

Feuchteverformung von Holzbauplatten entlang der Sorptionsisotherme

Report**Author(s):**

Popper, Rudolf; Niemz, Peter; Eberle, G.

Publication date:

2002

Permanent link:

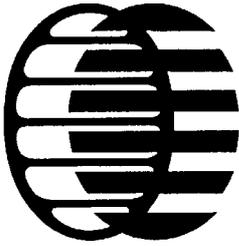
<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004894901>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Originally published in:

Int. Bericht ETHZ/HW-HP-LZfP 4



Professur Holzwissenschaften
Eidgenössische Technische Hochschule
ETH Zentrum
CH-8092 Zürich

Int. Bericht ETHZ/HW-HP-LZfP Nr. 4

**Feuchteverformung von Holzbauplatten entlang der
Sorptionsisotherme**

R. POPPER, P. NIEMZ, G. EBERLE

Zürich, 16. Februar 2002

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Material	4
2.1	Massivholzplatten.....	4
3	Begriffe und Methoden	7
3.1	Die rel. Luftfeuchtigkeit.....	7
3.2	Die Klimabedingungen.....	7
3.3	Rohdichte	8
3.4	Feuchtigkeitsgehalt.....	9
3.5	Feuchteverformung	9
3.5.1	Das maximale lineare Quellmass.....	9
3.5.2	Differentielle Quellung.....	10
3.6	Wasserdampfsorption.....	11
4	Resultate und Diskussion	12
4.1	Sorptionseigenschaften.....	12
4.2	Feuchteverformung	18
4.2.1	Die lineare Quellung entlang der Sorptionsisotherme	18
4.2.2	Die Dickenquellung als Funktion der Anzahl von Leimschichten pro Plattendicke.....	25
4.2.3	Die differentielle Dickenquellung.....	28
4.3	Rohdichte	29
4.4	Feuchtigkeitsgehalt.....	30
5	Schlussfolgerungen	31
5.1	Gleichgewichtsfeuchtigkeit	31
5.2	Normal- und Darr-Rohdichte.....	31
5.3	Sorptionseigenschaften.....	31
5.4	Lineare Quellung.....	32
5.5	Differentielle Quellung.....	32
6	Literatur	33
7	Anhang	34

1 Einleitung

Die Zellwand der Lignozellulosen besteht vorwiegend aus Polymerverbindungen, die Hydroxyl- oder andere sauerstoffhaltige, wasseranziehende Molekülgruppen (z.B. Karbonyl- oder Karboxylgruppen) enthalten. Bei der Interaktion zwischen Lignozellulosen und Wasser (bei Sorption des Wassers) steigt das Lignozellulosenvolumen. Die Lignozellulosen quellen. Der umgekehrte Vorgang (bei Desorption des Wassers) wird als Schwindung bezeichnet.

Das Holz verformt sich bei Aufnahme oder Abgabe von Feuchtigkeit in den drei anatomischen Hauptrichtungen (Tangential-, Radial-, Axialrichtung) ungleich. Somit verhält sich das Holz in bezug auf die Feuchteverformung anisotrop. Die Feuchteverformungsanisotropie wirkt sich in der Praxis für die Verwendbarkeit des Holzes nachteilig aus.

Eine der Methoden die Feuchteverformungsstabilität der Holzbauplatten zu erhöhen ist das Aneinanderkleben von Holzlamellen in einer Art, dass sich die Holzanisotropie gegenseitig wenigstens teilweise aufhebt. So werden in der Holzindustrie Massivholzplatten verschiedensten Dicken mit unterschiedlichsten Lamellenanordnungen hergestellt.

Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist es das Feuchteverformungsverhalten der Holzbauplatten in gesamten hygroskopischen Bereich zu bestimmen und zu qualifizieren.

2 Material

2.1 Massivholzplatten

Die Platten haben kreuzweise übereinander geschichtete und verleimte Lamellen, deren Faserrichtung im rechten Winkel zueinander stehen. Da die Faserrichtung der beiden Decklagen in die gleiche Richtung zeigen muss, ergibt sich immer ein ungerades Lamellenverhältnis. Je nach Jahrringstellung der Mittellagen gegenüber den Decklagen ergibt sich entweder eine parallele oder eine senkrechte Anordnung (siehe Abbildungen im Anhang).

Die Untersuchungen wurden an folgenden Plattenarten vorgenommen, wobei pro Plattenart zehn folgenden Versuchsproben verwendet wurden:

- Industriell gefertigte, dreischichtige Massivholzplatten aus Fichtenholz mit dem Lamellenverhältnis von 20 –20 – 20 mm und einer parallelen Anordnung der Mittellamelle (Plattenbezeichnung MHP-3-60P, siehe Tabelle 2-1). Für die Verklebung der Lamellen wurde PUR-Klebstoff verwendet.
- Industriell gefertigte, dreischichtige Massivholzplatten aus Fichtenholz mit dem Lamellenverhältnis von 20 –20 – 20 mm und einer senkrechten Anordnung der Mittellamelle (Plattenbezeichnung MHP-3-60S, siehe Tabelle 2-1). Für die Verklebung der Lamellen wurde PUR-Klebstoff verwendet.
- Industriell gefertigte, dreischichtige Massivholzplatten aus Fichtenholz mit dem Lamellenverhältnis von 10 –10 – 10 mm und einer parallelen Anordnung der Mittellamelle (Plattenbezeichnung MHP-3-30P, siehe Tabelle 2-1). Für die Verklebung der Lamellen wurde PUR-Klebstoff verwendet.
- Industriell gefertigte, dreischichtige Massivholzplatten aus Fichtenholz mit dem Lamellenverhältnis von 10 –10 – 10 mm und einer senkrechten Anordnung der Mittellamelle (Plattenbezeichnung MHP-3-30S, siehe Tabelle 2-1). Für die Verklebung der Lamellen wurde PUR-Klebstoff verwendet.
- Industriell gefertigte, dreischichtige, melamin-beschichtete (Deckschicht), 27 mm dicke Massivholzplatten aus Fichtenholz in einer parallelen Anordnung der Mittellamelle gegenüber der Decklage (Plattenbezeichnung MHP-3-27P, siehe Tabelle 2-1). Das Lamellenverhältnis betrug 6-15-6 mm. Die Mittellamelle ist

geschlitzt (siehe Abbildung 7-1 im Anhang). Die Proben wurden mit Melaminharz-Klebstoff verklebt (Mittellage).

- Industriell gefertigte, dreischichtige, mit Melaminharz beidseitig beschichtete (Deckschicht), 27 mm dicke Massivholzplatten aus Fichtenholz und einer senkrechten Anordnung der Mittellamelle gegenüber der Decklage (Plattenbezeichnung MHP-3-27S, siehe Tabelle 2-1). Das Lamellenverhältnis betrug 6-15-6 mm. Die Mittellamelle ist geschlitzt (siehe Abbildung 7-1 im Anhang). Die Proben wurden mit Melaminharz-Klebstoff verklebt (Mittellage).
- Industriell gefertigte, dreischichtige, 60 mm dicken Massivholzplatten aus Fichtenholz und einer paralleler Anordnung der mittleren Lamelle gegenüber der Decklage (Plattenbezeichnung MHP-3-60AP siehe Tabelle 2-1). Das Lamellenverhältnis betrug 10-40-10. Die Proben wurden mit Melaminharz-Klebstoff verklebt.
- Industriell gefertigte, dreischichtige, 60 mm dicken Massivholzplatten aus Fichtenholz und einer senkrechten Anordnung der mittleren Lamelle gegenüber der Decklage (Plattenbezeichnung MHP-3-60AS siehe Tabelle 2-1). Das Lamellenverhältnis betrug 10-40-10. Die Proben wurden mit Melaminharz-Klebstoff verklebt.
- Industriell gefertigte, fünfschichtige, 60 mm dicken Massivholzplatten aus Fichtenholz und einer parallelen Anordnung der Lamelle 2 und 4 gegenüber den Lamellen 1, 3 und 5. Das Lamellenverhältnis betrug 12-12-12-12-12 mm (Plattenbezeichnung MHP-5-60P, siehe Tabelle 2-1). Für die Verklebung der Lamellen wurde PUR-Klebstoff verwendet.
- Industriell gefertigte, fünfschichtige, 60 mm dicken Massivholzplatten aus Fichtenholz und einer senkrechten Anordnung der Lamelle 2 und 4 gegenüber den Lamellen 1, 3 und 5. Das Lamellenverhältnis betrug 12-12-12-12-12 mm (Plattenbezeichnung MHP-5-60S, siehe Tabelle 2-1). Für die Verklebung der Lamellen wurde PUR-Klebstoff verwendet.

Tabelle 2-1 Versuchsproben: Bezeichnung, Lamellenverhältnis und Lamellenanordnung

Probe	Plattentyp	Anzahl Schichten	Dicke mm	Lamellenverhältnis	Anordnung	Bemerkung
MHP-3-60P	Massivholzplatten	3	60	20/20/20	parallel	
MHP-3-60S	Massivholzplatten	3	60	20/20/20	senkrecht	
MHP-3-27P	Massivholzplatten	3	27	6/15/6	parallel	beidseitig beschichtet. Mittellamelle geschlitzt
MHP-3-27S	Massivholzplatten	3	27	6/15/6	senkrecht	beidseitig beschichtet. Mittellamelle geschlitzt
MHP-3-30P	Massivholzplatten	3	30	10/10/10	parallel	
MHP-3-30S	Massivholzplatten	3	30	10/10/10	senkrecht	
MHP-3-60AP	Massivholzplatten	3	60	10/40/10	parallel	
MHP-3-60AS	Massivholzplatten	3	60	10/40/10	senkrecht	
MHP-5-60P	Massivholzplatten	5	60	12/12/12/12/12	parallel	
MHP-5-60S	Massivholzplatten	5	60	12/12/12/12/12	senkrecht	

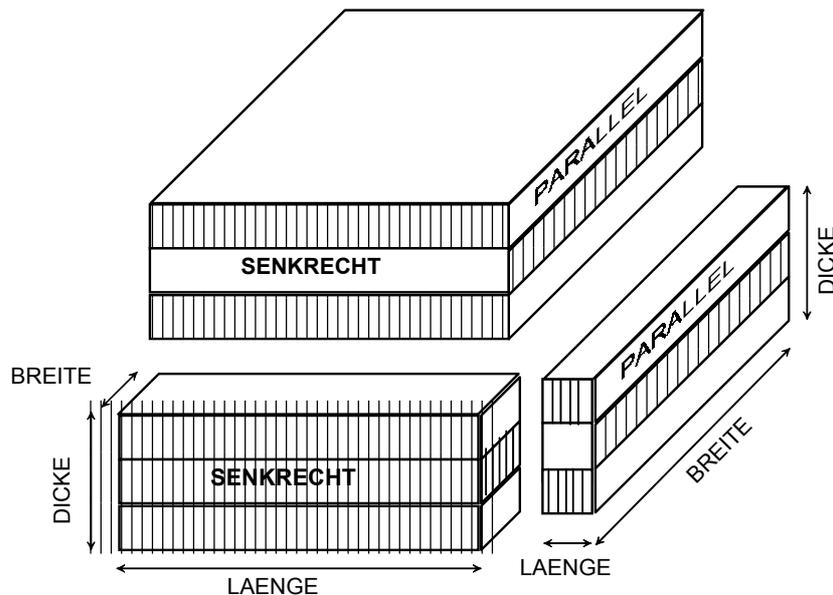


Abbildung 2-1 Schema der Bemessung am Beispiel von 3-schichtigen Massivholzplatten

Als senkrechte Versuchsprobe wurde diejenige Probe bezeichnet, in deren Plattendicke Jahre der Decklage senkrecht zu der Leimfuge verlaufen (siehe Bild 2-1). Als parallele Versuchsprobe wurde diejenige Probe definiert, in deren Plattendicke Jahre der Decklage parallel zu der Leimfuge verlaufen (siehe Bild 2-1).

3 Begriffe und Methoden

3.1 Die rel. Luftfeuchtigkeit

Die relative Luftfeuchtigkeit ϕ ist definiert als Verhältnis des tatsächlich vorhandenen Dampfdrucks p_D zum Sättigungsdruck p_s bei gleicher Temperatur.

Gleichung 3-1

$$\phi = \frac{p_D}{p_s} \cdot 100 \text{ in (\%)},$$

wobei p_D Partialdruck des Wasserdampfes,
 p_s Sättigungsdruck.

