teischinger 1987; Kober and Plinke 1989).

2.11 Zeichen und Einheiten

In der folgenden Tabelle (Tabelle 2) werden die oben verwendeten Zeichen und Einheiten nochmals übersichtlich dargestellt. Sie entsprechen ISO 9346 (DIN EN ISO 9346 1996).

Tabelle 2 Zusammenfassung der Zeichen und Einheiten

Zeichen	Grösse	Einheit
A	Probekörperfläche	[m ²]
d	Mittlere Probendicke	[m]
g	Wasserdampfdiffusionsstromdichte	[kg/(m ² ·s)]
G	Wasserdampfdiffusionsstrom durch den Probekörper	[kg/s]
h	Höhe über Meer	[m]
m_{dtr}	Masse des darrtrockenen Holzes	[g]
m_u	Masse des feuchten Holzes	[g]
p	Effektiver Luftdruck	[Pa]
$p_{sat,ext}$	Dampfdruck ausserhalb der Prüfanordnung	[Pa]
$p_{sat,int}$	Dampfdruck innerhalb der Prüfanordnung	[Pa]
P_0	Normaler Luftdruck = 101325 [Pa]	[Pa]
s_d	Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke	[m]
T	Temperatur	[K]
u	Feuchtgehalt	[%]
V_u	Äusseres Volumen des Holzes beim Feuchtegehalt u	[cm ³]
W	Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient, bezogen auf den Dampfdruck	[kg/m ² ·s·Pa]
W_c	Korrigierter Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient, bezogen auf den Dampfdruck	[kg/m ² ·s·Pa]
Δp_v	Dampfdruckdifferenz über den Probekörper	[Pa]
ρ_u	Rohdichte	[g/cm ³]
δ	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient, bezogen auf den Dampfdruck	[kg/m·s·Pa]
δ_a	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Luft, bezogen auf den Dampfdruck	[kg/m·s·Pa]
φ	Relative Luftfeuchtigkeit	[-]
φ_{ext}	Relative Luftfeuchtigkeit ausserhalb der Prüfanordnung	[-]
φ_{int}	Relative Luftfeuchtigkeit innerhalb der Prüfanordnung	[-]
θ	Temperatur in Grad Celsius	[°C]
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]

3 Versuchsmaterial und –durchführung

3.1 Versuchsmaterial

Als Versuchsmaterial wurden zum einen un- und beschichtete Vollholzproben aus Fichten- und Buchenholz, zum anderen mehrschichtige Massiv- und Brettschichtholzplatten aus Fichtenholz als auch Verbundplatten (Decklage: Fichte; Mittellage: MDF oder OSB) geprüft (Tabelle 3).

Variiert wurden

- a) die Holz- und Plattenarten (Buche, Fichte, MDF, OSB)
- b) der Plattenaufbau (einschichtig, zweischichtig, vierschichtig, sechsschichtig, verschiedene Schichtdicken, verschiedene Werkstoffe)
- c) die Jahrringlage (liegend, stehend, variabel)
- d) die Lage der Schichten zueinander (parallel und senkrecht)
- e) Die Klebstoffe (zwei verschiedene PUR Leime (Mirapur 9520 (Geistlich Ligamenta AG, Schlieren / Schweiz) und Purbond® HB 181 (Purbond AG, Sempach / Schweiz))
- f) Beschichtung (Anstrichart):
 - Schichten Pento-Fluid IP (Imprägnierung und Beschichtung von Holzfassaden), mit Zwischenschliff,
 - Schichten Pento-Fluid Silverwood (für vergraute Fassaden), mit Zwischenschliff,
 - Dickschichtlasur mit Penta Stabilo-Grundierung: 1 Schicht Penta Stabilo (Holzschutzgrundierung), 3 Schichten Lasinol UV für Fassaden (wasserverdünnbare Lasur auf Basis eines Acryl-Polyurethan-Bindemittels),
 - Dickschichtlasur mit Aquagrund BI-Grundierung: 1 Schicht Aquagrund BI (wasserverdünnbare Holzschutzgrundierung), 3 Schichten Lasinol UV für Fassaden.

Tabelle 3 Versuchsübersicht

Variante	Platten- dicke [mm]	Holzart/ Plattenart	Normal- Rohdichte [kg/m ³]	Aufbau	Jahrringlage	Lage der Schichten zueinander	Klebstoff	Beschichtung (Anstrichart)
1	20	B	729	20	s	-	-	-
2	20	F	417	20	s	-	-	-
3	20	B	683	20	l	-	-	-
4	20	F	447	20	l	-	-	-
5	20	B	679	20	a	-	-	-
6	20	F	430	20	a	-	-	-
7	30	F	413	30	l	-	-	-
8	30	F	419	15/15	s/s		PUR M	-
9	30	F	420	10/10/10	s/s/s		PUR M	-
10	30	F	426	7.5/7.5/7.5/7.5	s/s/s/s		PUR M	-
11	30	F	425	5/5/5/5/5/5	s/s/s/s/s/s		PUR M	-
12	30	F	407	10/10/10	v/v/v	⊥	PUR P	-
13	40	F	447	10/20/10	v/v/v	⊥	PUR P	-
14	60	F	436	10/40/10	v/v/v	⊥	PUR P	-
15	28	F	439	7/14 _{G1} /7	v/v/v	⊥	PUR P	-
16	70	F	395	20/30 _{G2} /20	v/v/v	⊥	PUR P	-
17	30	F	429	10/10/10	s/v/s	⊥	PUR P	-
18	42	F	467	14/14/14	s/s/s	⊥	PUR P	-
19	39	F/MDF	581	10/19 _{MDF} /10	v/-/v	⊥	PUR P	-
20	37	F/OSB	532	10/17 _{OSB} /10	v/-/v	⊥	PUR P	-
21	30	F	440	10/10 ₀ /10	v/v/v	⊥	PUR P	-
22	30	F	429	10/10 ₅ /10	v/v/v	⊥	PUR P	-
23	30	F	420	10/10 ₁₀ /10	v/v/v	⊥	PUR P	-
24	30	F	385	10/10 ₃₀ /10	v/v/v	⊥	PUR P	-
25	30	F	422	10/10/10	l/v/l	⊥	PUR P	-
26	30	F	440	30	l	-	-	PFIP
27	30	F	410	30	l	-	-	PFS
28	30	F	390	30	l	-	-	PSoN
29	30	F	450	30	l	-	-	PSmN
30	30	F	440	30	l	-	-	ALoN
31	30	F	430	30	l	-	-	ALmN
32	30	F	400	30	l	-	-	-

Legende:

B Buche
F Fichte
MDF Mitteldichte Faserplatte
OSB Spanplatte (Oriented Structural Board)
G1 Geschlitzte Mittellage (Abstand der
Schlitze 20 mm; Tiefe 11 mm; Dicke
1,5 mm
G2 Geschlitzte Mittellage (Abstand der
Schlitze 32 mm; Tiefe 20 mm; Dicke
3 mm
a axial
l liegend
s stehend
v variabel
|| parallel
⊥ senkrecht
0; 5; 10; 30 Mittellage nicht verleimt; Abstand zwi-
schen den Latten 0, 5, 10, 30 mm

PUR M Mirapur 9520 (PUR-Klebstoff)
PUR P Purbond® HB 181 (PUR-Klebstoff)
PFIP Penta-Fluid IP
PFS Penta- Fluid Silverwood
PSoN Penta Stabilo ohne Nanobis
PSmN Penta Stabilo mit Nanobis
ALoN Aquagrund Lasinol ohne Nanobis
ALmN Aquagrund Lasinol mit Nanobis

3.2 Versuchsmethodik

3.2.1 Messprinzip

Die Probekörper wurden in die offene Seite eines Prüfgefäßes eingebaut, das entweder das Trockenmittel Silicagel blau (trockenes Prüfgefäß) (Varianten 1 bis 32) oder gewöhnliches Leitungswasser (nasses Prüfgefäß) (Varianten 1 bis 11) enthielt. Die Anordnungen wurden dann in einen Prüfraum oder eine Klimakammer gestellt, deren Temperatur und Luftfeuchte geregelt werden konnten. Wegen den unterschiedlich gewählten Dampfteildrücken Δ_{pv} (818 Pa und 1512 Pa) zwischen Prüfgefäß-Innenseite und Prüfraum entstand ein Diffusionsstrom durch die Holzprobe. Periodische Wägungen wurden durchgeführt, um schlussendlich die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ und die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 12572 (2001) zu bestimmen.

3.2.2 Prüfgeräte

Es wurden folgende Prüfeinrichtungen verwendet:

Prüfgefäß:

Das Prüfgefäß musste gegen das Trocknungsmittel und das Leitungswasser korrosionsbeständig sein. Aus diesem Grund wurden für die Versuche runde Glasgefäße mit einem Durchmesser von 140 mm und einer Höhe von 100 mm verwendet. Das durchsichtige Glasgefäß erlaubte eine sehr gute Überwachung des Trocknungsmittels (Verfärbung von blau (trocken) zu braun (feucht)). Die runden Gefäße hatten auch den Vorteil, dass sie sich ausgezeichnet abdichten liessen.

Abdichtung:

Die Abdichtung der Probekörper erfolgte durch eine speziell angefertigte Gummimanschette (Angst & Pfister AG / Schweiz) aus CR Standard-Gummimischung von 139 mm Innendurchmesser, 56 ± 1 mm Höhe und 1 mm Wanddicke. Sie wurden überlappt geklebt und die Naht am Innendurchmesser plan geschliffen.

