

Untersuchungsbericht zur Erstellung dreier Materialdatensätze für die hygrothermi- sche Simulation von Brettsperrholz (CLT) mittels der Soft- ware WUFI®

Autoren:

Dipl.-Ing. (FH) Daniel Kehl, Büro für Holzbau und Bauphysik (HBP), Leipzig
M.Sc. Eri Tanaka, Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP), Holzkirchen
Dipl.-Ing. (FH) Kristin Lengsfeld, Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP), Holzkirchen
Dipl.-Ing. (FH) Nikolai Krawczyk, Büro für Holzbau und Bauphysik (HBP), Leipzig
Dr.-Ing. Daniel Zirkelbach, Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP), Holzkirchen

Zitiervorschlag:

Kehl, D.; Tanaka, E.; Lengsfeld, K.; Krawczyk, N.; Zirkelbach, D.: Untersuchungsbericht
zur Erstellung dreier Materialdatensätze für die hygrothermische Simulation von Brettsperrholz (CLT)
mittels der Software WUFI®, Eigenverlag, Leipzig und Holzkirchen, 2026

Der Untersuchungsbericht gehört zum Verbund-Forschungsvorhaben „Qualitätssicherung im modernen mehrgeschossigen Holz- und Holz-Hybridbau (HolzQS) - Entwicklung von Schutzkonzepten und Monitoringsystemen zum Schutz der Holzkonstruktion vor unzuträglicher Feuchte während der Fertigungs-, Bau- und Nutzungsphase“ Förderkennzeichen: 2221HV072 A-E

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Materialeigenschaften – Messungen und Literatur	4
2.1	Rohdichte, darrtrocken ρ_0 [kg/m ³]	4
2.2	Reindichte ρ_m [kg/m ³].....	4
2.3	Porosität Φ_0 [m ³ /m ³ , bzw. Vol.-%]	4
2.4	max. Wassersättigung $w_{\max}$ [kg/m ³].....	5
2.5	Freie Wassersättigung $w_{f,28d}$ [kg/m ³]	5
2.6	Wärmeleitfähigkeit λ [W/m·K].....	6
2.7	Spez. Wärmekapazität c_0 [J/kg·K].....	7
2.8	Sorptionsisotherme / Feuchtespeicherfunktion w (T, RH)	8
2.8.1	Sorption im hygroskopischen Bereich	8
2.8.2	Feuchtespeicherfunktion im überhygroskopischen Bereich	9
3	Feuchtetransport	9
3.1	Feuchtetransportmodell	9
3.2	Wasserdampfdiffusion (μ -Wert und s_d -Wert).....	10
3.2.1	Messwerte und Literaturwerte Fichte	10
3.2.2	Messwerte Kleberschicht.....	12
3.3	Flüssigtransportkoeffizienten	13
3.3.1	Wasseraufnahmekoeffizient w [kg/m ² /h] bzw. A [kg/m ² /s].....	13
3.3.2	Flüssigtransportkoeffizienten D_{ws} and D_{ww}	14
3.3.3	NMR – Scanner	15
3.3.4	Wasseraufnahmeversuch und Feuchteprofil (D_{ws})	16
3.3.5	Weiterverteilungsversuch – Feuchteprofil (D_{ww}).....	18
3.3.6	Trocknungsversuch – Feuchteverlauf (D_{ww}).....	18
3.3.7	Klebeschicht radial/tangential.....	19
4	Zusammenfassung Materialdaten	21
5	Anhang (detaillierte Messwerte)	24
5.1	Rohdichte trocken ρ_0 Fichte.....	24
5.2	Sorptionsfeuchten.....	24
5.3	Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl μ bzw. s_d -Wert	25
6	Literatur	28

1 Einleitung

Die folgenden Untersuchungen wurden vom Fraunhofer Institut für Bauphysik in Kooperation mit dem Büro für Holzbau und Bauphysik, Dipl.-Ing. (FH) Daniel Kehl, Leipzig durchgeführt. Der Auftrag dazu wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens „*Qualitätssicherung im modernen mehrgeschossigen Holz- und Holz-Hybridbau (HolzQS) - Entwicklung von Schutzkonzepten und Monitoringsystemen zum Schutz der Holzkonstruktion vor unzuträglicher Feuchte während der Fertigungs-, Bau- und Nutzungsphase*“ erteilt. Das Forschungsvorhaben wird gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Projektträger: Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR).

Ziel der Untersuchung ist die vollständige bauphysikalische Materialbeschreibung von Brettsperrholz (Cross Laminated Timber (CLT)) für die hygrothermische Bauteilsimulation mit der Software WUFI® (Wärme und Feuchte instationär) des Fraunhofer Instituts für Bauphysik. Zu der vollständigen Materialbeschreibung gehören drei Materialdatensätze:

- Fichte radial, tangential (2026),
- Fichte longitudinal (2026) und
- Kleberschicht CLT

Mit Hilfe verschiedener Messverfahren und aus der Literatur bekannter Werte werden die hygrothermischen Materialparameter von Fichte und der Klebefuge ermittelt, die für die modernen, instationären hygrothermischen Rechenverfahren notwendig sind.

Für einen vollständigen Materialdatensatz für WUFI®, werden folgende Daten benötigt:

- Rohdichte darrtrocken ρ_0
- Reindichte ρ_m
- Porosität Φ / max. Wassergehalt $w_{\max}$
- Wärmeleitfähigkeit trocken λ_0 , feuchte- und temperaturabhängig $\lambda(w;T)$
- Sorptionsisotherme (Feuchtespeicherfunktion) $w(T; RH)$
- Freie Wassersättigung (w_f)
- Diffusionswiderstandszahl μ [-]
- Wasseraufnahmekoeffizient (w bzw. A)

Um aus den Messwerten einen Materialdatensatz zu erstellen, sind insbesondere für die Bestimmung der Feuchtetransportkoeffizienten zusätzliche Versuche mit Nuklear Magnet Resonanz Messungen (NMR) erforderlich.

- Wasseraufnahme inkl. NMR-Messung
- Weiterverteilungsversuch inkl. NMR-Messung
- Trocknungsversuch inkl. NMR-Messung

Während der Erstellung des Materialdatensatzes können auf Grund der Streuung des Materials einzelne Parameter angepasst werden. Die fertigen Materialdatensätze werden am Ende des Berichts in einer Übersicht zusammengestellt.