3.2 Die Klimabedingungen

Die Prüflinge wurden bei einer definierten Temperatur verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten solange ausgesetzt, bis das Gleichgewicht erreicht wurde, und anschliessend der jeweilige Feuchtegehalt der Proben bestimmt. Tabelle 3-1 zeigt die ausgewählten Klimate für die Feuchteverformungs- sowie für die Sorptionsmessungen und ihre Erzeugung. Für das Normklima nach DIN 50 014 diente der Klimaraum, die anderen Klimate wurden in speziellen Behältern durch gesättigte wässrige Salzlösungen hergestellt, wobei hier der Klimaraum lediglich für die Temperaturkonstanz sorgte. Die Luftzirkulation in den Behältern wurde mit einem Ventilator bewerkstelligt. Damit er nicht unnötig Wärme an den Behälter abgibt, wurde dieser mit Hilfe eines Zeitschalters im Intervall von 15 Minuten ein- und ausgeschaltet. Für die Ermittlung des Versuchsklimas sorgte ein Klimasensor, bei dem die rel. Luftfeuchtigkeit mittels eines elektrolytischen Widerstandselements und die Temperatur mittels eines NTC-Widerstands gemessen werden. Das hygrometrische Messelement ermöglicht eine relative Feuchtigkeitsmessung in Bereich zwischen 5% und 95%. Für den Messwert bei der rel. Luftfeuchtigkeit von 0% wurde der Darrzustand verwendet. Die Prüfkörper wurden bei den jeweiligen Klimabedingungen solange klimatisiert, bis die Massekonstanz erreicht wurde. Die Massekonstanz gilt als erreicht, wenn die Ergebnisse zweier im Abstand von 24 Stunden aufeinanderfolgender Messungen um nicht mehr als 0.1% der Prüfkörpermasse voneinander abweichen.

Als Bezugsmasse für die Bestimmung der Materialfeuchte wurde die Darrmasse benutzt.

Tabelle 3-1 Die verwendeten Klimate und ihre Erzeugung

Klimaerzeugung	rel. Luftfeuchtigkeit (%)	Temperatur (°C)
Darrtrocknung	0	105
LiCl	11	20
K ₂ CO ₃	44	20
Klimaraum/Normalklima	65	20
NaCl	75	20
NH ₄ H ₂ PO ₄	93	20

3.3 Rohdichte

Die Rohdichte von Holz ρ ist der Quotient aus der Masse m und dem Volumen V der Probe einschliesslich des Porenvolumens. Da die Rohdichte des Holzes vom Feuchtigkeitsgehalt abhängt, ist der Feuchtigkeitsgehalt zum Zeitpunkt der Rohdichtebestimmung anzugeben (DIN 52 182, 1976).

Die Rohdichte nach Lagerung im Normalklima (DIN 50 014, 20/65-1) wird als Normal-Rohdichte bestimmt:

Gleichung 3-2

$$\rho_N = \frac{m_N}{V_N} \text{ in g/cm}^3,$$

wobei m_N Masse der normalklimatisierten Probe in g,

V_N Volumen der normalklimatisierten Probe in cm^3 .

Ähnlich gilt für das trockene Holz:

Gleichung 3-3

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \text{ in g/cm}^3,$$

wobei m_0 Masse des darrgetrockneten Holzes in g,

V_0 Volumen des darrgetrockneten Holzes in cm^3 .

Die Versuchsproben werden dem Normalklima ausgesetzt (Normal-Rohdichte), resp. in drei Stufen (40°C, 70°C und 103°C) darrgetrocknet und die Masse mittels einer elektronischen Waage (Mettler AG, Schweiz) bestimmt. Das Einlesen der Massenwerte in einen Computer erfolgt mit dem Programm WAAGMA (POPPER, 1991). Die Abmessungen werden mittels digitaler Messuhr (Digimatic, Mitutoyo, Japan), resp. digitalem Messschieber (Digimatic, Mitutoyo, Japan) auf ± 0.02 mm ge-

nau ermittelt, in einen Datenlogger (Mitutoyo DT10, Japan) eingelesen und mit Hilfe des Programms LOGGMA (POPPER, 1991) in einen Computer übertragen und dort ausgewertet.

3.4 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. Für den Feuchtigkeitsgehalt gilt nach DIN 52 183 (1977):

Gleichung 3-4

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} \cdot 100 \text{ in } \%,$$

wobei m_u Masse der feuchten Probe in g ,

m_0 Masse der wasserfreien (darrtrockenen) Probe in g .

3.5 Feuchteverformung

3.5.1 Das maximale lineare Quellmass

Das maximale Quellmass α_{max} ergibt sich bei Quellung vom darrgetrockneten auf den feuchten Zustand des Materials. Je nach dem für welche Richtung (Dicke D , Breite B und Länge L) und Feuchtigkeitsgehalt u der Versuchsprobe die Ausmassen a ermittelt werden, unterscheidet man zwischen dem dicken α_{Du} , dem breiten α_{Bu} und dem längen α_{Lu} Quellmass:

:

Gleichung 3-5

$$\alpha_{\max, Du} = 100 \cdot \frac{(a_{Du} - a_{D0})}{a_{D0}} \text{ in } \%$$

Gleichung 3-6

$$\alpha_{\max, Bu} = 100 \cdot \frac{(a_{Bu} - a_{B0})}{a_{B0}} \text{ in } \%$$

Gleichung 3-7

$$\alpha_{\max, Lu} = 100 \cdot \frac{(a_{Lu} - a_{L0})}{a_{L0}} \text{ in } \%$$

Das maximale Volumenquellmass α_V wird als Summe aus dickem, breitem und längem maximalen Quellmass definiert:

Gleichung 3-8

$$\alpha_{\max,Vu} = \alpha_{\max,Du} + \alpha_{\max,Bu} + \alpha_{\max,Lu} \text{ in \%}$$

- wobei a_{Du} dicken Abmessung der Platte bei Materialfeuchte u ,
 a_{D0} dicken Abmessung der darrgetrockenen Platte,
 a_{Bu} breiten Abmessung der Platte bei Materialfeuchte u ,
 a_{B0} breiten Abmessung der darrgetrockenen Platte,
 a_{Lu} längen Abmessung der Platte bei Materialfeuchte u ,
 a_{L0} längen Abmessung der darrgetrockenen Platte.

3.5.2 Differentielle Quellung

Die Holzwerkstoffe werden in der Praxis sehr oft nach der differentiellen Quellung q qualifiziert. Diese ist gemäss DIN 52 184 (1979) als das prozentuale Quellmass der Probe je 1% Holzfeuchtigkeitsänderung wie folgt definiert:

Gleichung 3-9

$$q = \frac{a_F - a_T}{a_0 \cdot (u_F - u_T)} \cdot 100,$$

- wobei q die differentielle Quellung in %/%,
 a_F Mass der Probe im feuchten Klima nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes in mm,
 a_T Mass der Probe im trockenen Klima nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes in mm,
 a_0 Mass der Probe im darrtrockenen Zustand in mm,
 u_F Feuchtigkeitsgehalt des Probe im feuchten Klima nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes in %,
 u_T Feuchtigkeitsgehalt des Probe im trockenen Klima nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes in %.

Als feuchtes Klima wurde hier die relative Luftfeuchtigkeit von 93% bei einer Temperatur von 20°C und als trockenes Klima die relative Luftfeuchtigkeit von 44% bei einer Temperatur von 20°C gewählt.

Für die Bestimmung der Feuchteverformung werden die Versuchsproben den genau definierten Klimaten (siehe Tabelle 3.1) bis zum Erreichen der jeweiligen Gleichgewichtsfeuchtigkeit ausgesetzt und anschliessend die Länge, Breite und Dicke der Proben gemäss Bild 2-1 ermittelt. Anschliessend werden die Proben bei $103 \pm 2^\circ\text{C}$, bis zur Gleichgewichtskonstanz getrocknet, wobei diese Temperatur in drei Stufen (40°C, 70°C und 103°C) innerhalb von 48 Stunden allmählich einzu-

stellen ist. Die Abmessungen werden mittels digitalen Messuhren (Digimatic, Mitutoyo, Japan), resp. dem Messschieber (Digimatic, Mitutoyo, Japan) auf ± 0.02 mm genau ermittelt, in einen Datenlogger (Mitutoyo DT10, Japan) eingelesen und mit Hilfe des Programms LOGGMA (POPPER, 1991) in Computer übertragen und dort ausgewertet.

3.6 Wasserdampfsorption

Für die Charakterisierung der Wechselwirkung zwischen dem Versuchsmaterial und dem Wasser, resp. dem Wasserdampf, wurde das Hailwood-Horrobin Sorptionsmodell (1946) verwendet. Das Hailwood-Horrobin Sorptionsmodell (weiter als HH-Sorptionsmodell) basiert auf der Annahme, dass das Wasser bei der Wasserdampfsorption durch Lignocellulosen als einfache Lösung und als Hydrat der Lignocellulosen existiert. Es wird weiter angenommen, dass die sorbierte Schicht, die aus nicht hydratisierten und hydratisierten Lignocellulosen sowie aus freiem flüssigem Wasser besteht, eine ideale feste Lösung bildet. Durch das HH-Modell lassen sich noch weitere Größen schätzen, so die Unzugänglichkeit der sorptiv aktiven Stellen des Sorbens zum Sorbat (Z), ferner das hypothetische Molekulargewicht des Sorbens (M_p). Für die experimentell schwer zu bestimmende Fasersättigungsfeuchtigkeit (U_{FS}) lässt sich eine Schätzgröße errechnen. Weiter wird das monomolekular (U_m) und das polymolekular (U_p) gebundenes Wasser durch das HH-Sorptionsmodell ermittelt. Die Berechnung der aus dem HH-Sorptionsmodell abgeleiteten Größen erfolgte mit dem Computerprogramm HHM28 (Popper, 1982).

4 Resultate und Diskussion

4.1 Sorptionseigenschaften

Die folgenden Abbildungen 4-1 bis 4-10 zeigen die gemessenen, sowie die nach HH-Sorptionsmodell berechneten Isothermen des Versuchsmaterials. In diesen Abbildungen ist zusätzlich die Sorptionsisotherme des Fichtenholzes (Fichte utot) als Bezugsgrösse dargestellt. Bild 4-11 zeigt die nach HH-Sorptionsmodell berechnete Sorptionsisotherme des Fichtenholzes. Dargestellt sind in diesen Abbildungen ebenfalls die Bereiche der Sorbens/Sorbat-Interaktion (Chemi-, Phisorption und die Kapillarkondensation). Jeder Punkt auf der Grafik entspricht einem Mittelwert von 10 Versuchsproben. Die aus dem HH-Sorptionsmodell abgeleiteten physikalischen Grössen sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst.