Klimaraum:

Im Prüfraum (Klimaraum) wurde eine konstante Temperatur (293 ± 0.5 K) und Luftfeuchte (65 ± 3 %) aufrechterhalten. Um im Prüfraum gleichmässige Bedingungen sicherzustellen, wurde die Luft mittels eines Ventilators umgewälzt. Im Prüfraum befanden sich auch ein Hygro- und Thermometer, damit eine Überwachung der relativen Luftfeuchte und der Temperatur erfolgen konnte.

Prüfkammer:

In der Prüfkammer (Klimakammer) wurde eine konstante Temperatur (293 ± 0.5 K) und Luftfeuchte ($35 \pm 3\%$) erzeugt. Wegen den kleineren Abmessungen des Prüfraumes und der kontinuierlichen, elektronischen Überwachung konnten die Toleranzwerte ohne Probleme eingehalten werden.

Analysewaagen, Wärmeschrank und Exsikkator

Für die Bestimmung des Holzfeuchtegehaltes nach DIN 52183 wurde eine Analysewaage, die eine Bestimmung des Gewichtes der Schichtprobe auf 0.1 % ermöglicht, ein Wärmeschrank mit natürlicher Durchlüftung nach DIN 50011 (DIN 50011 Teil 11 1982) und ein Exsikkator nach DIN 12491 mit Trocknungsmittel (DIN 12491 1998) verwendet.

Für die periodischen Einzelmessungen der Gesamtproben (Probekörper + Gummidichtung + Prüfgefäß mit Trocknungsmittel oder Wasser) oder der Einzelproben (Probekörper mit

Gummidichtung) wurde eine Analysewaage, die die Probekörper mit der erforderlichen Genauigkeit (Fehlergrenze 0.01 g) wägen konnte, verwendet.

3.2.3 Konditionierung

Nach der Norm EN ISO 12572 sind die Probekörper vor der Prüfung bis zur Stabilisierung ihres Gewichtes und Volumens bei einer Temperatur von $23 \pm 5 \text{ °C}$ und einer relativen Luftfeuchtigkeit von $50 \pm 5 \text{ %}$ über einen ausreichend langen Zeitraum zu lagern, damit die Bestimmungen des Gewichtes, die an drei aufeinander folgenden Tagen durchgeführt werden, um nicht mehr als 5 % voneinander abweichen.

Die für die Untersuchungen der Varianten 1 bis 32 verwendeten Prüfklimare und der Wert der Abweichung von der Gewichtsstabilität weichen von der Norm etwas ab, da keine andere Technik verfügbar war und durch die Einhaltung der Norm die zur Verfügung stehenden Klimakammern über Jahre besetzt worden wären.

Ein Teil der Proben der Varianten 1 bis 32 wurden im Normalklima des Klimaraumes (relative Luftfeuchtigkeit 65 % / 20 °C), der andere Teil in der Klimakammer (relative Luftfeuchtigkeit 35 % / 20 °C) stabilisiert. Massenkonstanz war erreicht, wenn das Gewicht innerhalb von 24 Stunden nicht um mehr als 0.1 % voneinander abwich.

Die klimatisierten Probekörper wurden gewogen und die genauen Abmessungen ermittelt. Aus diesen Daten wurden die Rohdichten bestimmt.

3.2.4 Vorbereitung der Probekörper und der Prüfordnung

Je nach benötigter Wasserdampf-Partialdruckdifferenz wurde das Glasgefäß bis 15 mm unter den Glasrand mit Wasser oder dem Trocknungsmittel, Silicagel blau ENGP 3-6 mm (Schweizerhall, Basel / Schweiz) versetzt.

Die im Prüfgefäß befindliche Luft stellt einen Widerstand für den Wasserdampfdiffusionsstrom dar. Wenn die wasserdampf-diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d kleiner als 0.2 m war, wurde für die Berechnung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ anstelle der Gleichung (5) (W) die korrigierte Gleichung (6) (W_c) verwendet.

Die scheibenförmigen Probekörper wurden anschliessend auf die Glasgefässe aufgesetzt und mit einer Gummimanschette dampfdicht verschlossen.

3.2.5 Durchführung der Prüfung

Die Gesamtproben (Probekörper + Gummimanschette + Glasgefäß mit Wasser oder Trocknungsmittel) der Varianten 1 bis 32 wurden in den Klimaraum (relative Luftfeuchtigkeit 65 % / 20 °C, Normalklima) oder in die Klimakammer (relative Luftfeuchtigkeit 35 % / 20 °C) gestellt (Abbildungen 5).

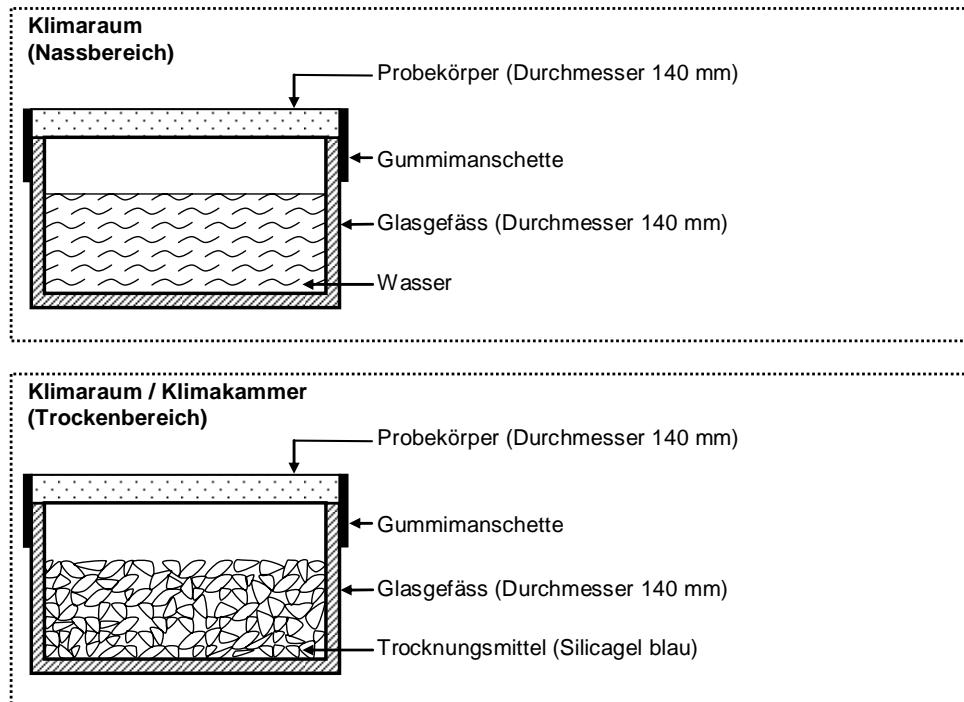


Abbildung 5 Messanordnungen für die Varianten 1 bis 32 (Nassbereich / Trockenbereich) für die Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit

Die Durchführung der Prüfung verlief in zwei Phasen. In einer ersten Phase wurden in gewissen Zeitabständen die Massen der Gesamtproben (Probekörper + Gummimanschette + Glasgefäß mit Wasser oder Trocknungsmittel) als auch der Einzelproben (Probekörper + Gummimanschette) bestimmt. Bei der Messung der Einzelproben wurden die Probekörper mit der Gummimanschette von den Gefäßen genommen und gewogen (Popper et al. 2004). Dieser Vorgang wurde bis zur Gewichtskonstanz der Probekörper wiederholt. Die Gewichtskonstanz galt als erreicht, wenn die Masse der Einzelproben gegenüber der vorherigen Wägung im Abstand von 24 Stunden um nicht mehr als 0,1 % geändert hatte (Popper et al. 2002).

In dieser ersten Phase entstand im Probekörper ein Gleichgewicht der hindurchdiffundierenden Wasserdampfmenge (Horn 1969; Niemz 1993). Diese Phase war notwendig, um die störenden Einflüsse (Chemisorption: relative Luftfeuchtigkeit $\leq 20\%$; Adsorption: relative Luftfeuchtigkeit $\leq 60\%$ und Kappilarkondensation: relative Luftfeuchtigkeit $> 60 - 100\%$) zu beseitigen (Cammerer 1956; Niemz 1993).

Nach dem Erreichen des stationären Zustandes des Probekörpers (Vanek and Teischinger 1989) begann die zweite Phase. Durch fünf aufeinanderfolgende Wägungen der Gesamtprobe konnte die Massenänderung pro Zeiteinheit, das heisst der Wasserdampfdiffusionsstrom G , bestimmt werden. Er wurde als Steigung der Geraden in Kilogramm je Sekunde ausgedrückt (DIN EN ISO 12572 2001). Mit diesem Wert liess sich mit den Gleichungen (1) bis (10) die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ berechnen.

4 Resultate und Diskussionen

4.1 Diffusion in axialer, radialer und tangentialer Richtung bei den Probekörpern der Dicke 20 mm (Varianten 1 bis 6)

In der folgenden Tabelle 4 sind die Mittelwerte der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen μ und der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicken s_d für 54 Probekörper (Dicke 20 ± 0.5 mm) aus Fichten- und Buchenvollholz mit axialer, radialer und tangentialer Diffusionsrichtung aufgeführt. Der Feuchtebereich, die Holzfeuchte und die Rohdichte sind ebenfalls dargestellt.