2 Materialeigenschaften – Messungen und Literatur

2.1 Rohdichte, darrtrocken ρ_0 [kg/m³]

Als Rohdichte ρ wird die Dichte eines Festkörpers bezeichnet, die als das Verhältnis von Masse der Festsubstanz und dem eingenommenen Raumvolumen definiert ist [kg/m³]. Das Raumvolumen besteht aus Feststoff inklusive Porenraum der Materialprobe. Wird die Rohdichte im darrtrockenen Zustand ermittelt, wird dies als Trockenrohndichte ρ_0 bezeichnet. Die Trockenmasse wird in der Regel durch Trocknung bei 103°C auf Gewichtskonstanz nach [DIN EN ISO 12570: 2018] ermittelt. Die Probengröße betrug für Fichte 60 x 30 x 30 mm (lufttrocken). Die detaillierten Messergebnisse befinden sich Anhang 5.1.

Die ermittelte Trockenrohndichte ρ_0 der untersuchten Fichte beträgt 407 kg/m³.

2.2 Reindichte ρ_m [kg/m³]

Als Reindichte ρ_m wird die Dichte eines Festkörpers bezeichnet, die als das Verhältnis von Masse der Festsubstanz und dem eingenommenen Volumen definiert ist [kg/m³]. Das Volumen besteht aus Feststoff ohne Porenraum der Materialprobe [kg/m³]. Die Reindichte wird auch als Feststoffdichte bezeichnet.

Für Holz kann die Reindichte ρ_m mit ausreichender Genauigkeit für hygrothermische Betrachtungen mit 1.500 kg/m³ angenommen werden.

2.3 Porosität Φ_0 [m³/m³, bzw. Vol.-%]

Die offene Porosität Φ_0 ist das Verhältnis der für Wasser zugänglichen, offenen Poren bezogen auf das Gesamtvolumen der Probe. Die Porosität, berechnet sich über das Substanzvolumen aus Trockenrohndichte und Reindichte. Sie beschreibt den gesamten, zur Verfügung stehenden Porenraum.

Bei Holz ergibt sich aus der ermittelten Rohdichte (trocken) ρ_0 von 407 kg/m³ und der angenommen Reindichte von 1.500 kg/m³ für Fichte folgende Porosität.

$$\Phi = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_m} = 1 - \frac{407}{1.500} = 0,73 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

Φ_0 [m³/m³] Porosität

ρ_0 [kg/m³] Rohdichte (darrtrocken)

ρ_m [kg/m³] Reindichte bzw. Feststoffdichte

2.4 max. Wassersättigung w_{max} [kg/m³]

Die maximale Wassersättigung, auch als maximaler Wassergehalt w_{max} bezeichnet, ergibt sich aus der Porosität und der Rohdichte von Wasser. Bei der maximalen Wassersättigung wären alle Poren mit Wasser gefüllt.

$$w_{max} = \Phi_0 \cdot \rho_w = 0,73 \cdot 1.000 = 730 \frac{kg}{m^3}$$

w_{max}	[kg/m ³]	maximaler Wassergehalt
Φ_0	[m ³ /m ³]	Porosität (mittlere Porosität)
ρ_w	[kg/m ³]	Rohdichte Wasser (1.000 kg/m ³)

2.5 Freie Wassersättigung $w_{f,28d}$ [kg/m³]

Die freie Wassersättigung w_f ist die volumenbezogene Menge an Wasser, die ein Material bei Wasserlagerung ohne zusätzliche äußere Kräfte (Überdruck oder Vakuum) aufnimmt. Sie liegt aufgrund eingeschlossener Luftporen stets unterhalb der maximalen Wassersättigung w_{max} .

Die Bestimmung der freien Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck erfolgt für Holz in Anlehnung an [DIN EN 13755: 2008]. Dazu werden die Prüfkörper mit den Abmessungen 100 x 100 mm² und einer Dicke von 10 mm zunächst im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Anschließend werden die Proben in ein Wasserbad (23°C) auf einen Gitterrost gelegt und die Probekörper mit Wasser überdeckt und nach 28 Tagen aus dem Wasserbad entnommen, feucht abgetupft und gewogen.

Der Prozess der Wasseraufnahmen bis zur freien Wassersättigung dauert in der Regel auch bei kleinen Proben sehr lange. Wie die Versuche bei Holz zeigen, muss das Holz, das über die radiale/tangentiale Richtung Wasser aufnimmt, lange im Wasser verweilen, um die freie Wassersättigung zu erreichen (Abb. 1; untere Kurve). Da solche Zeiträume in der baulichen Praxis nicht oder äußerst selten vorkommen, wird die freie Wassersättigung w_f nach 28 Tage definiert. Durch die zeitliche Festlegung haben die Schnittrichtung und Probengröße einen Einfluss auf das Ergebnis. Um eine freie Wassersättigung möglichst zügig zu bestimmen, wurden die Proben so geschnitten (longitudinal / 10 mm Dicke), dass möglichst viel Wasser über das Hirnholz in die Probe eindringt.

Die freie Wassersättigung w_f der Fichte beträgt danach 723 kg/m³ bzw. 178 M.-%.

Durch den Abgleich zwischen NMR-Messung (Erläuterung Kapitel 3.3.3) und der dazugehörigen Nachsimulation hat sich gezeigt, dass der gewählte Wert von 28 Tagen und der Probengröße bei Holz sinnvoll gewählt ist.