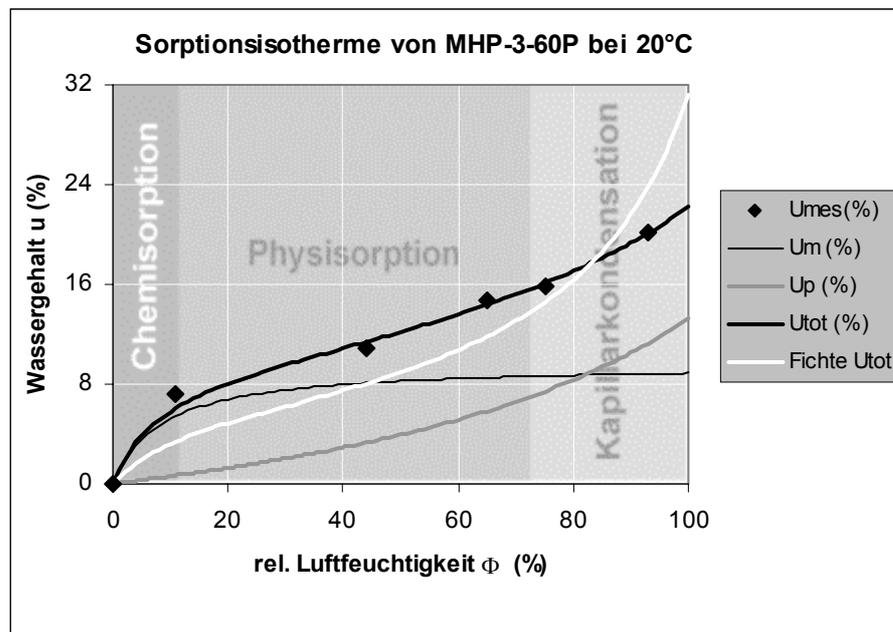


Abbildung 4-1 Sorptionsisotherme von 3-schichtigen (Lamellenverhältnis 20/20/20), 60 mm dicken Massivholzplatten in paralleler Anordnung bei 20°C

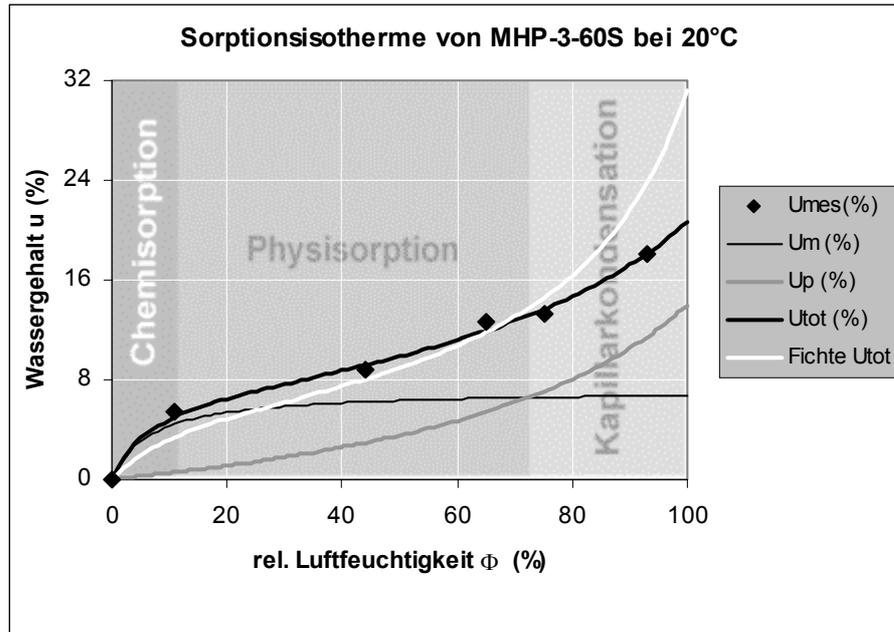


Abbildung 4-2 Sorptionsisotherme von 3-schichtigen (Lamellenverhältnis 20/20/20), 60 mm dicken Massivholzplatten in serieller Anordnung bei 20°C

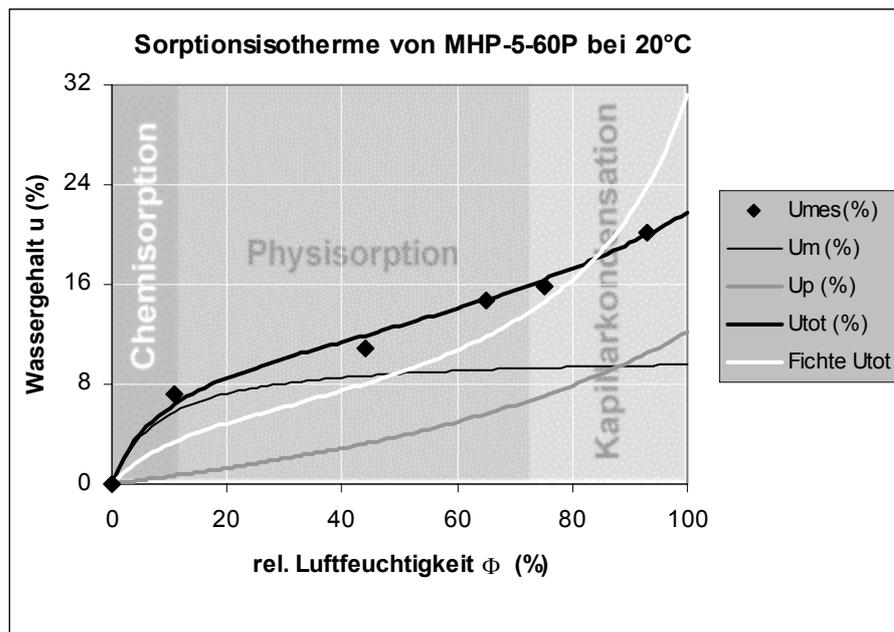


Abbildung 4-3 Sorptionsisotherme von 5-schichtigen (Lamellenverhältnis 12/12/12/12/12), 60 mm dicken Massivholzplatten in paralleler Anordnung bei 20°C

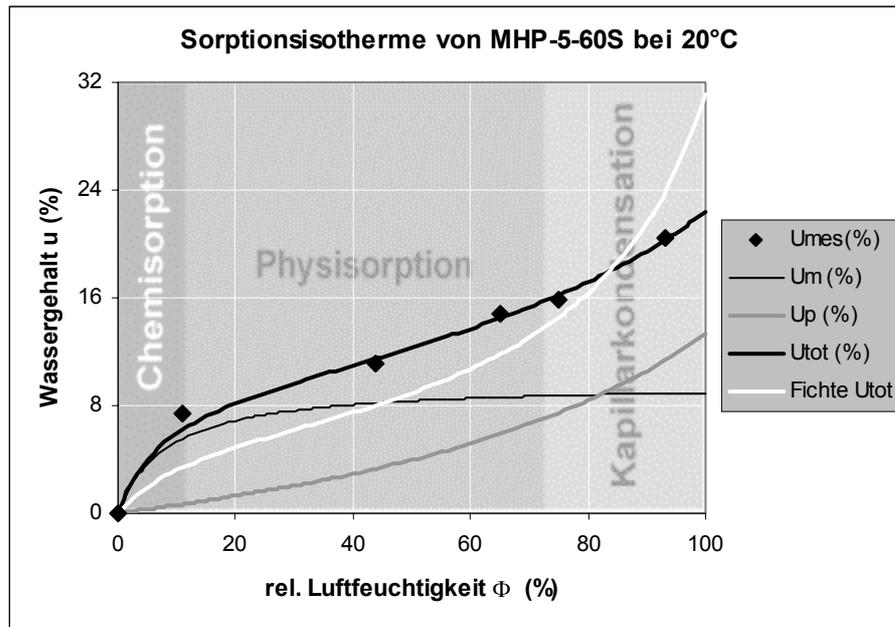


Abbildung 4-4 Sorptionsisotherme von 5-schichtigen (Lamellenverhältnis 12/12/12/12/12), 60 mm dicken Massivholzplatten in senkrechter Anordnung bei 20°C

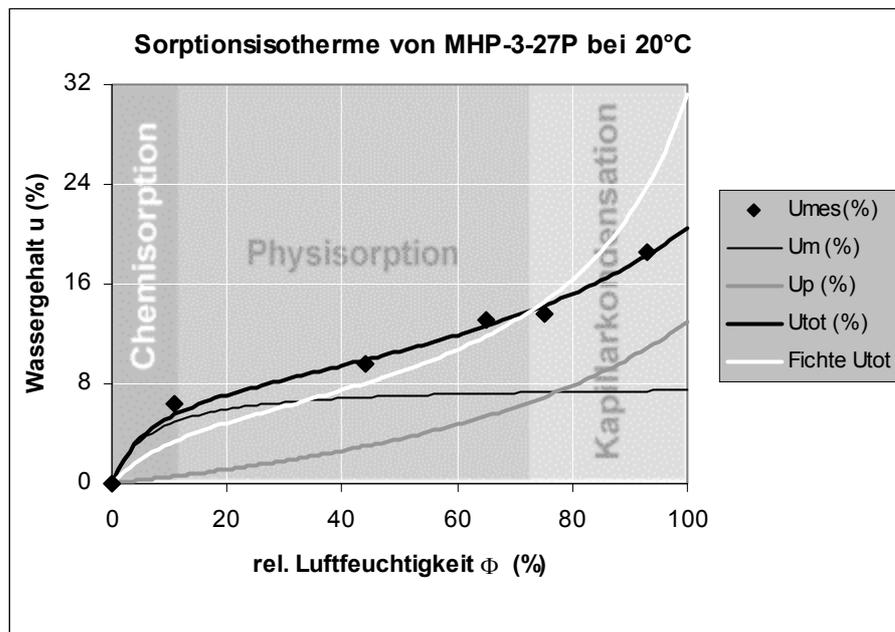


Abbildung 4-5 Sorptionsisotherme von 3-schichtigen (Lamellenverhältnis 6/15/6), 27 mm dicken beidseitig mit Melaminharz beschichteten Massivholzplatten in paralleler Anordnung bei 20°C

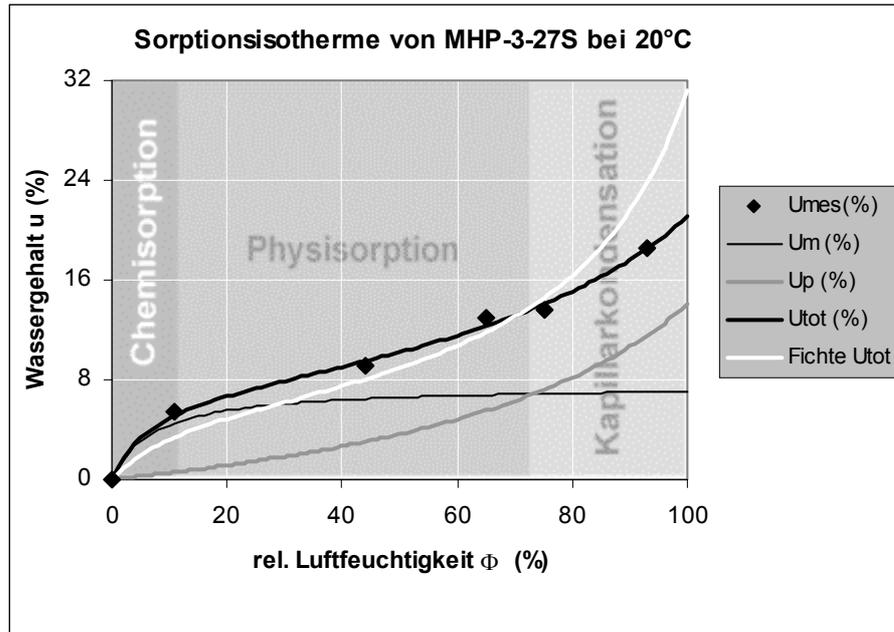


Abbildung 4-6 Sorptionsisotherme von 3-schichtigen (Lamellenverhältnis 6/15/6), 27 mm dicken beidseitig mit Melaminharz beschichteten Massivholzplatten in serieller Anordnung bei 20°C

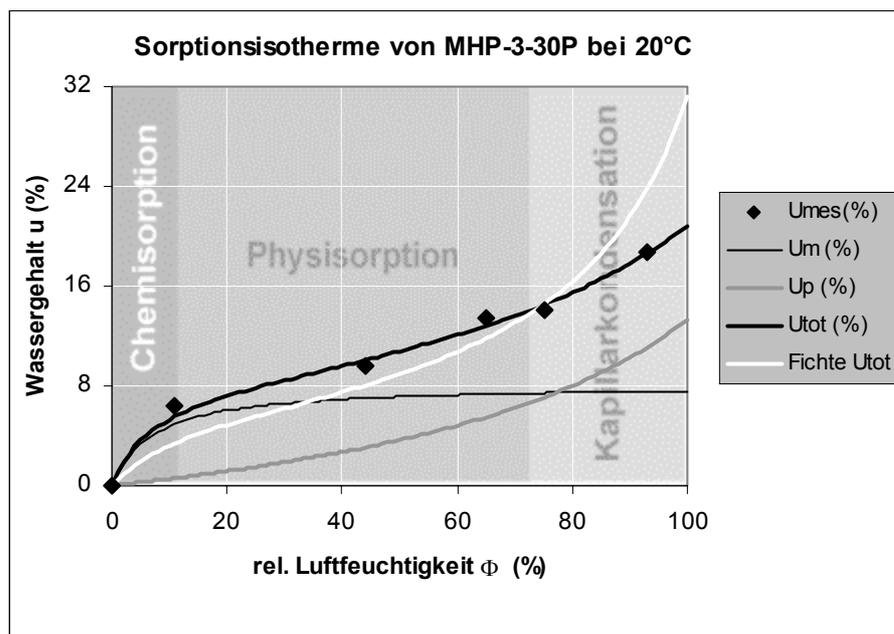


Abbildung 4-7 Sorptionsisotherme von 3-schichtigen (Lamellenverhältnis 10/10/10), 30 mm dicken Massivholzplatten in paralleler Anordnung bei 20°C