Tabelle 4 Versuchsergebnisse der Probekörper Dick 20 ± 0.5 mm (Mittelwert aus drei Proben)

Proben [Nr.]	Feuchte- Bereich (relative Luft- feuchte) [%]	Plattendicke [mm]	Normal- Rohdichte [kg/m ³]	Holz- feuchte [%]	Wasserdampf- diffusionswider- standszahl μ [-]	s_d [m]
Variante 1	100-65	19.9	723	17.2	36	0.7
Variante 2	100-65	19.9	411	17.2	20	0.4
Variante 3	100-65	20.2	684	16.9	17	0.3
Variante 4	100-65	19.9	456	17.9	17	0.3
Variante 5	100-65	20.1	682	15.0	2	0.1
Variante 6	100-65	20.1	432	15.0	1	0.1
Variante 1	0-65	19.9	749	10.4	172	3.4
Variante 2	0-65	19.9	419	10.8	106	2.1
Variante 3	0-65	20.2	686	9.8	64	1.3
Variante 4	0-65	19.9	458	11.0	92	1.8
Variante 5	0-65	20.2	683	11.6	9	0.2
Variante 6	0-65	20.3	434	12.1	8	0.2
Variante 1	0-35	19.6	715	7.2	819	16.0
Variante 2	0-35	19.6	422	7.4	299	5.9
Variante 3	0-35	20.0	678	6.8	170	3.4
Variante 4	0-35	19.7	426	7.1	199	3.9
Variante 5	0-35	20.0	672	7.5	10	0.2
Variante 6	0-35	20.0	423	7.8	8	0.2

Legende:

- Variante 1 Buchenvollholz mit stehenden Jahrringen (Diffusion tangential)
- Variante 2 Fichtenvollholz mit stehenden Jahrringen (Diffusion tangential)
- Variante 3 Buchenvollholz mit liegenden Jahrringen (Diffusion radial)
- Variante 4 Fichtenvollholz mit liegenden Jahrringen (Diffusion radial)
- Variante 5 Buchenvollholz in Faserrichtung (Diffusion axial)
- Variante 6 Fichtenvollholz in Faserrichtung (Diffusion axial)

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen (μ – Werte) gemäss DIN EN ISO 12572 zur Beschreibung der Wasserdampfdiffusion liegen sowohl für den Trocken-, als auch für den Nassbereich vor. Eine Übersicht über die Messwerte der verschiedenen Autoren zeigt Tabelle 1 (S. 5 - 6). Für Fichte und Buche kann der bei den einzelnen μ – Wert-Bestimmungen registrierte mittlere Wassergehalt zugeordnet und eine Unterscheidung nach axialer, tangentialer und radialer Diffusionsrichtung vorgenommen werden. Die Messergebnisse wurden nach dem Trockenbereich- (Luftfeuchtebereich 0-65 und 0-35) und dem Nassbereichverfahren (Luftfeuchtebereich 100-65) ermittelt. Generell zu beachten sind die erheblichen Unterschiede zwischen den nach dem Trocken- und Nassbereichverfahren ermittelten μ – Werten bei Fichten- und Buchenvollholz (Abbildungen 6 bis 8).

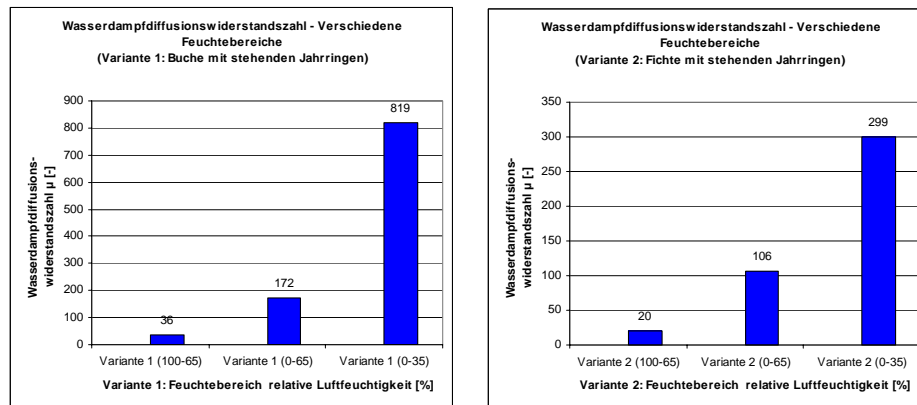


Abbildung 6 Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl der Variante 1 und 2 in verschiedenen Feuchtebereichen ((100-65), (0-65), (0-35)) bei Buche und Fichte mit stehenden Jahrringen (tangente Diffusionsrichtung)

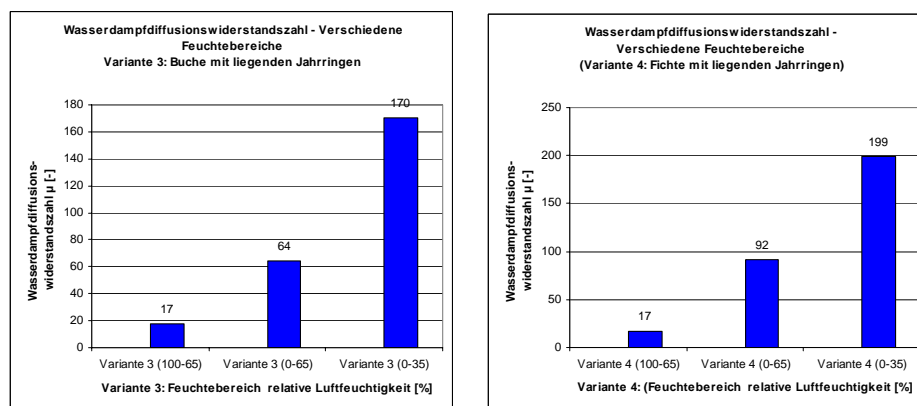


Abbildung 7 Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl der Variante 3 und 4 in verschiedenen Feuchtebereichen ((100-65), (0-65), (0-35)) bei Buche und Fichte mit liegenden Jahrringen (radiale Diffusionsrichtung)

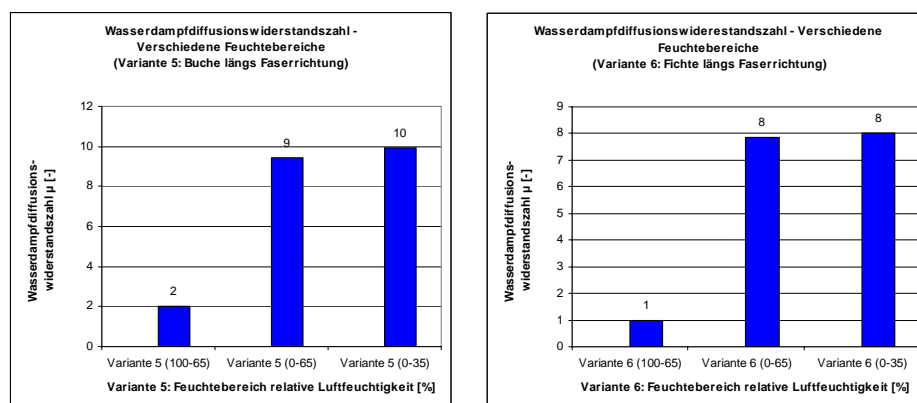


Abbildung 8 Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl der Variante 5 und 6 in verschiedenen Feuchtebereichen ((100-65), (0-65), (0-35)) bei Buche und Fichte in Faserrichtung (axiale Diffusionsrichtung)

Dies verdeutlicht die Abhängigkeit der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ vom Wassergehalt.

Zur systematischen Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ als Funktion des Wassergehaltes existieren nur wenige Untersuchungen (Horn 1969; Kiessel and Möller 1989; Vanek and Teischinger 1989; Popper et al. 2002; Popper et al. 2004). Gerade solche Zusammenhänge sind aber wesentlich für die Berechnung von neuen Wasserdampfdiffusi-

onswiderstandszahlen und zur praxisnahen rechnerischen Beschreibung von Diffusionsvorgängen in Holz und neuen Holzwerkstoffen.

Die aus den Versuchen berechneten Ergebnisse sind in der Abbildung 9 dargestellt.