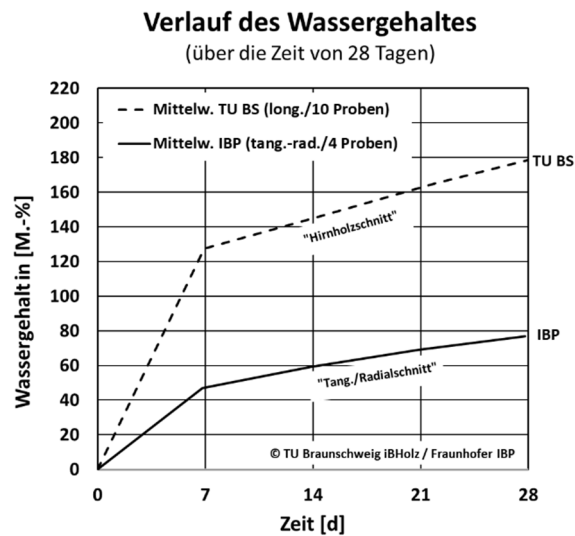


Abb. 1: Freie Wassersättigung w_f – Werte nach 7 und 28 Tagen sind linear verbunden. w_f wird bei radial/tangential nicht erreicht (Quelle: IBP und iBHolz der TU Braunschweig)

2.6 Wärmeleitfähigkeit λ [W/m·K]

Die Wärmeleitfähigkeit (λ) eines Stoffes beschreibt den Wärmestrom (W), der durch eine 1 m dicke Schicht des Stoffes aufgrund eines Temperaturgefälles (K) fließt. Sie hängt bei Holz im Wesentlichen von Trockenrohddichte und Wassergehalt ab.

Da die Wärmeleitfähigkeit von Holz gut untersucht ist, wird diese nicht mehr gemessen und hier für darrtrockenes Holz wie folgt angesetzt:

$$\lambda_{\perp,0} = 0,0217 + 0,1887 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_0 = 0,0217 + 0,1887 \cdot 10^{-3} \cdot 407 = 0,095 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$\lambda_{\parallel,0} = 0,0217 + 0,4443 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_0 = 0,0217 + 0,4443 \cdot 10^{-3} \cdot 407 = 0,20 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

λ [W/m·K] Wärmeleitfähigkeit trocken ($\perp$ quer zur Faser; $\parallel$ längs zur Faser)

ρ_0 [kg/m³] Rohddichte (darrtrocken) hier 407 kg/m³

Einfluss der Feuchte auf die Wärmeleitfähigkeit

Auch der Einfluss der Holzfeuchte u auf die Wärmeleitfähigkeit ist bis zur Fasersättigung ausreichend bekannt. Die Wärmeleitfähigkeit steigt bei Holz um 1,25%/M.-%.

$$\lambda_u = \lambda_0 \cdot (1 + 0,0125 \cdot u)$$

u [M.-%] Holzfeuchtigkeit

λ_0 [W/m·K] Wärmeleitfähigkeit trocken ($\perp$ quer zur Faser; $\parallel$ längs zur Faser)

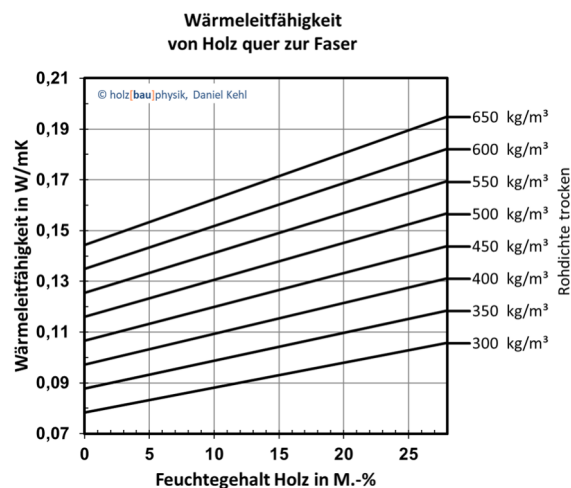


Abb. 2: Zusammenhang zwischen Rohdichte, Holzfeuchte und Wärmeleitfähigkeit (Quelle: HBP)

2.7 Spez. Wärmekapazität c_0 [J/kg·K]

Die spezifische Wärmekapazität c_0 eines Stoffes ist die Wärmemenge in J, die benötigt wird, um 1 kg des Stoffes um 1 K zu erwärmen [J/kg·K]. Im hygrothermischen Materialdatensatz bezieht sich die spezifische Wärmekapazität auf den trockenen Zustand des Materials. Die spez. Wärmekapazität des Wassers c_w wird während der hygrothermischen Simulation je nach berechnetem Wassergehalt hinzuaddiert.

Die spezifische Wärmekapazität c_0 von Holz kann mit 1.400 ± 50 J/kg·K und die von Wasser (c_w) mit 4.190 J/kg·K angesetzt werden [Kollmann 1982].

$$c_m = \left(\frac{u}{100 + u} \right) \cdot c_w + \left(1 - \frac{u}{100 + u} \right) \cdot c_0$$

$$c_m = \left(\frac{u}{100 + u} \right) \cdot 4190 + \left(1 - \frac{u}{100 + u} \right) \cdot 1400$$

c_m [J/kg·K] mittlere Wärmekapazität von Holz bei einer Holzfeuchte u

u [M.-%] Holzfeuchtigkeit

c_0 [J/kg·K] spez. Wärmekapazität (Holz)

c_w [J/kg·K] spez. Wärmekapazität (Wasser)

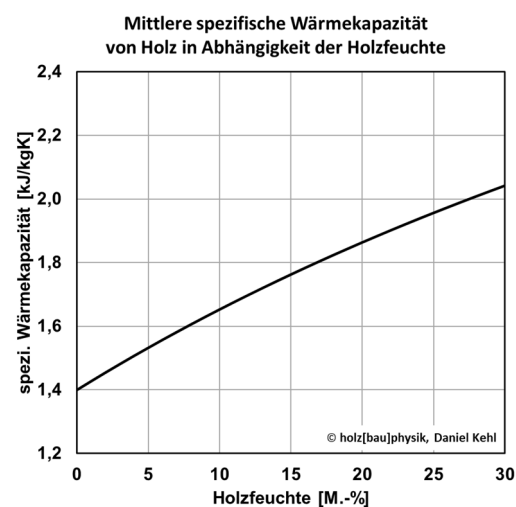


Abb. 3: Zusammenhang zwischen Holzfeuchte und spezifischer Wärmekapazität (Quelle: HBP)

2.8 Sorptionsisotherme / Feuchtespeicherfunktion $w(T, RH)$

2.8.1 Sorption im hygroskopischen Bereich

Die Sorptionsisotherme / Feuchtespeicherfunktion $w(T, RH)$ beschreibt den Wassergehalt eines Baustoffes im Gleichgewicht mit den jeweiligen Umgebungsrandbedingungen (Temperatur (hier 23°C) und rel. Luftfeuchte). Bei der Bestimmung der Speichereigenschaften muss zwischen dem hygroskopischen Sorptionsfeuchtebereich und überhygroskopischen Bereich unterschieden werden. Im Sorptionsfeuchtebereich werden die Proben in einem über eine Salzlösung oder mit Hilfe eines Klimaschranks eingestellten Klima gelagert und der Ausgleichsfeuchtegehalt durch Wiegen der Probe ermittelt. Durch Variieren der relativen Luftfeuchte (50% bis 97% rel. Luftfeuchte) erhält man die Absorptionsisotherme bzw. bei umgekehrter Vorgehensweise die Desorptionsisotherme. Das Messverfahren ist innerhalb der [DIN EN ISO 12571: 2022] geregelt. Die Probengröße betrug beim Zuschnitt 50 x 40 x 20 mm. Die Messergebnisse befinden sich im Anhang 5.2.