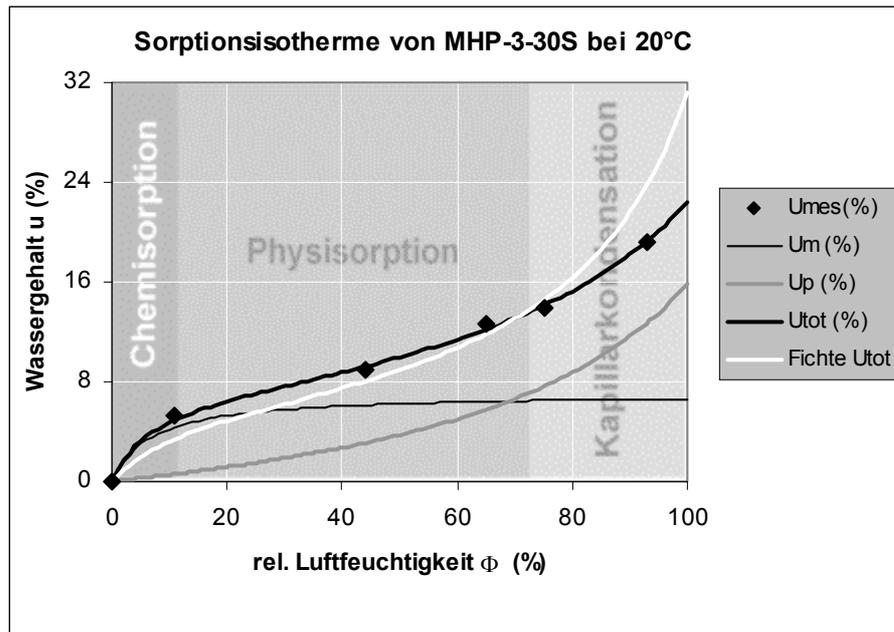


Abbildung 4-8 Sorptionsisotherme von 3-schichtigen (Lamellenverhältnis 10/10/10), 30 mm dicken Massivholzplatten in serieller Anordnung bei 20°C

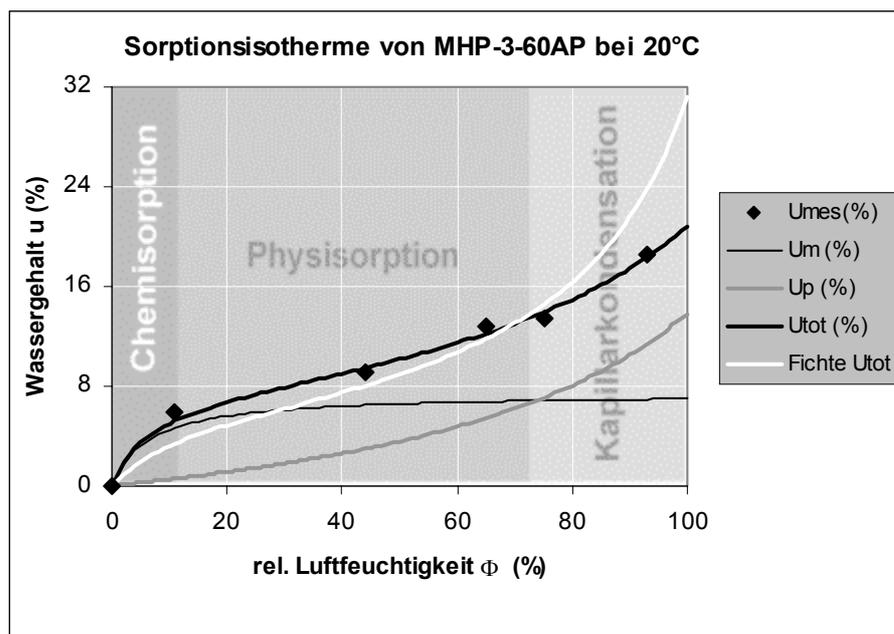


Abbildung 4-9 Sorptionsisotherme von 3-schichtigen (Lamellenverhältnis 10/40/10), 60 mm dicken Massivholzplatten in paralleler Anordnung bei 20°C

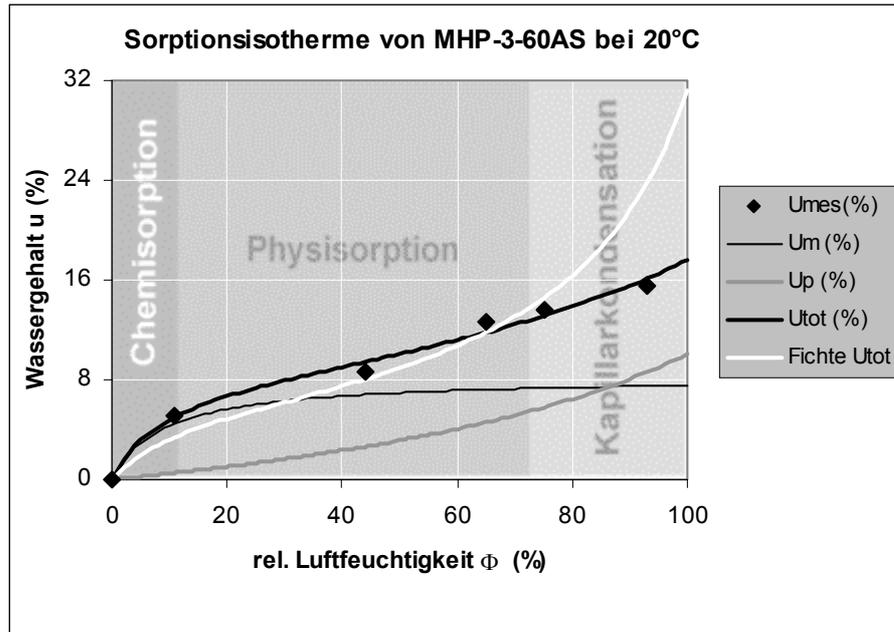


Abbildung 4-10 Sorptionsisotherme von 3-schichtigen (Lamellenverhältnis 10/40/10), 60 mm dicken Massivholzplatten in serieller Anordnung bei 20°C

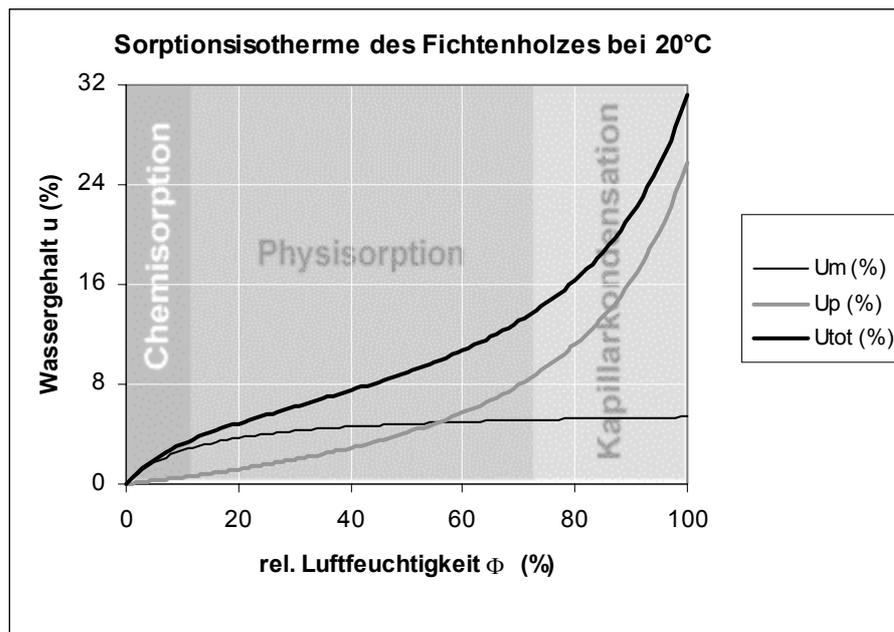


Abbildung 4-11 Sorptionsisotherme des Fichtenholzes bei 20°C

Legende:

- Ugem ... gemessener Wassergehalt der Proben beim rel. Dampfdruck ϕ in %,
- Um berechneter Wassergehalt in der monomolekularen Schicht beim rel. Dampfdruck ϕ in %,
- Up berechneter Wassergehalt in der polymolekularen Schicht beim rel. Dampfdruck ϕ in %,
- Utot berechneter Wassergehalt bei Fasersättigung ($\phi = p/p_s=100\%$) in %.

Tabelle 4-1 Konstanten und berechnete Werte der Sorptionsanalyse nach dem Hailwood-Horrobin Modell

Probe	α -Koeff.	β -Koeff.	A-Koeff.	Σ m ² /g	Z %	Mp	U _{FS}	U _P	U _M
MHP-3-27P	0.0062	24.0742	0.8066	265	28.23	226	20.49	13.01	7.47
MHP-3-27S	0.0065	20.9913	0.9262	249	32.02	238	21.06	14.03	7.04
MHP-3-30P	0.0062	22.8545	0.8315	269	26.82	221	20.86	13.27	7.60
MHP-3-30S	0.0069	21.0972	0.9246	235	36.16	254	22.43	15.79	6.64
MHP-3-60P	0.0058	20.5413	0.8312	315	13.34	187	22.18	13.30	8.88
MHP-3-60S	0.0066	22.4021	0.9005	239	35.29	250	20.69	13.96	6.73
MHP-3-60AP	0.0065	23.5380	0.8419	248	32.98	242	20.82	13.83	6.99
MHP-3-60AS	0.0055	19.9043	1.0569	267	25.94	219	17.60	10.06	7.54
MHP-5-60P	0.0054	21.2441	0.8006	339	6.41	173	21.77	12.21	9.56
MHP-5-60S	0.0058	21.0847	0.8069	318	12.78	186	22.34	13.38	8.96
Fichtenholz	0.0081	9.7036	1.9066	190	45.55	298	31.16	25.79	5.37

Die Abbildungen 4-1 bis 4-10 zeigen eine ausgezeichnete Uebereinstimmung der Messwerte mit den durch das Hailwood-Horrobin Modell berechneten Isothermen. Wie aus der Tabelle 4-1 ersichtlich ist besteht kein relevanten Unterschied zwischen den Sorptionseigenschaften der untersuchten Massivholzplatten. Eine tendentielle Erhöhung der Sorbat-Zugänglichkeit von Platten mit parallel angeordneten Lamellen gegenüber denjenigen in der senkrechter Anordnung ist mit Ausnahme von MHP-3-60A Proben zu bezeichnen. Auffallend ist die relativ hohe monomolekulare Bedeckung und die relativ tiefe Fasersättigungsfeuchte aller Versuchsproben in Vergleich zu unbehandeltem Fichtenholz (siehe Abbildungen 4-1 bis 4-11). Dies deutet darauf hin, dass es durch den Herstellungsprozess einerseits zur Erhöhung der Zugänglichkeit des Sorbats zu den sorptiv aktiven Gruppen des Holzes gekommen ist, andererseits wird die innere Struktur des Holzes teilweise durch das Leimmittel verstopft und zusätzlich die Porenstruktur durch prozessbedingte Druck- und Temperaturanwendung verändert. Als Endeffekt der Sorptionsmechanismen ist die Fasersättigungsfeuchte der Platten im Vergleich zum Fichtenholz, der höheren Affinität der sorptiv aktiven Gruppen im Bereich der Chemisorption zum trotz, deutlich herabgesetzt.

4.2 Feuchteverformung

4.2.1 Die lineare Quellung entlang der Sorptionsisotherme

Die Messungen haben gezeigt, dass die Längen- sowie die Breitenquellung gegenüber der Dickenquellung der Massivholzplatten vernachlässigbar klein sind (siehe Tabelle 4-2 und 4-3), sodass die Volumenquellung der Dickenquellung gleichgestellt werden kann. Die folgenden Abbildungen zeigen den Verlauf der linearen Dickenquellung der Massivholzplatten in Bezug auf die Volumenquellung des Fichtenholzes in gesamten im Versuch verwendeten hygroskopischen Bereich einerseits

als Funktion der relativen Luftfeuchtigkeit Φ (Abb. 4-12, 4-13, 4-15, 4-16, 4-18, 4-19, 4-21, 4-22, 4-24, 4-25), andererseits als Funktion der Materialfeuchte u (4-14, 4-17, 4-20, 4-23, 4-26). Jeder Punkt in den Grafiken entspricht einem Mittelwert von 10 Versuchsproben. Die Bilder zeigen, dass das Quellen im Bereich zwischen 0% und etwa 20% Wassergehalt nahezu linear ist und die Beziehung zwischen Quellen und rel. Luftfeuchtigkeit der Sorptionsisotherme annähernd gleichgestellt werden kann. Aus dem Verlauf der Dickenquellung der Massivholzplatten und der Volumenquellung des Fichtenholzes im gesamten hygroskopischen Bereich lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

1. Im unteren Dampfdruckbereich quellen die Massivholzplatten ausnahmslos stärker als das Fichtenholz,
2. Im oberen Dampfdruckbereich zeigen die Massivholzplatten ein geringeres Quellverhalten gegenüber dem Fichtenholz.
3. Parallel zum Sorptionsverhalten zeigen sich die Massivholzplatten dort wo das Wasser an das Material chemisch gebunden ist formunstabiler, hingegen im Dampfdruckbereich wo die Porenstruktur für die Wasseraufnahme massgebend ist dimensionsstabiler gegenüber dem Fichtenholz.