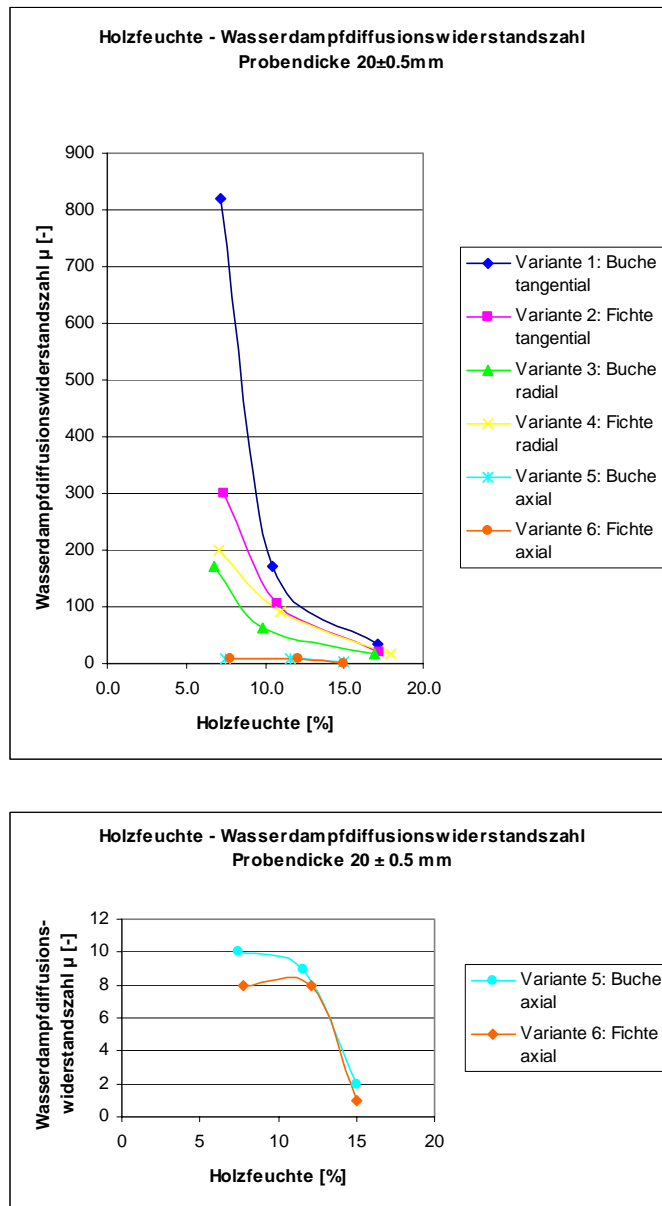


Abbildung 9 Holzfeuchte – Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl der Varianten 1 bis 6: Diffusion in tangentialer, radialer und axialer Richtung bei Buche und Fichte

Daraus lässt sich quer zur Faser eindeutig ein exponentieller Abfall der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ mit steigendem Wassergehalt erkennen. Dieser Zusammenhang wurde schon von VOIGT et al. festgestellt (Voigt et al. 1940). In Abbildung 10 und 11 sind die Messungen für Fichte und Buche von CAMMERER, FRÜHWALD und VANEK und TEISCHINGER dargestellt (Cammerer 1956; Frühwald 1973; Vanek and Teischinger 1989). Sie stimmen mit den in Tabelle 4 ermittelten Werten sehr gut überein.

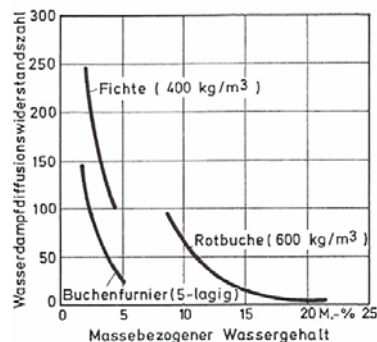


Abbildung 10 Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen in Abhängigkeit vom massebezogenen Wassergehalt für Buche und Fichte CAMMERER (1956) und Buchenfurnier FRÜHWALD (1973); aus KIESSEL (1989)

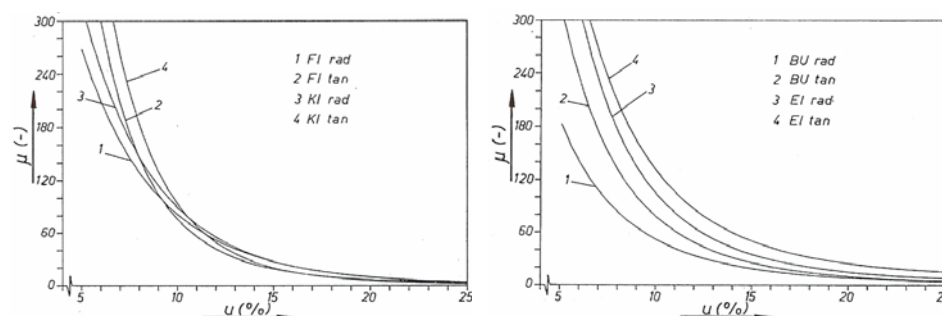


Abbildung 11 μ - Werte für Fichte, Kiefer, Buche und Eiche, jeweils für radiale und tangential Diffusionsrichtung, in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit, bei 20 °C; aus VANEK und TEISCHINGER (1989)

Bezüglich der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ in radialer (liegende Jahrringe), tangentialer (stehende Jahrringe) und axialer Richtung zeigt sich, dass in den Feuchtebereichen (100-65), (0-65) und (0-35) die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ in tangentialer Richtung stets grösser ist als in radialer Richtung. In axialer Richtung ist die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ stets kleiner als in radialer Richtung (Abbildungen 6 bis 8). Mit abnehmender Holzfeuchtigkeit nimmt bei den untersuchten Holzarten Buche und Fichte die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ in tangentialer Richtung stärker zu als in radialer und axialer Richtung (Abbildungen 6 bis 8). Wie festgestellt, erfolgt die Diffusion in axialer Richtung erheblich schneller als quer dazu und in radialer schneller als in tangentialer Richtung (Willeitner and Schwab 1981). Näherungsweise gilt:

$$\mu_{\text{tangential}} : \mu_{\text{radial}} : \mu_{\text{axial}} = 15 : 10 : 1 \text{ (Willeitner and Schwab 1981)}$$

Aus den Abbildungen 6 bis 8 können für die verschiedenen Feuchtebereiche folgende Verhältnisse herausgelesen werden (Tabelle 5).

Tabelle 5 Wasserdampfdiffusionsverhältnis $\mu_{\text{tangential}} : \mu_{\text{radial}} : \mu_{\text{axial}}$

Holzart	Feuchtebereich	$\mu_{\text{tangential}}$	μ_{radial}	μ_{axial}	Verhältnis
Buche	100-65	36	17	2	18.0 : 8.5 : 1
	0-65	172	64	9	19.1 : 7.1 : 1
	0-35	819	170	10	81.9 : 17.0 : 1
Fichte	100-65	20	17	1	20.0 : 17.0 : 1
	0-65	106	92	8	13.3 : 11.5 : 1
	0-35	299	199	8	37.4 : 24.9 : 1

Eine mögliche Erklärung für diese Erkenntnisse sind die Einflüsse von Spätholz und den Holzstrahlen auf die Diffusion (Vanek and Teischinger 1989). Weiter ist bekannt, dass Holz auf Grund des strukturellen Aufbaus in Faserrichtung wesentlich mehr Wasser aufnimmt, als senkrecht dazu. Durch Tüpfelverschluss wird bei Fichte die Wasseraufnahme wesentlich reduziert, bei Buche tritt dagegen kaum die für viele Laubhölzer typische Verthyllung auf, so dass vergleichsweise eine höhere Feuchtaufnahme erfolgt. Abbildung 12 zeigt die Wasseraufnahmekoeffizienten für Fichte und Buche in den drei Hauptschnitttrichtungen. Der Wasseraufnahmekoeffizient ist in Faserrichtung bei Buche etwa dreimal so gross wie bei Fichte. Er ist für beide Holzarten tangential höher als radial. In Faserrichtung ist er bei Fichte etwa 4.5 bis 6 Mal grösser als senkrecht dazu, bei Buche 12 bis 15 Mal höher (Wang and Niemz 2002).

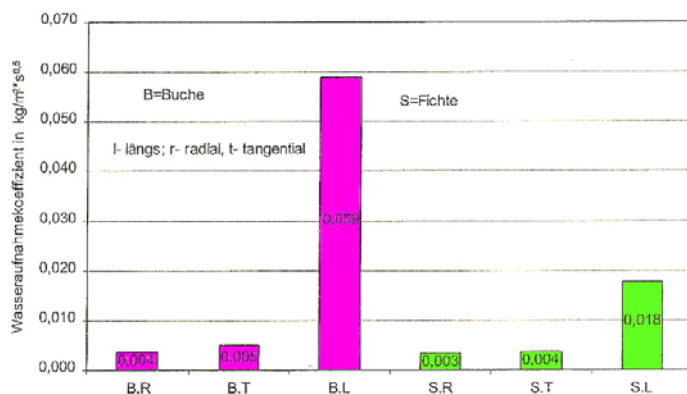


Abbildung 12 Wasseraufnahmekoeffizient nach 24 h Wasserlagerung für Fichte und Buche; aus WANG (2002), verändert

Wie schon erwähnt, steigt die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ bei sinkender Holzfeuchtigkeit (Siau 1984) und die radial und axial verlaufenden Holzstrahlen und Leitelemente gewinnen infolge ihres geringeren Diffusionswiderstandes durch ihre Längserstreckung in axialer und radialer Richtung für die Gasdiffusion an Bedeutung. Die radiale und axiale Diffusionsleitfähigkeit wird somit mit sinkender Holzfeuchtigkeit nicht so stark abnehmen wie die tangentiale Leitfähigkeit (Vanek and Teischinger 1989).

Bei steigender Holzfeuchtigkeit hingegen wird die Diffusionsleitfähigkeit der Zellwände deutlich besser und die Bedeutung der Holzstrahlen und Leitelemente für die radiale und axiale Diffusion nimmt ab. Demnach sollten Holzarten mit wenigen Holzstrahlen und/oder mit einem schmalen, aber sehr dichten Spätholz bei höheren Holzfeuchten in tangentialer Richtung eine besser Diffusionsleitfähigkeit und somit einen tieferen Diffusionswiderstand haben als in radialer Richtung.