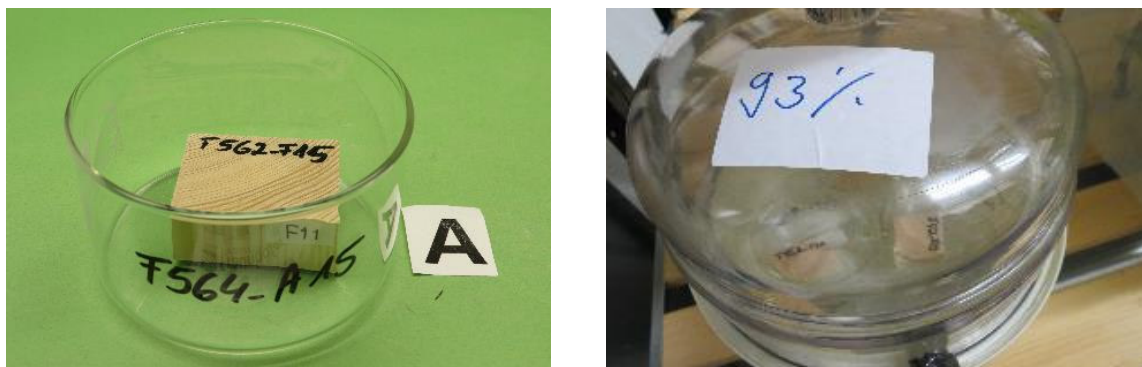


Abb. 4: Glasschale mit Probe (links) und Exsikkator mit Proben (rechts) (Quelle: IBP)

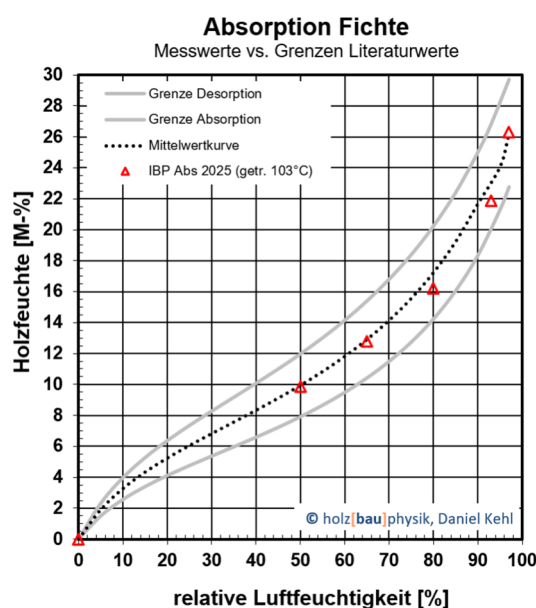


Abb. 5: Absorptionswerte aus den Messungen (rote Dreiecke) im Vergleich zu erwartbarem Bereich auf Grund von Literaturwerten (graue Linien). (Quelle IBP / HBP)

2.8.2 Feuchtespeicherfunktion im überhygroskopischen Bereich

Die Erzeugung der Feuchtespeicherfunktion im überhygroskopischen Bereich erfolgt über eine mathematische Generierung aus den Materialfeuchten bei 65%, 80%, 93%, 97% rel. Luftfeuchte sowie der freien Wassersättigung w_f und der maximalen Wassersättigung $w_{\max}$.

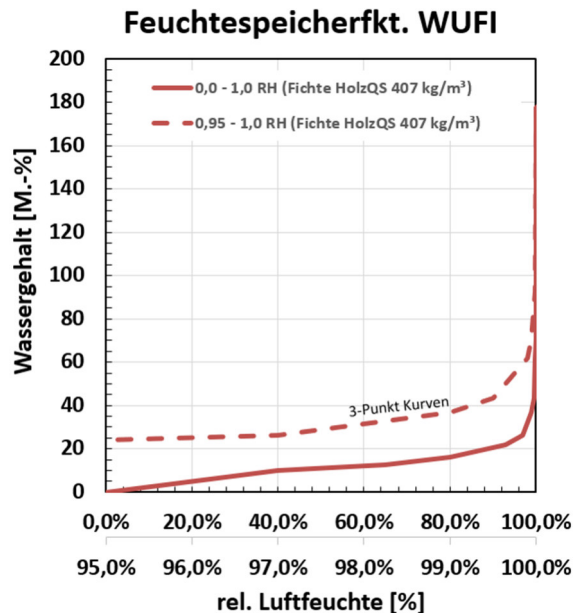


Abb. 6: Vollständige Feuchtespeicherfunktion aus dem hygroskopischen und überhygroskopischen Bereich

3 Feuchtetransport

3.1 Feuchtetransportmodell

Beim Feuchtetransport in Materialien wird in WUFI® zwischen Diffusion und Kapillartransport unterschieden. Die Transportvorgänge können nur in Ansätzen getrennt voneinander gemessen werden. So beruht z.B. die Reduzierung der Diffusionswiderstandszahl μ (bzw. die gemessene Erhöhung der Wasserdampfdurchlässigkeit) bei Erhöhung der mittleren Stofffeuchte auf einem der Diffusion überlagerten Feuchtetransport in flüssiger Phase. Für beide Transportmechanismen wirken unterschiedliche Transportpotentiale, weshalb die Vermischung beider Transportarten zu einem feuchteabhängigen Diffusionskoeffizienten streng genommen nicht korrekt ist [Krus 1995]. Bei Holz findet diese Überlagerung der Transportprozesse bereits bei niedrigen relativen Luftfeuchten (< 50% rel. Luftfeuchte) statt, wie viele Diffusionsmessungen aus der Literatur belegen (siehe Kapitel 0).