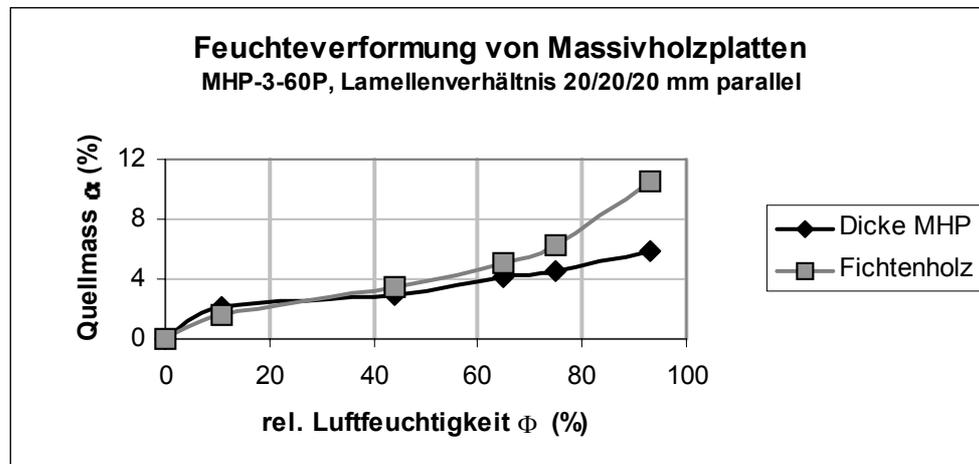


Abbildung 4-12 Feuchteverformung von MHP-3-60P entlang der Sorptionsisotherme

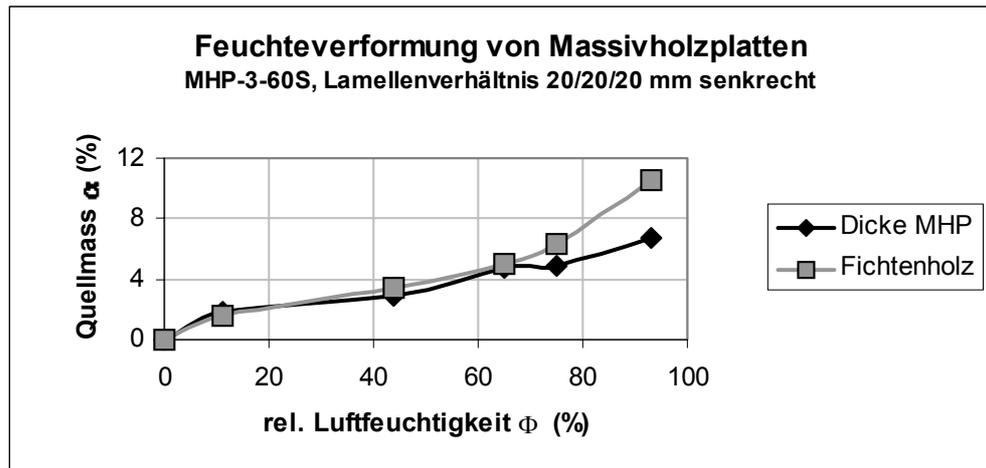


Abbildung 4-13 Feuchteverformung von MHP-3-60S entlang der Sorptionsisotherme

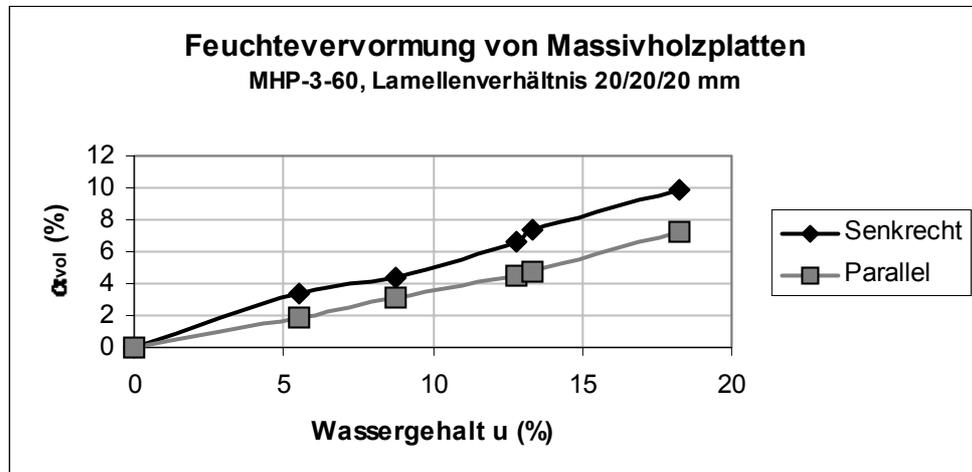


Abbildung 4-14 Feuchteverformung von MHP-3-60 in Abhängigkeit vom Wassergehalt

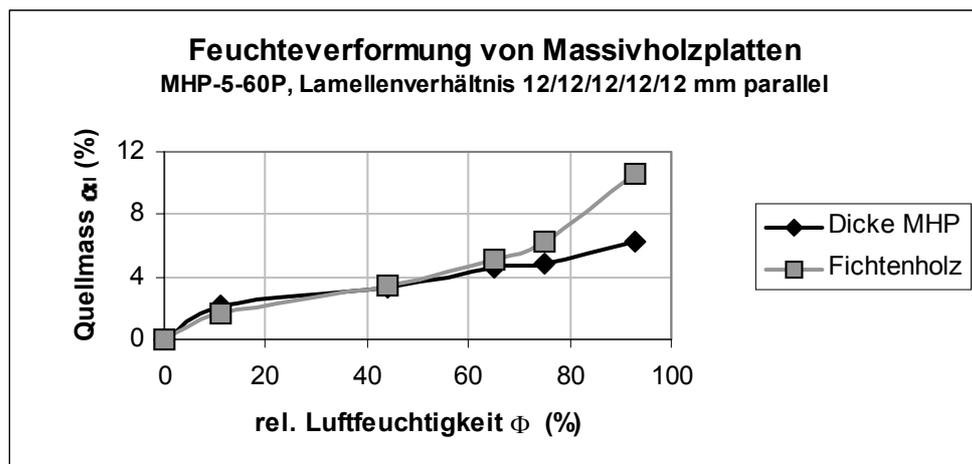


Abbildung 4-15 Feuchteverformung von MHP-5-60P entlang der Sorptionsisotherme

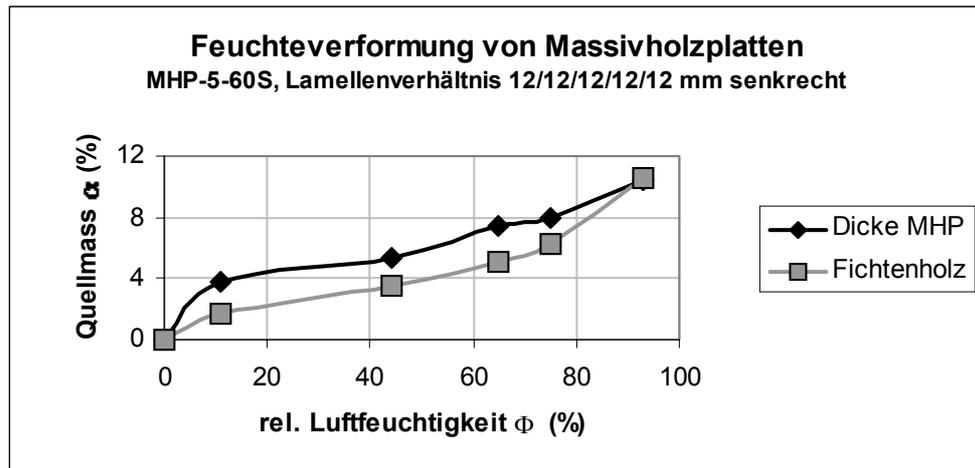


Abbildung 4-16 Feuchteverformung von MHP-5-60S entlang de Sorptionsisotherme

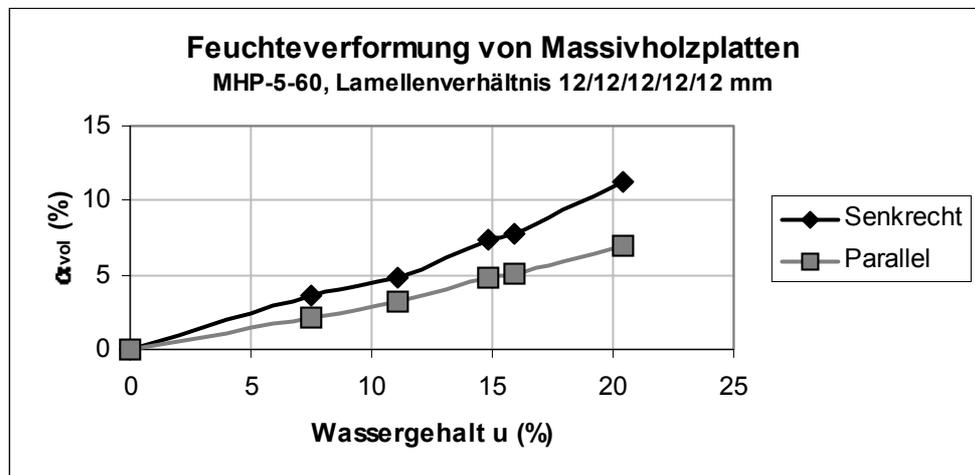


Abbildung 4-17 Feuchteverformung von MHP-5-60 in Abhängigkeit vom Wassergehalt

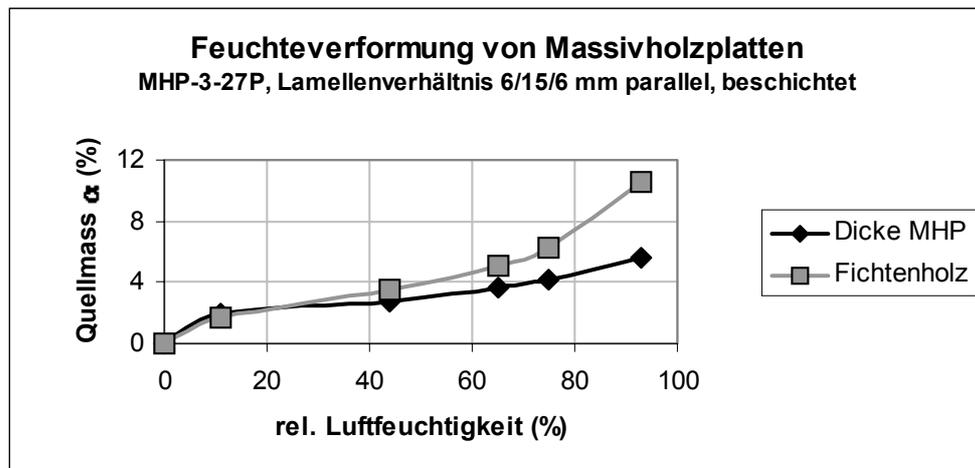


Abbildung 4-18 Feuchteverformung von MHP-3-27P entlang de Sorptionsisotherme

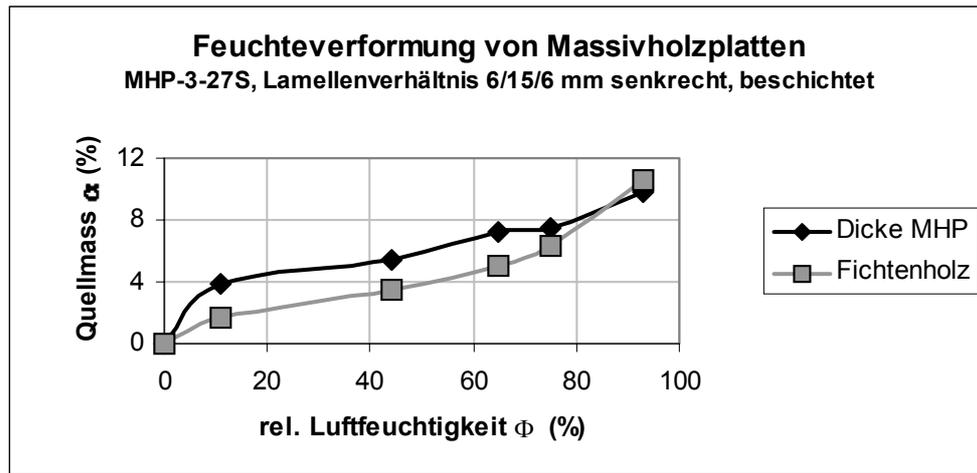


Abbildung 4-19 Feuchteverformung von MHP-3-27S entlang der Sorptionsisotherme

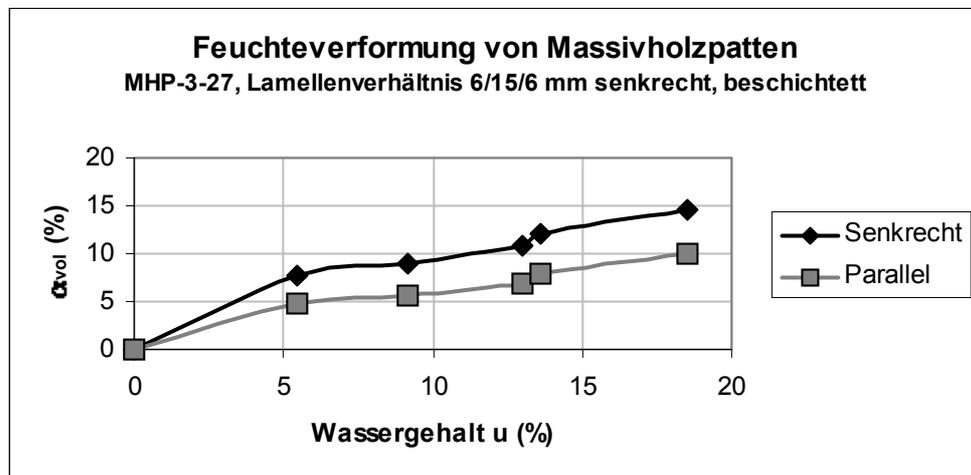


Abbildung 4-20 Feuchteverformung von MHP-3-27 in Abhängigkeit vom Wassergehalt

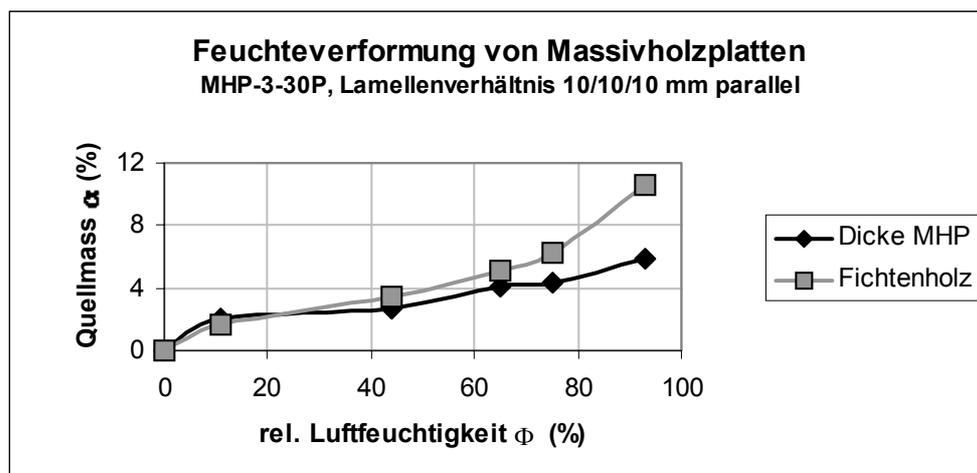