In den verschiedenen Feuchtebereichen (100-65), (0-65) und (0-35) ist bei der Buche wegen dem stark ausgeprägten Holzstrahlenanteil von 11.2 bis 21.2 % (Wagenführ 1996) und durch das fehlende Spätholz die radiale Diffusionswiderstandszahl μ stets kleiner als die tangentiale Diffusionswiderstandszahl μ . Auch die Fichte mit einem geringeren flächenmässigen Holzstrahlenanteil von 4.4 bis 5.5 %, dem schmalen und diffusionsdichten Spätholz und mit den grossen flächenmässigen Anteil Frühholz zeigt in den verschiedenen Feuchtebereichen die gleiche Tendenz. Die radiale Diffusionswiderstandszahl μ ist stets kleiner als die tangentiale Diffusionswiderstandszahl μ . Jedoch sind die Werte für die Fichte in tangentialer Richtung stets kleiner als diejenige für Buche, was auf eine bessere Diffusionsleitfähigkeit in tangentialer Richtung hinweist (Abbildungen 6 bis 8).

4.2 Diffusionstechnisches Verhalten von verlebten Brettschichtholzprobekörpern mit stehenden Jahrringen (Varianten 7 bis 11)

Bei den Holzwerkstoffen wird der Wasserdampfdiffusionswiderstand wesentlich von der Verteilung des Klebstoffes mitbestimmt. Während Vollholz für Wasserdampf einen relativ geringen Durchgangswiderstand darstellt, bringen die geschlossen Klebstoffugen bei Sperrholz, bei Massivholzplatten (Popper et al. 2002; Popper et al. 2004; Bader 2005) und bei Brettschichtholz (Tabelle 6) eine massive Erhöhung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen μ mit sich.

Tabelle 6 Versuchsergebnisse der Probekörper der Varianten 8 - 11 (24 mehrschichtige Probekörper mit Klebfugen aus Mirapur 9520); (Mittelwert aus drei Proben)

Probe [Nr.]	Klebstoff	Anzahl Klebfugen	Feuchtebereich (relative Luftfeuchte) [%]	Plattendicke [mm]	Normal-Rohdichte [kg/m ³]	Holzfeuchte [%]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ [-]	s_d [m]
Variante 7	-	0	100-65	30.1	411	17.2	20	0.4
Variante 8	Mirapur 9520	1	100-65	29.7	419	19.0	17	0.5
Variante 9	Mirapur 9520	2	100-65	30.4	420	19.1	49	1.5
Variante 10	Mirapur 9520	3	100-65	30.1	426	18.7	40	1.2
Variante 11	Mirapur 9520	5	100-65	30.6	425	17.1	106	3.3
Variante 7	-	0	0-65	29.7	415	10.0	98	2.9
Variante 8	Mirapur 9520	1	0-65	29.8	419	10.2	88	2.6
Variante 9	Mirapur 9520	2	0-65	30.4	420	9.9	171	5.2
Variante 10	Mirapur 9520	3	0-65	30.2	425	9.7	181	5.5
Variante 11	Mirapur 9520	5	0-65	30.6	424	9.0	241	7.4

Den Einfluss der Klebstoffugen und des Feuchtebereiches auf die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ zeigen Abbildungen 13 und 14.

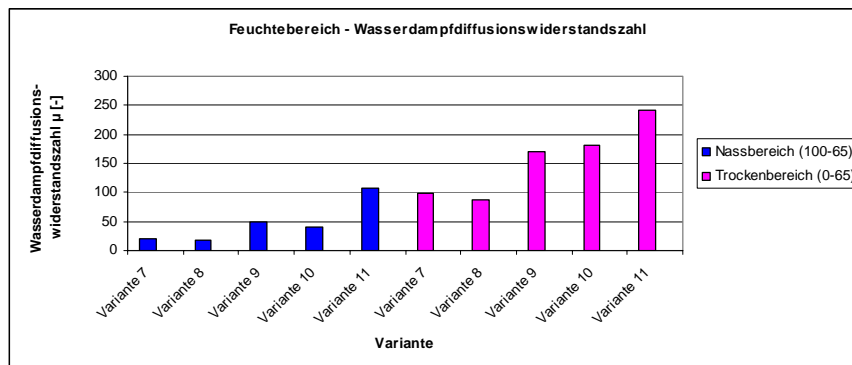


Abbildung 13 Einfluss der Anzahl Klebfugen und des Feuchtebereiches auf die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ

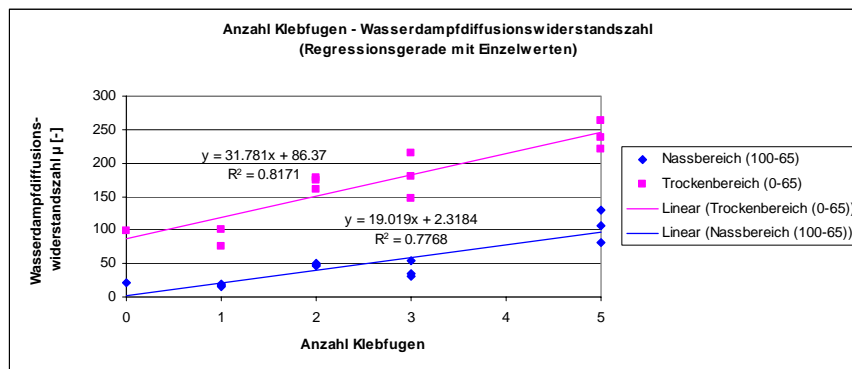


Abbildung 14 Regression zwischen der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ und der Anzahl Klebfugen

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ steigt mit zunehmender Anzahl Klebfugen. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ korreliert mit der Anzahl Klebfugen ausserordentlich gut (Nassbereich: $R^2 = 0.78$; Trockenbereich: $R^2 = 0.82$). Diese Aussage wird von FRÜHWALD und POPPER bestätigt (Frühwald 1973; Popper et al. 2002; Popper et al. 2004).

Aus der Abbildung 15 geht hervor, dass die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen μ , für die verlebten Brett-schichtholzproben, mit zunehmender Holzfeuchtigkeit sinken. Das Bestimmtheitsmass R^2 von 0.65 zeigt eine gute Abhängigkeit zwischen Holzfeuchte und Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ .

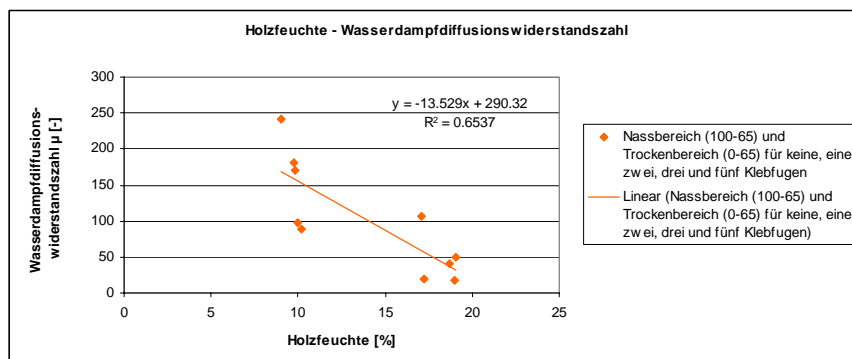


Abbildung 15 Zusammenhang zwischen Holzfeuchte und Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ

4.3 Diffusionsverhalten von verschiedenen Massivholz- und Verbundwerkstoffplatten (Variante 12 bis 25)

Die nachfolgende Tabelle (Tabelle 7) zeigt die Mittelwerte (Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen μ , wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicken s_d ; Feuchtebereiche; Holzfeuchten, Rohdichten) der 14 untersuchten Massivholzplatten-Varianten.

Tabelle 7 Versuchsergebnisse der Probekörper der Varianten 12 bis 25 (dreischichtige Massivholz- und Verbundwerkstoffplatten); aus BADER (2005), verändert

Proben [Nr.]	Feuchte- Bereich (relative Luft- feuchte) [%]	Aufbau der Platten [mm]	Normal- Rohdichte [kg/m ³]	Holz- feuchte [%]	Wasserdampf- diffusionswider- standszahl μ [-]	s_d [m]
Variante 12	0-65	10/10/10	407	9.2	134	3.8
Variante 13	0-65	10/20/10	447	10.0	102	2.7
Variante 14	0-65	10/40/10	436	10.8	177	7.6
Variante 15	0-65	7/14 _{G1} /7	439	9.5	109	2.9
Variante 16	0-65	20/30 _{G2} /20	395	10.8	96	6.6
Variante 17	0-65	10/10/10	429	9.2	121	3.4
Variante 18	0-65	14/14/14	467	9.4	166	7.1
Variante 19	0-65	10/19 _{MDF} /10	581	7.6	109	4.2
Variante 20	0-65	10/17 _{OSB} /10	532	8.3	159	5.9
Variante 21	0-65	10/10 ₀ /10	440	9.3	125	3.6
Variante 22	0-65	10/10 ₅ /10	429	9.5	118	3.4
Variante 23	0-65	10/10 ₁₀ /10	420	9.7	81	2.4
Variante 24	0-65	10/10 ₃₀ /10	385	9.6	70	2.0
Variante 25	0-65	10/10/10	422	9.0	92	2.5

Aus der Tabelle 7 ist zu entnehmen, dass sich bei den Massivholzplatten eine Gleichgewichtsfeuchte von ca. 10 % einstellt. Bei den Verbundplatten (Mittellage MDF oder OSB) sind diese Werte etwas tiefer (7.6 % bei MDF und 8.3% bei OSB).