In [Fitz et al. 2004] wird der Diffusivitäts-Modellansatz von WUFI® wie folgt beschrieben: „Obwohl es sich beim Kapillartransportkoeffizienten eigentlich um eine Strömungserscheinung handelt, lässt sich der Flüssigtransport in den Porenräumen mit für bauphysikalische Zwecke hinreichender Genauigkeit durch einen Diffusionsansatz beschreiben“. Der

Flüssigtransportkoeffizient für den Saugvorgang D_{ws} (Diffusivität _{Wasser Saugen}) *beschreibt die kapillare Wasseraufnahme bei vollständiger Benetzung der Bauteiloberfläche. Dies entspricht in bauphysikalischem Zusammenhang bspw. der Berechnung des Bauteils oder einem Wasseraufnahmeversuch. Der Saugvorgang wird von den größeren Kapillaren bestimmt, da sie zwar eine geringere Saugkraft als die kleinen Kapillaren besitzen, aber auch einen noch stärker verminderten Strömungswiderstand.* Für den Saugvorgang lässt sich bei mineralischen Baustoffen zwischen D_{ws} und dem w-Wert (Wasseraufnahmekoeffizient) ein Zusammenhang herleiten (Approximationsverfahren) [Holm 2001], der auch in der Software WUFI® implementiert ist. Wie Simulationsversuche im Rahmen des Projektes ergeben haben (nicht dargestellt), ist das Verfahren für Holz ungeeignet. Daher wurden die Flüssigtransportkoeffizienten in diesem Forschungsprojekt explizit mit den Ergebnissen der NMR-Messung iterativ angepasst. Der **Flüssigtransportkoeffizient für die Weiterverteilung D_{ww}** (Diffusivität _{Wasser Weiterverteilen}) beschreibt die Umverteilung des aufgesaugten Wassers, wenn nach Beendigung der Benetzung kein neues Wasser mehr eindringt und das vorhandene Wasser sich zu verteilen beginnt. Das Weiterverteilen wird von den kleineren Kapillaren bestimmt, da sie mit ihrer größeren Saugkraft die großen Kapillaren leersaugen. Um korrekte Flüssigtransportkoeffizienten zu erlangen sind bei Holz entsprechende Nachberechnungen verschiedener Versuche erforderlich (siehe Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

3.2 Wasserdampfdiffusion (μ -Wert und s_d -Wert)

Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl μ [-] und wasserdampfäquivalente Luftschichtdicke (s_d -Wert)

Die Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl (μ) beschreibt den Wasserdampfdiffusionswiderstand eines Materials im Vergleich zu einer Luftschicht mit gleicher Dicke. Die Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl von Luft ist dementsprechend 1, wogegen sie von vielen Baumaterialien i.d.R. höher liegt. Die Messung des sogenannten μ -Wertes erfolgt nach [DIN EN ISO 12572: 2025]. Dabei wird i.d.R. zunächst nur nach dem Trockenbereichsverfahren ("Dry-Cup") zwischen 3 und 50% rel. Luftfeuchte, und Feuchtbereichsverfahren zwischen 50 und 93% rel. Luftfeuchte ("Wet-Cup") unterschieden. Die Messung erfolgt unter isothermen Bedingungen bei 23°C.

Wird die Schichtdicke des Materials mit einbezogen, ergibt sich die wasserdampfäquivalente Luftschichtdicke (s_d -Wert). Der s_d -Wert [m] berechnet sich aus dem Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl μ [-] multipliziert mit der Schichtdicke des Baustoffs [m]. Der s_d -Wert ist somit ein Maß für den Diffusionswiderstand eines Baustoffs im Vergleich zu einer Luftschicht der berechneten Dicke.

3.2.1 Messwerte und Literaturwerte Fichte

Die Probengröße der Fichtenholzproben beträgt bei den Versuchen ca. 100 x 100 x 20 mm³. Die Proben bestehen zunächst aus zwei gestapelten, nicht verklebten Proben à 10 mm Dicke.

Für die Ermittlung des μ -Wertes des Klebers werden die Proben später verklebt. Die Feuchtedifferenz wird über Silikagel (3% rel. Luftfeuchte – „Dry-Cup“), einer gesättigten Salzlösung (Ammoniumdihydrogenphosphat 93% - „Wet-Cup“) und eine Klimakammer (50% rel. Luftfeuchte) erzeugt.



Abb. 7: Ermittlung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ mittels Cup-Messung (hier 50-93%).
(Quelle: IBP)

Tab. 1: Ermittelte wasserdampfäquivalenten Luftschichtdicke s_d von **Fichte ohne Kleber**

	Dry-Cup 3 – 50%			Wet-Cup 50 – 93%		
	Mittlere Dicke [mm]	Mittlerer μ -Wert [-]	s_d -Wert [m]	Mittlere Dicke [mm]	Mittlerer μ -Wert [-]	s_d -Wert [m]
radial/tangential	20,5	151	3,10	21,1	31	0,65
longitudinal	20,3	3,1	0,06	20,7	2,4	0,05

Bei Holz sinkt die Diffusionswiderstandszahl μ mit steigender Feuchtigkeit. Wie bereits oben beschrieben, setzt sich der Feuchtetransport aus Diffusion und Kapillarleitung zusammen. In einem vereinfacht gewählten Ansatz wird bei den hier erzeugten Materialdatensätzen unterhalb von 50% rel. Luftfeuchte, der gesamte Feuchtetransport der Diffusion zugeordnet. Oberhalb von 50% setzt sich der Feuchtetransport aus Diffusion und Kapillarleitung zusammen. Die Auswertung aus der eigenen Messung und vieler Messwerte aus der Literatur ergab folgende Kurve für den Feuchtetransport unter 50% rel. Luftfeuchte für radiale/tangentielle Richtung (Abb. 8). Mit diesem Verlauf des Diffusionswiderstands konnte der „Dry-Cup“-Versuch nachgerechnet werden. Bei der Nachrechnung des „Wet-Cup“-Versuchs kommt zur Diffusion noch der Flüssigtransport (siehe unten) hinzu. Daher verläuft die Kurve des Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl nicht durch den μ -Wert des „Wet-Cup“-Versuchs.