Abbildung 4-21 Feuchteverformung von MHP-3-30P entlang der Sorptionsisotherme

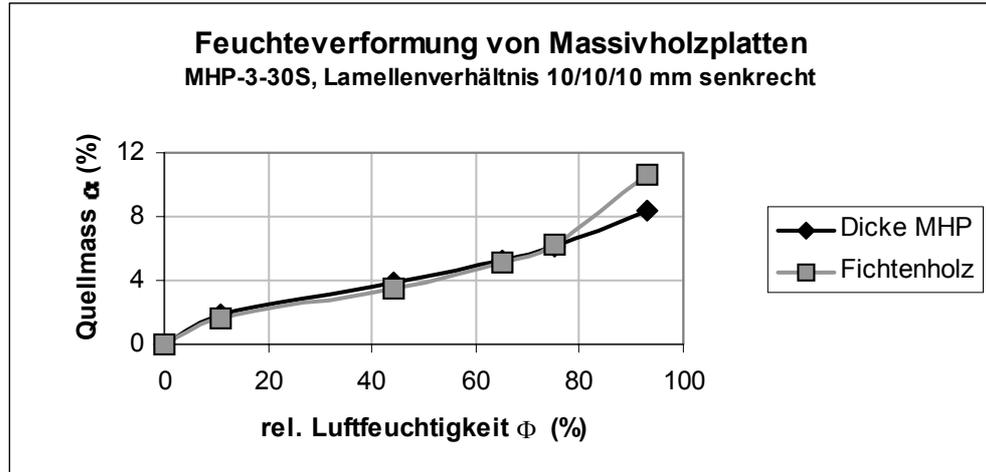


Abbildung 4-22 Feuchteverformung von MHP-3-30S entlang der Sorptionsisotherme

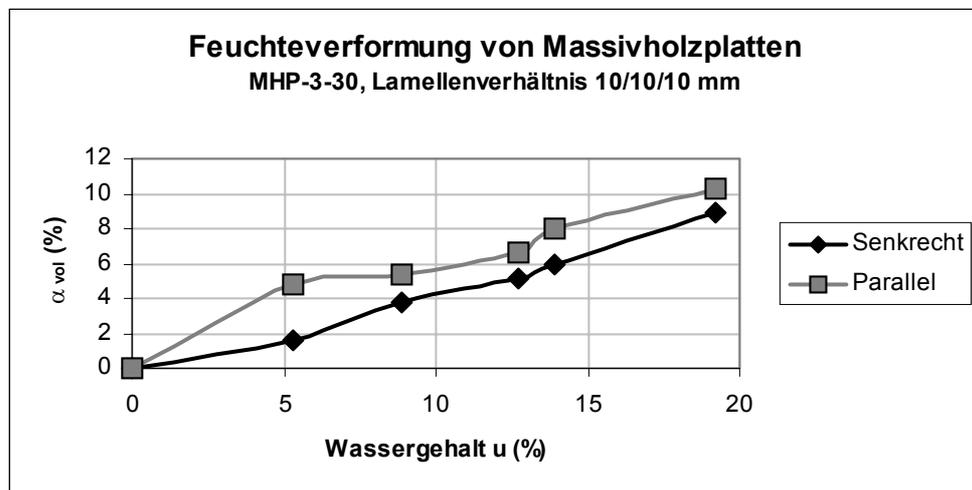


Abbildung 4-23 Feuchteverformung von MHP-3-30 in Abhängigkeit vom Wassergehalt

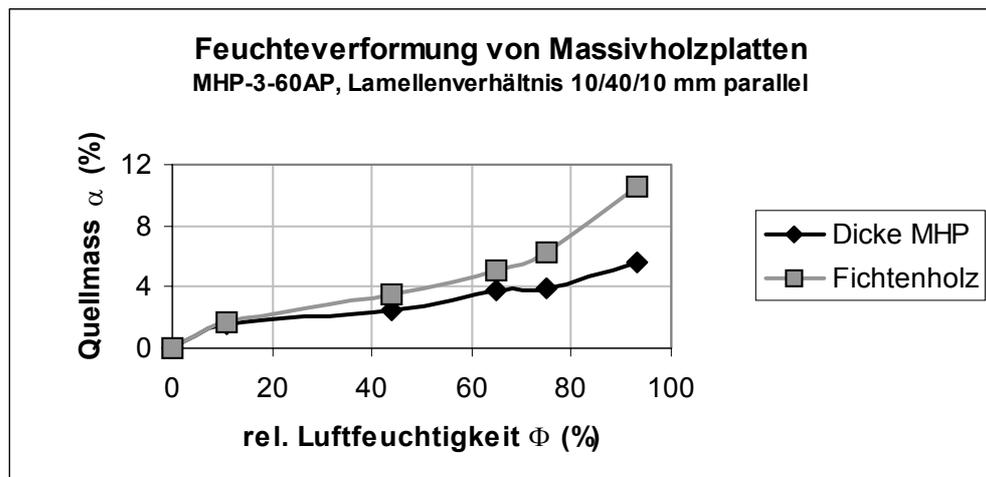


Abbildung 4-24 Feuchteverformung von MHP-3-60AP entlang der Sorptionsisotherme

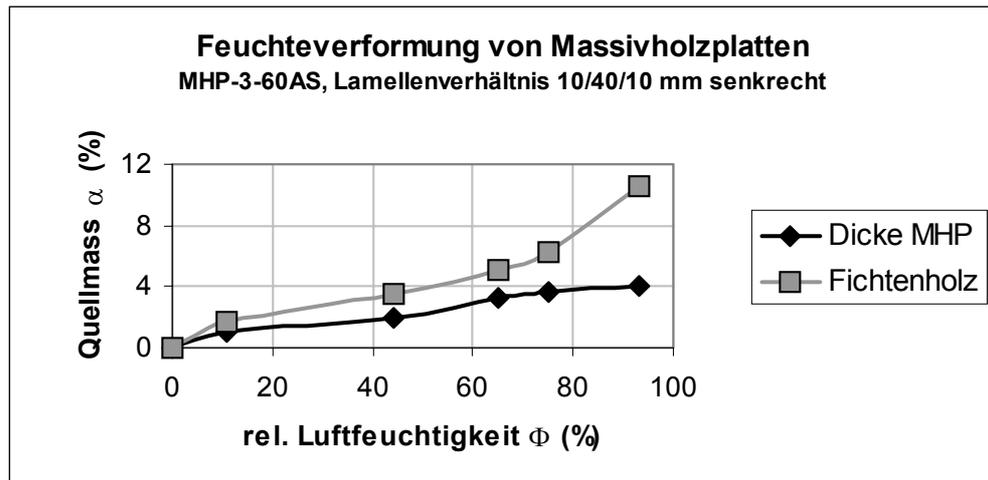


Abbildung 4-25 Feuchteverformung von MHP-3-60AS entlang der Sorptionsisotherme

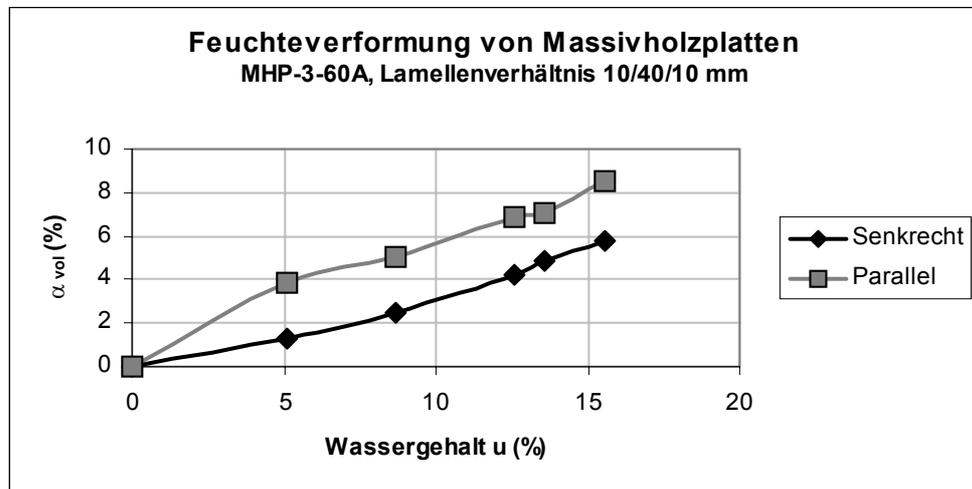


Abbildung 4-26 Feuchteverformung von MHP-3-30 in Abhängigkeit vom Wassergehalt

Tabelle 4-2 Längenquellung α_{Lu} % entlang der Sorptionsisotherme

Probe	rel. Luftfeuchtigkeit Φ (%)				
	11	44	65	75	93
MHP-3-60P	-0.28	0.01	-0.01	-0.06	0.80
MHP-3-60S	0.17	0.31	0.44	0.45	0.74
MHP-5-60P	0.01	-0.17	0.07	0.03	0.47
MHP-5-60S	0.02	0.13	0.21	0.23	0.33
MHP-3-27P	2.70	2.65	2.92	3.38	3.99
MHP-3-27S	0.04	0.16	0.22	0.24	0.31
MHP-3-30P	2.66	2.44	2.26	3.12	3.38
MHP-3-30S	0.05	0.14	0.19	0.22	0.31
MHP-3-60AP	2.09	2.17	2.50	2.53	2.05
MHP-3-60AS	0.03	0.12	0.19	0.20	0.23