Theoretisch stellt sich auf der Gefäß-Aussenseite bei einer Luftfeuchte von 65 % und einer Temperatur von 20 °C (Normalklima) an der Oberfläche des Prüfkörpers eine Holzfeuchte von 12 % ein. Auf der Gefäß-Innenseite entsteht durch das Silicagel ein Klima von 0 % Luftfeuchte und einer Temperatur von 20 °C. Wäre der Feuchtigkeitsverlauf über den Querschnitt linear, würde sich eine Holzfeuchte von 6 % einstellen. Der effektive Wert von 10 % zeigt, dass der Feuchtigkeitsverlauf über den Querschnitt nicht linear verläuft.

In der folgenden Abbildung sind Wasserdampfdiffusionskoeffizienten der Varianten 12 bis 25 dargestellt (Abbildung 16). Zusätzlich sind die Minimum- und Maximalwerte aufgetragen. Die ermittelten Werte stimmen mit den Ergebnissen der verschiedenen Autoren gut überein (Cammerer 1956; Frühwald 1973; Vanek and Teischinger 1989).

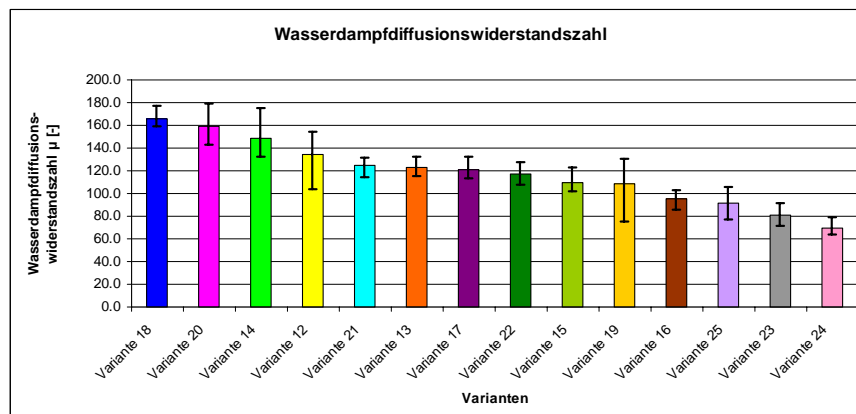


Abbildung 16 Wasserdampfdiffusionskoeffizient-Mittelwerte μ für die Varianten 12 bis 25; aus BADER (2005), verändert

Das schon in Abschnitt 4.1 beschriebene Diffusionsverhalten und ihre Ursachen in den drei Diffusionsrichtungen werden durch die Varianten 17 (Deckschichten mit stehenden Jahrringen) und 25 (Decklagen mit liegenden Jahrringen) bestätigt. Es zeigt sich, dass der Wasserdampfdiffusionskoeffizient μ in tangentialer höher als in radialer Richtung ist (Abbildung 17). Wie schon erwähnt liegt die Erklärung für diese Erkenntnisse im Einfluss des Spätholzes und der Holzstrahlen auf die Diffusion (Vanek and Teischinger 1989).

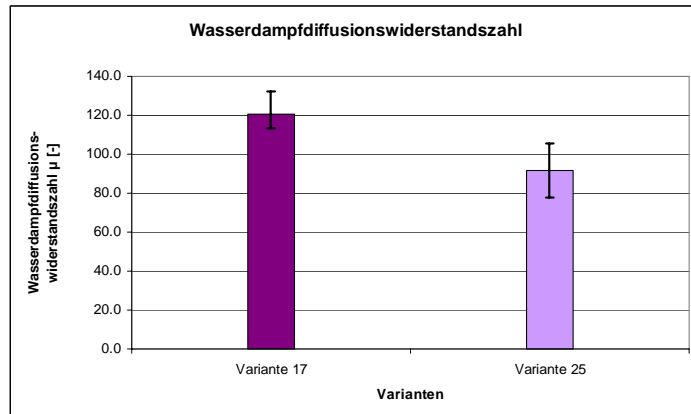


Abbildung 17 Wasserdampfdiffusionswiderstände bei dreischichtigen Massivholzplatten (30 mm). Variante 17 (10/10/10) mit stehender und Variante 25 (10/10/10) mit liegender Jahrringlage in den Deckschichten; aus BADER (2005), verändert

Die Varianten 22 (10/10₅/10), 23 (10/10₁₀/10) und 24 (10/10₃₀/10), welche einen Abstand von 5, 10 und 30 mm zwischen den Lamellen der Mittelschichten aufweisen, wurden mit den Varianten 12 (10/10/10) und 21 (10/10₀/10) verglichen. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass der Abstand der Lamellen in den Mittelschichten und der damit entstehende Freiraum einen Einfluss auf die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ haben. Je grösser der Abstand, desto kleiner die μ -Werte (Abbildung 18).

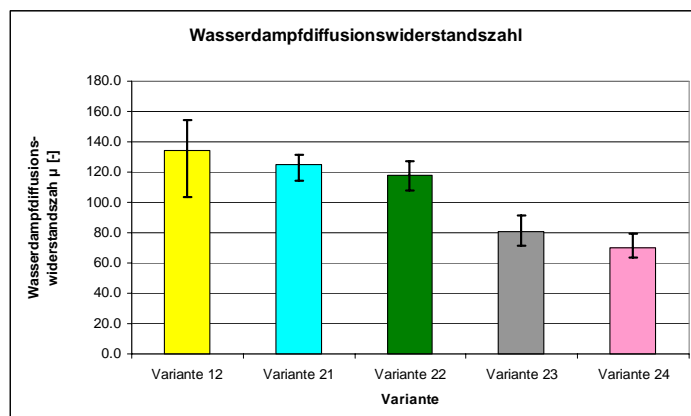


Abbildung 18 Wasserdampfdiffusionswiderstände bei dreischichtigen Massivholzplatten (30 mm) bei den Varianten 12 (10/10/10), 21 (10/10₀/10), 22 (10/10₅/10), 23 (10/10₁₀/10), 24 (10/10₃₀/10); mit variabler Jahrringlage in den Deckschichten; aus BADER (2005), verändert

Nach JENSEN und EMMELER liegt der Grund für die tieferen μ -Werte der MDF-Platten im Vergleich zu den Spanplatten darin, dass durch die grössere Anzahl von Teilchen, die miteinander verleimt sind, auch mehr Zwischenräume entstehen können. Dieses Hohlsystem ermöglicht eine verbesserte Wasserdampfdiffusion. Gleichzeitig wurde bei einer Zunahme der Plattendichte ein Anstieg des Wasserdampfdiffusionswiderstandes μ festgestellt (Jensen and Emmeler 1996). Die Rohdichte kann als ein direktes Mass für die Porosität des Materials an-

gesehen werden (Horn 1969). Bei den OSB Platten liegen die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen μ in einem grossen Wertebereich (Merz, Fischer et al. 1997; Radovic et al. 1997; Devanthier 2005).

Bei den untersuchten dreischichtigen Verbundplatten (Variante 19: (10/19_{MDF}/10), Deckschichten Vollholz, Mittelschicht MDF; Variante 20: (10/17_{OSB}/10), Deckschichten Vollholz, Mittelschicht OSB) beeinflussen sich die oben erwähnten Eigenschaften gegenseitig. Die Messergebnisse sind in der folgenden Abbildung dargestellt (Abbildung 19).

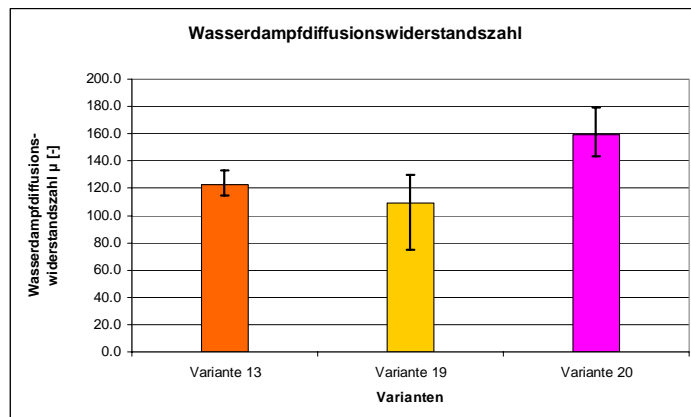


Abbildung 19 Wasserdampfdiffusionswiderstände bei dreischichtigen Massivholz- (Variante 13 (10/20/10)) und Verbundplatten (Variante 19 (10/19_{MDF}/10); Variante 20 (10/17_{OSB}/10)); mit variabler Jahrringlage in den Deckschichten; aus BADER (2005), verändert

Es stellt sich die Frage, ob aufgrund der erhaltenen Messergebnisse eine umfassende Klärung des Diffusionsverhaltens abgeleitet werden kann. Bei der Betrachtung der μ -Werte fällt zunächst einmal der höhere μ -Wert der Variante 20 auf. Der Unterschied zwischen der Variante 13 und 19 ist nicht signifikant und bedarf zusätzlicher Untersuchungen.

4.4 Wasserdampf-Diffusionswiderstand beschichteter Fichtenholzplatten (Varianten 26 bis 32)

Der Einfluss einer Beschichtung mit Holzschutzmitteln wurde an Fichtenholzproben mit liegenden Jahrringen geprüft. Aus den ermittelten μ -Werten geht zunächst hervor, dass alle Holzschutzmittel einen Anstieg der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ bewirken. Die Beschichtung hat einen deutlichen Einfluss auf die Wasserdampfdiffusion (Abbildung 20 / Tabelle 8).