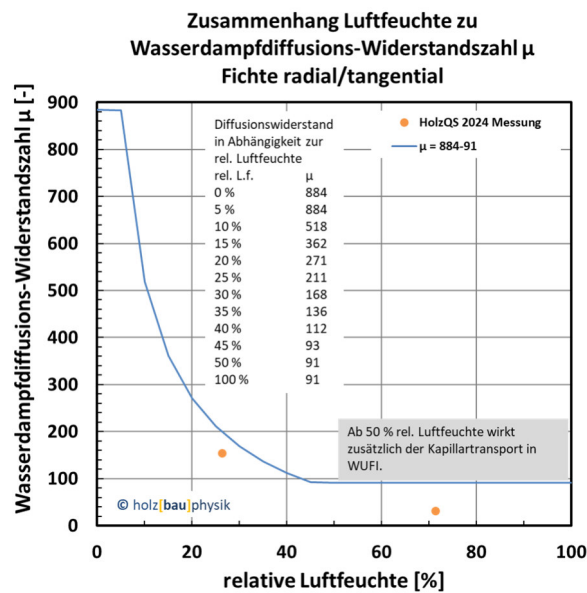


Abb. 8: Aus der eigenen Messung und Messwerten aus der Literatur abgeleitete Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl von Fichte radial/tangential. Ab 50% rel. Luftfeuchte wirkt Diffusion und Kapillarleitung. (Quelle: HBP / IBP)

3.2.2 Messwerte Kleberschicht

Da der Kleber eine sehr dünne Schichtdicke aufweist, ist es sinnvoller den Diffusionswiderstand nur über den s_d -Wert und nicht über den μ -Wert und dessen Dicke auszudrücken. Außerdem werden in der Simulationssoftware WUFI® Klebeschichten aus numerischen Gründen mit 1 mm angesetzt.

Die Proben aus dem vorherigen Versuch (ohne Kleber) wurden nach der Messung mit einem PU-Kleber verklebt und nochmals der Diffusionsstrom über die Cup-Versuche gemessen. Daraus ergaben sich folgende Werte für die Fichtenproben inkl. Kleber (Tab. 2). Um den s_d -Wert des Klebers zu ermitteln, werden der s_d -Wert der Fichtenproben ohne Kleber (Tab. 1) von denen mit Kleber (Tab. 2) abgezogen.

Tab. 2: Ermittelte wasserdampfäquivalenten Luftschichtdicke s_d von **Fichte mit Kleber**

	Dry-Cup 3 – 50%			Wet-Cup 50 – 93%		
	Mittlere Dicke [mm]	Mittlerer μ -Wert [-]	s_d -Wert [m]	Mittlere Dicke [mm]	Mittlerer μ -Wert [-]	s_d -Wert [m]
radial/tangential	20,1	251	5,04	19,8	65	1,28
longitudinal	20,1	4,9	0,10	20,2	3,9	0,08

Tab. 3: Aus s_d -Wert ohne Kleber (Tab. 1) und mit Kleber (Tab. 2) kann der μ -Wert und s_d -Wert für fiktive 1 mm dicke Kleberschicht ermittelt werden.

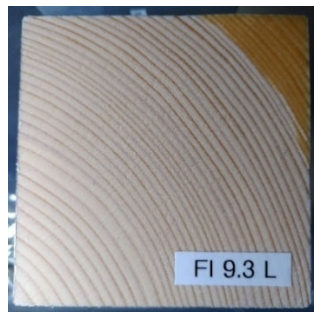
	Dry-Cup 3 – 50%			Wet-Cup 50 – 93%		
	Dicke ¹⁾ [mm]	Mittlerer μ -Wert [-]	s_d -Wert [m]	Dicke ¹⁾ [mm]	Mittlerer μ -Wert [-]	s_d -Wert [m]
radial/tangential	1	1940	1,94	1	630	0,63
longitudinal	1	40	0,04	1	30	0,03

¹⁾ in der Software WUFI® werden dünne Schichten aus numerischen Gründen mit 1 mm angenommen.

3.3 Flüssigtransportkoeffizienten

3.3.1 Wasseraufnahmekoeffizient w [$\text{kg}/\text{m}^2\sqrt{\text{h}}$] bzw. A [$\text{kg}/\text{m}^2\sqrt{\text{s}}$]

Der Wasseraufnahmekoeffizient (w -Wert [$\text{kg}/\text{m}^2\sqrt{\text{h}}$] oder international A -Wert [$\text{kg}/\text{m}^2\sqrt{\text{s}}$]; w -Wert = 60 x A -Wert) drückt die Wasseraufnahme einer definierten Fläche pro Zeiteinheit aus. Der w -Wert wird nach [DIN EN ISO 15148: 2018] bestimmt. Dazu wird eine seitlich abgedichtete Probe 5 mm in Wasser gestellt und in bestimmten zeitlichen Abständen herausgenommen, überschüssige Tropfen nass abgetupft und gewogen. Dabei entsteht eine typische Wurzelfunktion über die Zeit (siehe Abb. 9).



Hinweis: Fichte gehört zu den sogenannten Reifholzbäumen. Reifholz hat ein geringeres Saugverhalten als das Splintholz. Zwischen Reif- und Splintholz ist kein farblicher Unterschied sichtbar, so dass ggf. beim Zuschnitt Splintholzanteil bei den Proben dabei sein kann. Demzufolge kann es zu einer größeren Streuung des w -Wertes kommen. Dies zeigt sich nur in longitudinaler Richtung.