Tabelle 4-3 Breitenquellung α_{Bu} % entlang der Sorptionsisotherme

Probe	rel. Luftfeuchtigkeit Φ (%)				
	11	44	65	75	93
MHP-3-60P	0.02	0.17	0.30	0.34	0.50
MHP-3-60S	1.39	1.14	1.36	1.91	2.21
MHP-5-60P	-0.03	0.05	0.10	0.12	0.16
MHP-5-60S	-0.20	-0.61	-0.36	-0.40	0.40
MHP-3-27P	0.09	0.17	0.22	0.25	0.28
MHP-3-27S	3.63	3.20	3.08	4.08	3.99
MHP-3-30P	0.07	0.15	0.23	0.29	0.28
MHP-3-30S	-0.25	-0.23	-0.35	-0.32	0.26
MHP-3-60AP	0.18	0.31	0.46	0.50	0.72
MHP-3-60AS	0.14	0.35	0.78	0.98	1.45

Die Länge- und Breitenfeuchteverformungen der Versuchsproben weisen je nach Platten- und Lamellenanordnungsart an den Stirnflächen plastische Verformungen auf die bei den relativ kleinen Probenabmessungen zu ungewöhnlich hohen Feuchteverformungen geführt haben (siehe Tabellen 4-2 und 4-3 und Abbildungen 7- ... im Anhang). Diese plastische Verformungen werden sich bei den grossen Industriepplatten auf die Längen- und Breitenfeuchteverformung kaum auswirken.

4.2.2 Die Dickenquellung als Funktion der Anzahl von Leimschichten pro Plattendicke

Die folgenden Abbildungen 4-27 bis 4-31 zeigen die Abhängigkeit der Dickenquellung der Versuchsproben von der Anzahl Leimschichten pro Plattendicke. Wie aus diesen Abbildungen hervorgeht steigt die Quellung der Massivholzplatten linear mit der Anzahl Leimschichten pro Plattendicke. Diese Abhängigkeit ist für den untersuchten hygroskopischen Bereich zwischen rel. Luftfeuchtigkeit von 11% bis 93% statistisch gesichert. In Abbildung 4-32 sind diese Abhängigkeiten grafisch zusammengefasst. Je höher das Feuchteklima, desto höher ist auch die Dickenquellung. Aus dieser Abbildung ist weiter ersichtlich, dass die Steigung der Geraden vom Bereich der Chemi- über Physisorption bis zum Bereich der Kapillarkondensation stetig ansteigt.

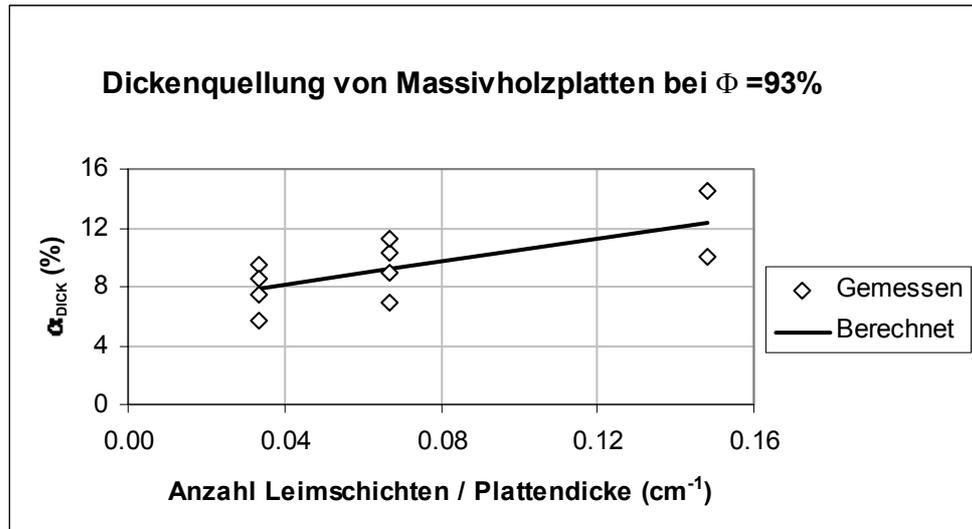


Abbildung 4-27 Dickenquellung bei rel. Luftfeuchtigkeit von 93% in Abhängigkeit von der Anzahl Leimschichten pro Plattendicke

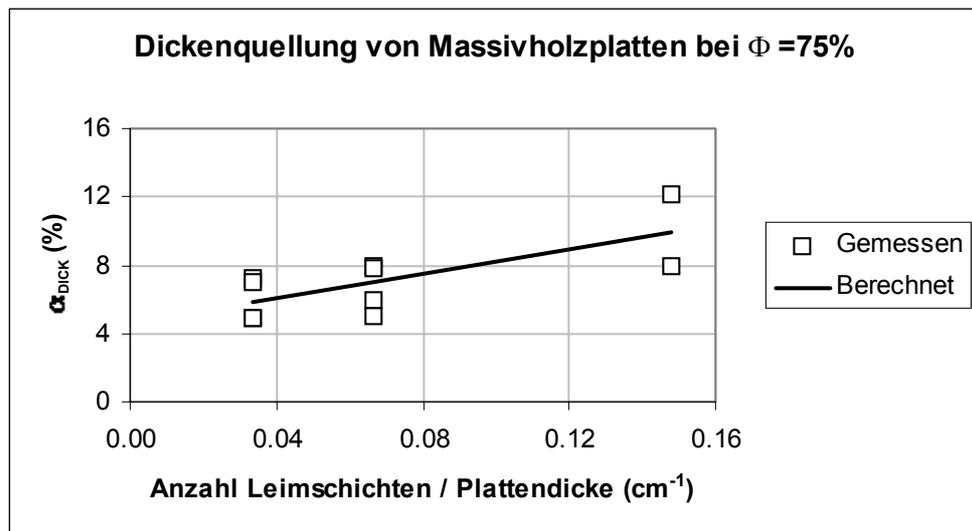


Abbildung 4-28 Dickenquellung bei rel. Luftfeuchtigkeit von 75% in Abhängigkeit von der Anzahl Leimschichten pro Plattendicke

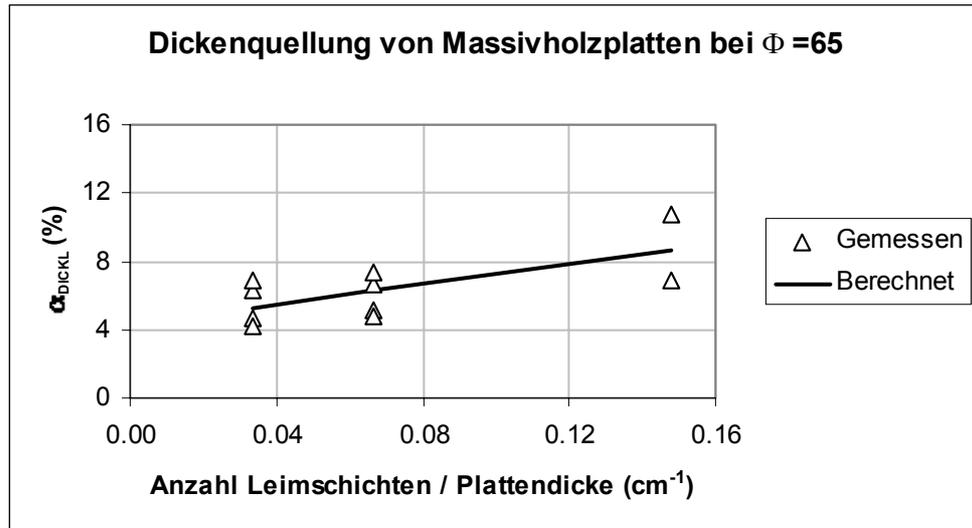


Abbildung 4-29 Dickenquellung bei rel. Luftfeuchtigkeit von 65% in Abhängigkeit von der Anzahl Leimschichten pro Plattendicke

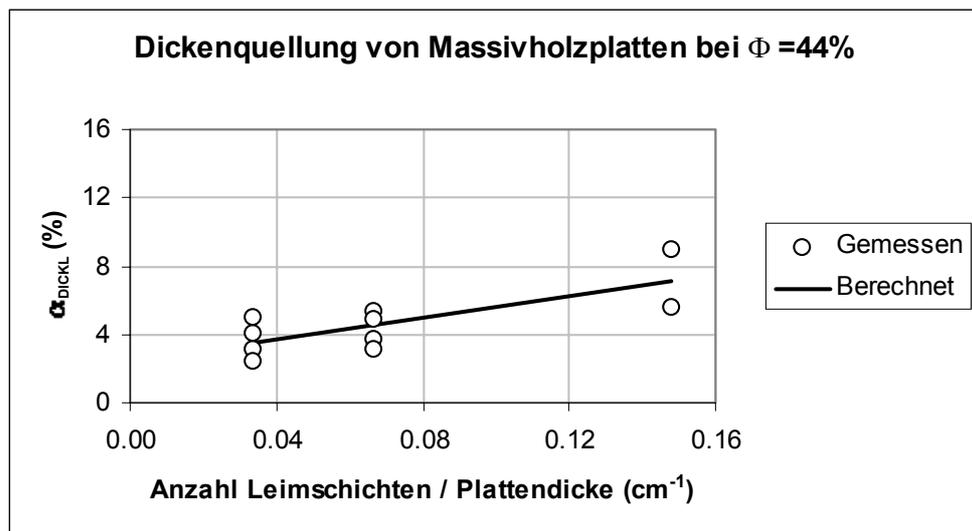


Abbildung 4-30 Dickenquellung bei rel. Luftfeuchtigkeit von 44% in Abhängigkeit von der Anzahl Leimschichten pro Plattendicke

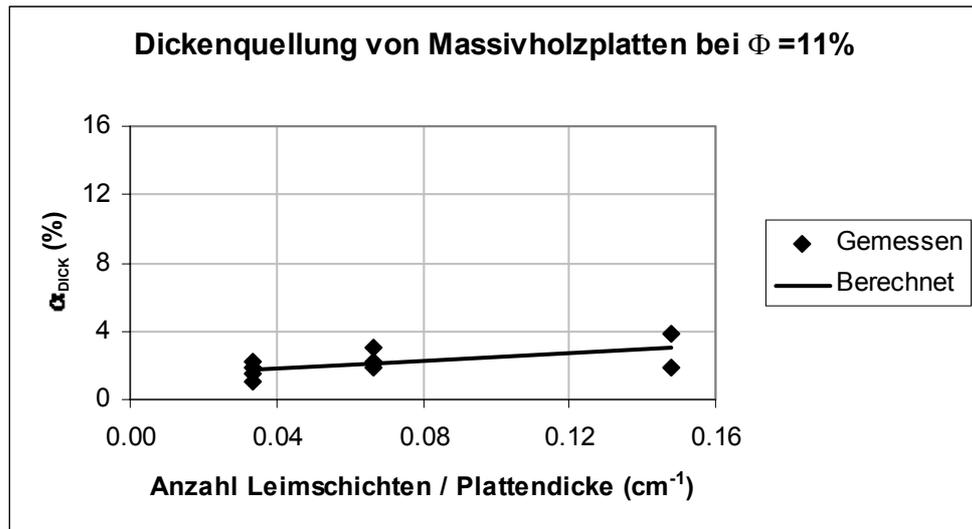


Abbildung 4-31 Dickenquellung bei rel. Luftfeuchtigkeit von 44% in Abhängigkeit von der Anzahl Leimschichten pro Plattendicke