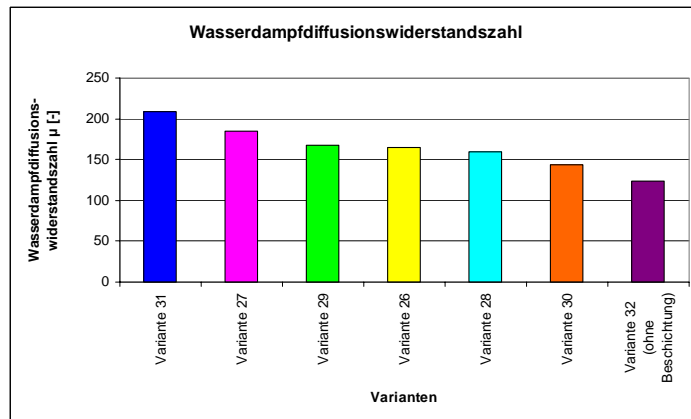


Abbildung 20 Wasserdampfdiffusionswiderstände bei Fichtenvollholzproben mit liegenden Jahrringen, unbeschichtet (Variante 32) und beschichtet (Varianten 26 bis 32)

Tabelle 8 Wasserdampfdiffusionswiderstand μ von beschichteten Fichtenholzprobekörpern (liegende Jahrringe) als Funktion von Dampfdruckgefälle, Plattendicke, Normal-Rohdichte und Holzfeuchte; aus POPPER (2006), verändert

Proben [Nr.]	Feuchte- Bereich (relative Luft- feuchte) [%]	Plattendicke [mm]	Normal- Rohdichte [kg/m ³]	Holz- feuchte [%]	Wasserdampf- diffusionswider- standszahl μ [-]
Variante 26	0-65	30	440	11.3	165
Variante 27	0-65	30	410	11.5	185
Variante 28	0-65	30	390	10.9	159
Variante 29	0-65	30	450	11.4	167
Variante 30	0-65	30	440	11.1	144
Variante 31	0-65	30	430	11.4	209
Variante 32	0-65	30	400	10.6	124

Legende:

- Variante 26 Beschichtung des Probekörpers mit Penta-Fluid IP (Beschichtung oben)
- Variante 27 Beschichtung des Probekörpers mit Penta- Fluid Silverwood (Beschichtung oben)
- Variante 28 Beschichtung des Probekörpers mit Penta Stabilo ohne Nanobis (Beschichtung oben)
- Variante 29 Beschichtung des Probekörpers mit Penta Stabilo mit Nanobis (Beschichtung oben)
- Variante 30 Beschichtung des Probekörpers mit Aquagrund Lasinol ohne Nanobis (Beschichtung oben)
- Variante 31 Beschichtung des Probekörpers mit Aquagrund Lasinol mit Nanobis (Beschichtung oben)
- Variante 32 Fichtenholzprobekörper ohne Beschichtung mit liegenden Jahrringen

5 Schlussfolgerungen

Die hier durchgeführten Untersuchungen an un- und beschichteten Vollholzproben aus Fichten- und Buchenholz, an mehrschichtigen Massiv- und Brettschichtholzplatten aus Fichtenholz sowie an Verbundplatten (Decklage: Fichte; Mittellage: MDF oder OSB) erlauben folgende Schlüsse zu ziehen:

Aus den tangentialen, radialen und axialen Diffusionsmessungen an Buchen- und Fichtevollholzproben (Varianten 1 bis 6) geht hervor, dass die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ mit abnehmender Gutsfeuchtigkeit progressiv ansteigt. Die Autoren VANEK und TEISCHINGER, die sich mit tangentialen und radialen Diffusionsvorgängen in Buchen- und Fichtenholz beschäftigten, kommen bei mittleren bis hohen Holzfeuchten zu denselben μ – Werten (Vanek and Teischinger 1989). Abweichungen ergeben sich vor allem bei tiefen Holzfeuchten. Je kleiner die Gutsfeuchte desto steiler der Kurvenverlauf (Abbildungen 7 und 8). Daraus ergeben sich schon bei kleinsten Änderungen der Holzfeuchte sehr grosse Unterschiede der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen μ .

Die an Holz - Klebstoff - Kombinationen (Fichte – Mirapur 9520) (Varianten 7 bis 11) durchgeführten Diffusionsversuche zeigen, dass die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ mit zunehmender Anzahl Klebfugen steigt.

Die μ – Werte der verklebten Brettschichtholzproben liegen über denjenigen des Vollholzes. Für die Versuchsproben der Dicke 30 mm gilt folgendes:

$$\mu_{\text{Vollholz}} < \mu_{\text{Brettschichtholz eine Klebfuge}} < \mu_{\text{Brettschichtholz zwei Klebfugen}} < \mu_{\text{Brettschichtholz drei Klebfugen}} < \mu_{\text{Brettschichtholz fünf Klebfugen}}$$

Die Versuchsergebnisse aus den Diffusionsversuchen bei variabler Holzfeuchte zeigen mit abnehmender Holzfeuchtigkeit ebenfalls einen Anstieg der μ – Werte. Diese enge negative Korrelation zwischen Holzfeuchte und Diffusionswiderstandszahl, wird von HORN, FRÜHWALD, VANEK und TEISCHINGER und POPPER bestätigt (Horn 1969; Frühwald 1973; Vanek and Teischinger 1989; Popper et al. 2002; Popper et al. 2004).

Die gemessenen Werte der Varianten 12 bis 25 sind im Allgemeinen kleiner als diejenigen aus der Literatur, stimmen aber in ihren Grössenverhältnissen mit diesen überein. Die Werte liegen zwischen 70 und 180.

Bei den geprüften dreilagigen Verbundwerkstoffen (Varianten 19 und 20) führt die MDF-Mittelschicht zu einer Reduktion, eine OSB-Mittelschicht zu einer Erhöhung der μ – Werte im Vergleich zu einer Massivholzplatte von ungefähr gleicher Dicke. Der Unterschied des Wasserdiffusionsverhaltens zwischen MDF, OSB und Vollholz ergibt sich aus der unterschiedlichen Struktur. Bei Holz liegt ein natürliches Hohlraumsystem aus Zelllumina, Zellwandhöhlräumen und Tüpfelöffnungen mit durch die Anisotropie und Inhomogenität bestimmter und begrenzter Kommunikationsmöglichkeit. Dieses strukturell bedingten Hohlräume sind zwar in Holzwerkstoffen je nach Aufschlussgrad des Holzes in mehr oder weniger starkem Masse noch vorhanden (MDF weniger; OSB mehr), durch die Zerlegung des gewachsenen Holzverbandes und erneute Zusammenfügung der Bestandteile unter plastischer Verformung und Ummantelung mit Kunstharzfilmen wird jedoch die Kommunikationsmöglichkeit innerhalb des ursprünglichen Kapillarsystems der Zellwand stark herabgesetzt. Zusätzlich entsteht jedoch durch den künstlichen Verbund ein grobkapillares gut kommunizierendes und verhältnismässig isotropes Hohlraumsystem zwischen den je nach Aufschlussverfahren unterschiedlich zerteilten Holzbestandteilen.

Ein ähnlicher Zusammenhang besteht zwischen dem Hohlraumsystem von Faser- und Spanplatten und den Hohlräumen der Varianten 21 bis 24. Durch die Vergrößerung des Abstandes der Lamellen in der Mittelschicht der Probekörper nimmt der Hohlraumanteil zu, was eine Reduktion der μ -Werte bewirkt.

Wie schon bei den Varianten 1 bis 6 festgestellt, hat auch bei Massivholzplatten die Jahrringlage in den Deck- und Mittelschichten einen entscheidenden Einfluss auf den Wasserdampfdiffusionswiderstand. Auch hier wurden in Lagen mit stehenden Jahrringen grössere Werte gemessen als in den Lagen mit liegenden Jahrringen.

Die Beschichtung der Probekörper mit einem Holzschutzmittel (Varianten 26 bis 32) führt zu einem Anstieg der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen von 16 bis 69 %.

Zukünftig geplante Arbeiten werden den Kenntnisstand zu Materialkennwerten wie

- Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ und wasserdampfähquivalenter Luftschichtdicke s_d (bei gleich bleibenden Temperaturen und in variablen Feuchtebereichen),
- Kinetik des Sorptions- und Desorptionsprozesses an Bauteilen (bei unterschiedlicher Ausgangsfeuchte und gleich bleibendem Probenformat, aber unterschiedlichen Klebstoffen und Fugendicken) (Paul Scherrer Institut (PSI)),
- Wasseraufnahmekoeffizienten (kapillare Wasseraufnahmen),

nochmals vergrössern. Dadurch werden Voraussetzungen für die Entwicklung optimierter Gesamtsysteme und deren rechnerische Gestaltung geschaffen. Das Verhalten der Gesamtkonstruktion soll so unter variablen Bedingungen vorausberechnet werden. Zur Modellierung dieses Gesamtsystems wird das Programmsystem "Delphin" eingesetzt.