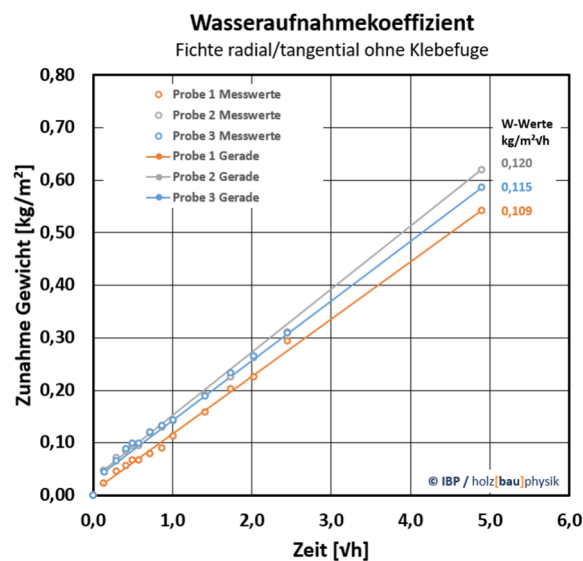


Abb. 9: Ergebnisse der w-Wert-Messung in radialer/ tangentialer Richtung. Im Mittel beträgt der Wasseraufnahmekoeffizient 0,12 kg/m²√h. (Quelle: IBP)

Die gemessenen w-Werte befinden sich in einem typischen Bereich und der dazugehörigen Streuung. Unterschiede ergeben sich aus der materiellen Streuung und der gewählten Probengröße.

Tab. 4: Ermittelte w-Werte für Fichte (IBP / HBP) und zum Vergleich Werte aus der Literatur

	Messung IBP w-Wert (10 x 10 x 1 cm)	Messung HBP w-Wert (8 x 8 x 8 cm)	Literatur Min - Max
longitudinal w-Wert [kg/m²√h]	--	0,61 – 0,67	0,63 – 1,14 Mittelwert: 0,81
radial/tangential w-Wert [kg/m²√h]	0,11 - 0,12	0,07 – 0,08	0,084 – 0,23 Mittelwert: 0,14

3.3.2 Flüssigtransportkoeffizienten D_{ws} and D_{ww}

Um den Verlauf der Flüssigtransportkoeffizienten D_{ws} und D_{ww} ermitteln zu können, sind verschiedene Versuche nachzurechnen und die Materialparameter iterativ anzupassen. Je höher die Informationsdichte, desto genauer können die Flüssigtransportkoeffizienten ermittelt werden.

- Diffusionsversuch (Dry-Cup)
→ Prüfung μ -Wert bis 50% rel. Luftfeuchte
- Diffusionsversuch (Wet-Cup)
→ Prüfung μ -Wert und Flüssigtransport von 50 – 93% rel. Luftfeuchte

- Wasseraufnahmeversuch (Verlauf der Wasseraufnahme)
→ Prüfung Flüssigtransport D_{ws}
- Wasseraufnahmeversuch (Feuchteprofil über NMR-Scanner)
→ Prüfung Flüssigtransport D_{ws} und D_{ww}
- Weiterleitungsversuch (Feuchteprofil über NMR-Scanner)
→ Prüfung Flüssigtransport D_{ww}
- Trocknungsversuch (Verlauf der Trocknung)
→ Prüfung Flüssigtransport D_{ww}
- Trocknungsversuch (Feuchteprofil über NMR-Scanner)
→ Prüfung Flüssigtransport D_{ww}

3.3.3 NMR – Scanner

Mit der bereits erwähnten Nuklear Magnet Resonanz Messung (NMR, Abb. 10) kann das Feuchteprofil über die Länge einer Probe bei einem Versuch erfasst werden. Das empfangene Signal wird in Holzfeuchte umgerechnet. Die Feuchteprofile geben somit Auskunft wie schnell und wie weit das Wasser in die Probe transportiert wurde. Solche Profile helfen, die Flüssigtransportkoeffizienten iterativ anzupassen, dass sie mittels hygrothermischer Simulation nachgerechnet werden können. Die Probengröße ist durch den Scanner auf 40 x 40 x 80 mm begrenzt.

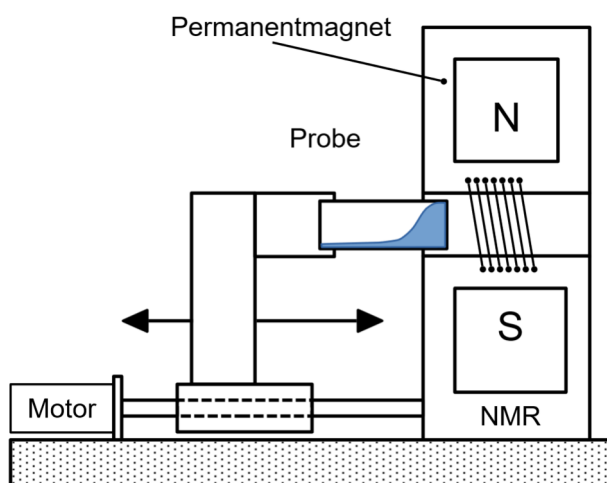


Abb. 10: Symbolbild des NMR Scanners
(Quelle: HBP / IBP)

In Abb. 11 sind beispielhaft zwei gemessenen Feuchteprofile nach einem 3-tägigen Wasseraufnahmeversuch zu sehen. Das linke Bild zeigt, dass die Probe nach 3 Tagen in radialer / tangentialer Richtung kaum Wasser aufgenommen hat und sich das Wasser nur bis in eine Tiefe von ca. 20 mm weiterverteilt wurde. Rechts wird eine Probe gezeigt, die über das Hirnholz deutlich mehr Wasser aufgenommen und es longitudinal fast bis zum Probenende (80 mm) transportiert hat.