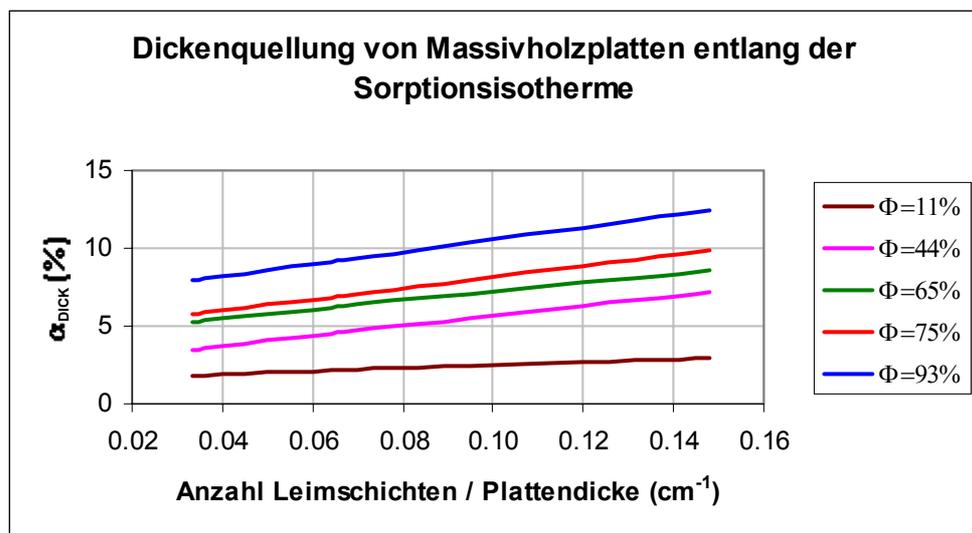


Abbildung 4-32 Die Abhängigkeit der Dickenquellung von der Anzahl Leimschichten pro Plattendicke entlang der Sorptionsisotherme

4.2.3 Die differentielle Dickenquellung

In der folgenden Tabelle 4-4 ist die differentielle Dickenquellung der Versuchsproben zusammengefasst. Diese wurde für drei Feuchteänderungen von rel. Luftfeuchtigkeiten zwischen 93% und 44%, 75% und 44%, 75% und 11% ermittelt.

Die differentielle Dickenquellung der Massivholzplatten in senkrechter Anordnung der mittleren Lamellen ist mit Ausnahme der MHP-3-60AS auffallend höher im Vergleich mit derjenigen in der parallelen Anordnung.

Tabelle 4-4 Differentielle Dickenquellung q in %/% bei drei verschiedenen rel. Luftfeuchteänderungen Φ in %

Probe	$\Phi=44\%-93\%$	$\Phi=44\%-75\%$	$\Phi=11\%-75\%$
MHP-3-27P	0.32	0.35	0.31
MHP-3-27S	0.47	0.47	0.45
MHP-3-30P	0.35	0.35	0.30
MHP-3-30S	0.43	0.45	0.50
MHP-3-60P	0.32	0.31	0.27
MHP-3-60S	0.40	0.46	0.39
MHP-3-60AP	0.32	0.33	0.31
MHP-3-60AS	0.29	0.33	0.30
MHP-5-60P	0.34	0.34	0.33
MHP-5-60S	0.54	0.55	0.50

4.3 Rohdichte

Wie aus der folgenden Tabelle 4-5 ersichtlich ist besteht kein statistisch relevanter Unterschied in der Normal- und der Darr-Rohdichte zwischen dem Versuchsmaterial mit Ausnahme der Normal-Rohdichte der Versuchsproben MHP-3-60P und MHP-3-60S die auffallend niedriger ist im Vergleich mit den übrigen Versuchsproben.

Tabelle 4-5 Normal- und Darr-Rohdichte des Versuchsmaterials

Probe	Normal-Rohdichte ρ_N (g/cm ³)	Darr-Rohdichte ρ_0 (g/cm ³)
MHP-3-60P	0.46±0.03	0.41±0.03
MHP-3-60S	0.46±0.04	0.44±0.04
MHP-5-60P	0.44±0.03	0.40±0.03
MHP-5-60S	0.48±0.03	0.45±0.03
MHP-3-27P	0.45±0.02	0.46±0.03
MHP-3-27S	0.45±0.04	0.46±0.04
MHP-3-30P	0.46±0.02	0.40±0.02
MHP-3-30S	0.46±0.02	0.41±0.01
MHP-3-60AP	0.42±0.02	0.40±0.02
MHP-3-60AS	0.42±0.02	0.39±0.03

4.4 Feuchtigkeitsgehalt

In folgender Tabelle 4-6 sind die Gleichgewichtsfeuchtigkeiten u_{Φ} der Versuchsproben für die im Versuch verwendeten relativen Luftfeuchtigkeiten von 11%, 44%, 65%, 75% und 93% zusammengefasst. Die Gleichgewichtsfeuchtigkeit der Massivholzplatten ist im unteren hygroskopischen Bereich (bis etwa $\Phi=65\%$) bedeutend höher und im obersten Bereich ($\Phi = 93\%$) bedeutend tiefer als beim Fichtenholz (siehe auch unter Absatz 4.1).

Tabelle 4-6 Gleichgewichtsfeuchtigkeit u_{Φ} des Versuchsmaterials

Probe	rel. Luftfeuchtigkeit Φ (%)				
	11	44	65	75	93
MHP-3-60P	7.19	10.86	14.75	15.87	20.12
MHP-3-60S	5.50	8.78	12.79	13.31	18.24
MHP-5-60P	7.86	11.31	15.27	15.97	20.18
MHP-5-60S	7.48	11.05	14.85	15.88	20.41
MHP-3-27P	6.48	9.67	13.06	13.67	18.58
MHP-3-27S	5.48	9.18	13.00	13.62	18.53
MHP-3-30P	6.45	9.57	13.45	14.11	18.72
MHP-3-30S	5.30	8.88	12.70	13.89	19.22
MHP-3-60AP	5.93	9.13	12.77	13.40	18.59
MHP-3-60AS	5.11	8.69	12.61	13.59	15.56
Fichtenholz	3.40	8.04	11.79	14.54	23.79

5 Schlussfolgerungen

Aufgrund der erzielten Resultate lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

5.1 Gleichgewichtsfeuchtigkeit

- Die Gleichgewichtsfeuchtigkeit der Massivholzplatten ist im unteren hygroskopischen Bereich (bis etwa $\Phi=65\%$) bedeutend höher und im obersten Bereich ($\Phi = 93\%$) bedeutend tiefer als diejenige beim Fichtenholz.

5.2 Normal- und Darr-Rohdichte

- Es besteht kein statistisch relevanter Unterschied in der Normal- und der Darr-Rohdichte zwischen dem Versuchsmaterial mit Ausnahme der Normal-Rohdichte der Versuchsproben MHP-3-60P und MHP-3-60S die auffallend niedriger ist im Vergleich mit den übrigen Versuchsproben.

5.3 Sorptionseigenschaften

- Es besteht kein statistisch relevanter Unterschied zwischen den Sorptionseigenschaften der untersuchten Massivholzplatten.
- Eine tendentielle Erhöhung der Sorbat-Zugänglichkeit von Platten mit parallel angeordneten Lamellen gegenüber denjenigen in der senkrechter Anordnung ist mit Ausnahme von MHP-3-60A Proben zu bezeichnen.
- Auffallend ist die relativ hohe monomolekulare Bedeckung und die relativ tiefe Fasersättigungsfeuchte aller Versuchsproben im Vergleich zu unbehandeltem Fichtenholz. Dies deutet darauf hin, dass es durch den Herstellungsprozess einerseits zur Erhöhung der Zugänglichkeit des Sorbats zu den sorptiv aktiven Gruppen des Holzes gekommen ist, andererseits wurde die innere Struktur des Holzes teilweise durch das Leimmittel verstopft und möglicherweise die Porenstruktur durch prozessbedingte Druck- und Temperaturanwendung verändert.
- Im Endeffekt ist die Fasersättigungsfeuchte der Platten im Vergleich zum Fichtenholz, der höheren Affinität der sorptiv aktiven Gruppen im Bereich der Chemisorption zum trotz, deutlich herabgesetzt. Demnach setzt sich der Sorptionsmechanismus der Kapillarkondensation gegenüber der Chemisorption auf die Fasersättigungsfeuchte stärker durch.

5.4 Lineare Quellung

- Die Messungen haben gezeigt, dass die Längen- sowie die Breitenquellung gegenüber der Dickenquellung der Massivholzplatten vernachlässig erwartungsgemäss klein ausfallen, sodass die Volumenquellung der Dickenquellung gleichgestellt werden kann.
- Das Quellen im Bereich zwischen 0% und etwa 20% Wassergehalt ist nahezu linear und die Beziehung zwischen Quellen und rel. Luftfeuchtigkeit der Sorptionsisotherme annähernd gleichgestellt werden kann.
- Aus dem Verlauf der Dickenquellung der Massivholzplatten und der Volumenquellung des Fichtenholzes im gesamten hygroskopischen Bereich lassen sich folgende Schlüsse ziehen:
 - Im unteren Dampfdruckbereich quellen die Massivholzplatten ausnahmslos stärker als das Fichtenholz,
 - Im oberen Dampfdruckbereich zeigen die Massivholzplatten ein geringeres Quellverhalten gegenüber dem Fichtenholz.
 - Parallel zum Sorptionsverhalten zeigen sich die Massivholzplatten dort wo das Wasser an das Material chemisch gebunden ist formunstabiler, hingegen im Dampfdruckbereich wo die Porenstruktur für die Wasseraufnahme massgebend ist dimensionsstabiler gegenüber dem Fichtenholz.
- Die Länge- und Breitenfeuchteverformungen der Versuchsproben weisen je nach Platten- und Lamellenanordnungsart an den Stirnflächen plastische Verformungen auf die bei den relativ kleinen Probenabmessungen zu ungewöhnlich hohen Feuchteverformungen geführt haben. Diese plastische Verformungen werden sich bei den grossen Industrieplatten auf die Längen- und Breitenfeuchteverformung kaum auswirken.
- Die Quellung der Massivholzplatten steigt linear mit der Anzahl Leimschichten pro Plattendicke.
- Je höher das Feuchteklima, desto höher ist auch die Dickenquellung.
- Die Steigung der Geraden (Dickenquellung vs. Anzahl Leimschichten pro Plattendicke) steigt vom Bereich der Chemisorption bis zum Bereich der Kapillarkondensation stetig an.

5.5 Differentielle Quellung

- Die differentielle Dickenquellung der Massivholzplatten in senkrechter Lamellenanordnung ist mit Ausnahme der MHP-3-60AS auffallend höher im Vergleich mit derjenigen in der parallelen Anordnung.

6 Literatur

1. DIN 52 182. Sep. 1976: Prüfung von Holz. Bestimmung der Rohdichte. Seite 1-2.
2. DIN 52 183. Nov. 1977: Prüfung von Holz. Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes. Seite 1-2.
3. DIN 52 184. Mai 1979: Prüfung von Holz. Bestimmung der Quellung und Schwindung. Seite 1-4.
4. DIN 50 014. Jul. 1985: Klimate und ihre technische Anwendung. Normalklimate. Seiten 1-2.
5. HAILWOOD, A.; HORROBIN, S. 1946: Absorption of water by polymers. Analysis in term of a single model. Trans. Faraday Soc. 42B: 84-102.
6. Mytutoyo Digimatic DT-10. Gebrauchsanweisungen. Firmenliteratur
7. Mytutoyo Digimatic DL-10. Gebrauchsanweisungen. Firmenliteratur
8. NIEMZ, P.; POBLETE, H. 1995: Untersuchungen zur Gleichgewichtsfeuchte von MDF und Spanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff 53(6): 368.
9. NIEMZ, P.; POBLETE, H. 1996: Untersuchungen zur Dimensionsstabilität von mitteldichten Faserplatten (MDF) und Spanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff 54(2): 141-144.
10. POPPER, R. 1991: Datenerfassungsprogramm WAAGMA. Int. Berichtt WAHO/ETHZ.
11. POPPER, R. 1991: Datenerfassungsprogramm LOGGMA. Int. Berichtt WAHO/ETHZ.
12. POPPER, R. 1982: Computerprogramm HHM28 für die Berechnung von Sorp-tionseigenschaften nach dem Hailwood-Horrobin Modell. Computer-Anwendungen: 113.

7 Anhang