Weiter werden folgende Materialkennwerte, die bisher legendlich abgeschätzt oder aus älteren Arbeiten (Tabelle 1) abgeleitet wurden, neu bestimmt:

- Das Diffusionsverhalten der Einzelschichten und der verklebten Proben (Brettschichtholz, Massivholzplatten und Verbundwerkstoffe).
- Der Einfluss der Ausgangsfeuchte auf die Kinetik der Sorptions- und Desorptionsgeschwindigkeit.
- Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen μ bei variablen Holzfeuchten und variablen Dampfdruckgefällen in axialer, radialer, tangentialer und semitangentialer (stehende Jahrringe um 45° geneigt) Diffusionsrichtung.

Durch experimentelle Versuche (Auftrennen in Schichtproben, Anbringen von Sensoren über den Probenquerschnitt, Neutronenradiographie und atmosphärische Rasterelektronenmikroskopie) werden die Feuchtebewegung und -verteilung über den Probenquerschnitt ermittelt.

Simulation des Feuchtetransportes:

- Simulation des Feuchtetransportes an den verschieden ausgestalteten Brettschichtholz- und Verbundplattenproben und anschliessende Validierung der Modelle durch experimentelle Arbeiten.
- Simulation verschiedener Spezialfälle wie z.B. Vorhandensein von Dampfsperren (dampfdichte Klebfugen)

Die erhaltenen Daten über den Feuchtetransport sollen zur Entwicklung optimierter Klebstoff - Holz - Systeme beitragen.

6 Literaturverzeichnis

- Allenspach, K. (2004). "Wärmedämmstoffe auf Holzfaserbasis. Eine Literaturübersicht." Int. Bericht ETHZ/lfb-HP Nr. 25: 83.
- Bader, H. (2005). "Etude visant à améliorer les propriétés des panneaux en bois massif multicouches en optimisant leur constitution." Travail de Diplôme: 66.
- Bobran, H. (1982). "Handbuch der Bauphysik. Schallschutz, Raumakustik, Wärmeschutz, Feuchtigkeitsschutz." 5. neubearbeitete Auflage, Braunschweig, Wiesbaden: F. Vieweg & Sohn: 341.
- Bösch, H. (1999). "Fassadenbekleidung aus unbehandeltem Holz." Lignatec 8/1999: 28.
- Cammerer, J. S. (1956). "Bezeichnungen und Berechnungsverfahren für Diffusionsvorgänge im Bauwesen." Kältetechnik 8. Jahrgang 11/1956: 339-343.
- Cammerer, W. F. (1970). "Wärmeleitfähigkeit und Diffusionswiderstand von Holzwerkstoffen." Holz als Roh- und Werkstoff 28(11): 420-423.
- Choong, E. T. (1965). "Diffusion Coefficients of Softwood by Steady State and Theoretical Methods." Forest Products Journal, 15: 21-27.
- Comstock, G. L. (1963). "Moisture diffusion coefficients in wood as calculated from adsorption, desorption, and steady state data." Forest Products Journal, 13: 97-103.
- Deppe, H.-J. and K. Ernst (2000). "Taschenbuch der Spanplattentechnik." DWR-Verlag Weinbrenner GmbH & Co., Leinfelden-Echterdingen: 552.
- Devanthier, B. (2005). "Mündliche Mitteilung der Wasserdampfdiffusionskoeffizienten von der IHD-Dresden für diverse Materialien."
- DIN 4108 Teil 4 (1985). "Wärmeschutz im Hochbau - Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte."
- DIN 12491 (1998). "Laborgeräte aus Glas - Vakuum-Exsikkatoren." 4.
- DIN 50011 Teil 11 (1982). "Klimate und ihre technische Anwendung - Klimaprüfeinrichtungen - Allgemeine Begriffe und Anforderungen." 3.
- DIN 52182 (1976). "Prüfung von Holz - Bestimmung der Rohdichte." 3.
- DIN 52183 (1977). "Prüfung von Holz - Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes." 2.
- DIN 52615 (1987). "Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen." 1-5.

- DIN EN ISO 9346 (1996). "Wärmeschutz - Stofftransport - Physikalische Grössen und Definitionen."
- DIN EN ISO 12572 (2001). "Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit." 26.
- Frühwald, A. (1973). "Ein Beitrag zur Kenntnis des diffusionstechnischen Verhaltens von Furnierplatten und kunstharzbeschichtetem Holz." Dissertation Universität Hamburg: 137.
- Gösele, K., W. Schüle, et al. (1997). "Schall, Wärme, Feuchte: Grundlagen, neue Erkenntnisse und Ausführungshinweise für den Hochbau." 10. Auflage Wiesbaden, Berlin: Bauverlag: 303.
- Hering, E., R. Martin, et al. (2002). "Physik für Ingenieure." 8. Auflage Berlin: Springer: 744.
- Horn, J. (1969). "Untersuchungen über die Wasserdampfdiffusion durch Holzspanplatten in Abhängigkeit von einigen technologischen und klimatischen Einflussfaktoren." Dissertation Universität Hamburg: 146.
- Jensen, U. and R. Emmeler (1996). "Diffusion resistance of MDF and particelboard." Proc. International COST 508 Wood Mechanics Conference, Stuttgart, Germany, May 14-16: 345-352.
- Kiessel, K. and U. Möller (1989). "Zur Berechnung des Feuchteverhaltens von Bauteilen aus Holz und Holzwerkstoffen." Holz als Roh- und Werkstoff 47/(1989): 317-322.
- Kisseloff, P. (1969). "Feuchtigkeitsbewegung und Wärmeleitung in Holz." Holz als Roh- und Werkstoff 27(7): 245-253.
- Kober, A. and B. Plinke (1989). "Feuchtemessung an Holz, Holzwerkstoffen und Baustoffen. Eine Literaturübersicht." Frauenhofer-Arbeitsgruppe für Holzforschung Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI) WKI-Bericht Nr. 21: 118.
- Kollmann, F. and G. Höcke (1962). "Kritischer Vergleich einiger Bestimmungsverfahren der Holzfeuchtigkeit." Holz als Roh- und Werkstoff 20,12: 461-473.
- Krischer, O. (1963). "Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik." Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg.
- Kronoply (2006). "Handbuch für den Holzrahmenbau. Nachschlagewerk." Teil A, Kronoply OSB; Teil B, Kronotec MDF: 1-6/1-8.
- Kübler, H. (1968). "Praktische Hinweise zur Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes von Holz." Kompendium Holz Kapitel 102: 642-665.
- Lutz, P., R. Jenisch, et al. (1994). "Lehrbuch der Bauphysik: Schall, Wärme, Feuchte, Licht, Brand, Klima." 3. Auflage Stuttgart: B. G. Teubner: 624.

- Merz, K., J. Fischer, et al. (1997). "Holzprodukte für den statischen Einsatz." Lignatec 5/1997 Teil 1 Plattenförmige Holzprodukte: 28.
- Niemz, P. (1993). "Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe." Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag: 243.
- Popper, R., P. Niemz, et al. (2002). "Diffusionsvorgänge in Holzbauplatten unter stationären Bedingungen / Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit in Trocken- und Nassbe- reichverfahren." Int. Bericht ETHZ/HW-HP-LZfP Nr. 8: 33.
- Popper, R., P. Niemz, et al. (2004). "Wasserdampf-Diffusionswiderstand ausgewählter Holz- werkstoffe." Int. Bericht ETHZ/lfb-HP Nr. 23: 11.
- Radovic, R., P. Cheret, et al. (1997). "Holzhandbuch." Reihe 4 Baustoffe. Teil 4 Holzwerk- stoffe. Folge 1, konstruktive Holzwerkstoffe. Informationsdienst Holz.
- Schirmer, R. (1938). "Die Diffusionszahl von Wasserdampf-Luft-Gemischen und die Ver- dampfungsgeschwindigkeit." Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure VDI. Bei- heft Verfahrenstechnik 6: 170-177.
- Seiffert, K. (1974). "Wasserdampfdiffusion im Bauwesen. Ein Leitfaden zur Verhütung von Bauschäden durch diffusionstechnisch einwandfreie Baukonstruktionen." 2. Auflage, Wiesbaden, Berlin Bauverlag: 214.
- Siau, J. F. (1984). "Transport process in wood." Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Sprin- ger-Verlag: 245.
- Stamm, A. J. and N. C. Raleigh (1967). "Movement of Fluids in Wood - Part II: Diffusion." Wood Science and Technology 1: 205-230.
- Vanek, M. and A. Teischinger (1987). "Eignung verschiedener Auftrennmethoden zur Be- stimmung eines Feuchtegradienten im Holz nach der Darmmethode." Holzforschung und Holzverwertung 39/1987: 5-8.
- Vanek, M. and A. Teischinger (1989). "Diffusionskoeffizienten und Diffusionswiderstands- zahlen von verschiedenen Holzarten." Holzforschung und Holzverwertung 1/1989: 3- 6.
- Voigt, H., O. Krischer, et al. (1940). "Die Feuchtigkeitsbewegung bei der Verdunstungstrock- nung von Holz." Holz als Roh- und Werkstoff 3(10): 305-321.
- Wagenführ, R. (1996). "Holzatlase." 4. Auflage Fachbuchverlag Leipzig: 688.
- Wang, X. and P. Niemz (2002). "Untersuchungen zur Bestimmung der Wasseraufnahmekoeff- fizienten von Holz in den drei Hauptschnittrichtungen." Holz 1/2002: 32.
- Willeitner, H. and E. Schwab (1981). "Holz- Aussenverwendung im Hochbau. Beanspru- chungsverhältnisse, Geeignete Holzarten, Richtige Konstruktionen, Wirksamer Schutz, Einschlägige Vorschriften." Alexander Koch GmbH: 148.