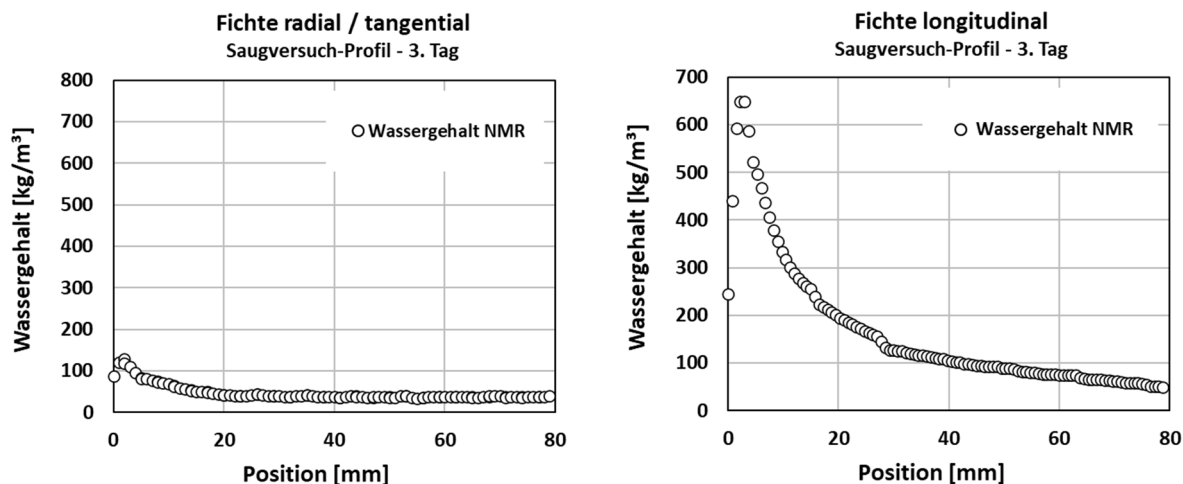


Abb. 11: Gemessenes Feuchteprofil aus dem NMR-Scanner nach 3 Tagen eines Wasseraufnahmeversuchs in beiden Richtungen. (Quelle: IBP / HBP)

3.3.4 Wasseraufnahmeversuch und Feuchteprofil (D_{ws})

Der steigende Wassergehalt aus dem Wasseraufnahmeversuch (Saugversuch) sollte mit dem Flüssigtransportkoeffizient Saugen (D_{ws}) nachsimulierbar sein. Gleiches gilt für das Feuchteprofil innerhalb des Querschnitts. Wie aus Abb. 12 (radial/tangential) und Abb. 13 (longitudinal) ersichtlich, sind beide Versuche mit den erzeugten Materialdatensätzen simulierbar. Der Unterschied aus Messung und Rechnung beim ersten Millimeter ist auf Grund des Versuchsaufbaus erwartbar. Die Proben werden in definierten Zeitabständen aus dem Wasser entnommen und feucht abgetupft. Nach dem Wiegen werden ihre Feuchteprofile im NMR-Gerät gescannt. Während dieses Vorgangs ist die Oberfläche geringfügig rückgetrocknet.

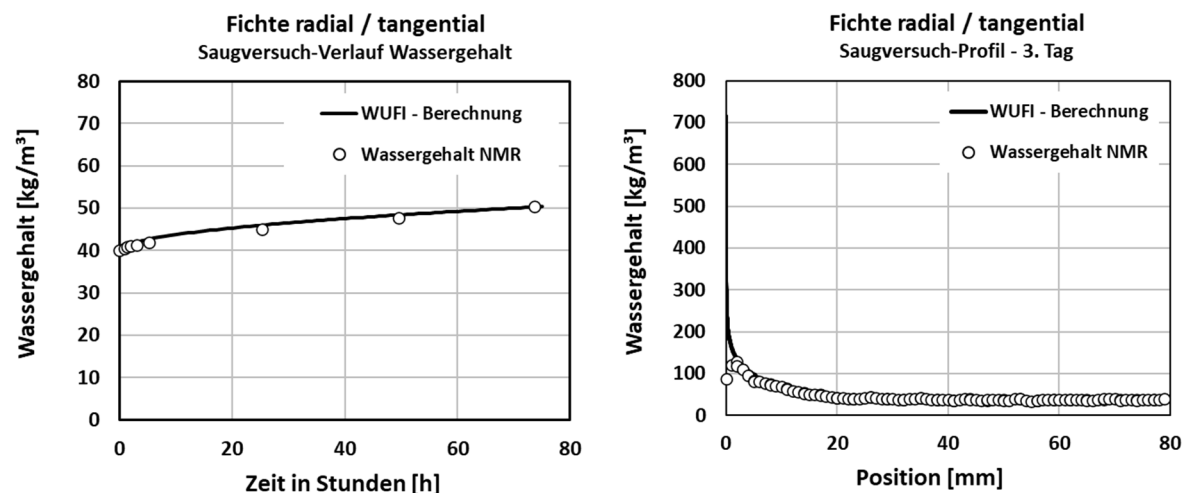


Abb. 12: **radiale/ tangentiale Richtung:** Saugversuch: Vergleich zwischen Messung (Kreise) und Rechnung (Linie). Links: Verlauf des Wassergehalts über die Zeit / Rechts: Feuchteprofil nach 3 Tagen des Versuchs. (Quelle: IBP / HBP)

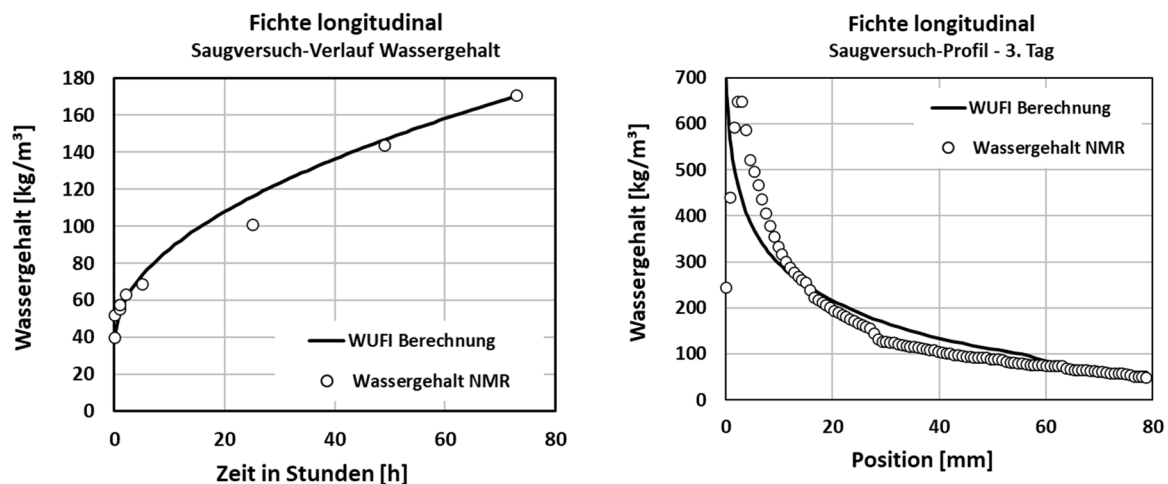


Abb. 13: **longitudinale Richtung**: Wasseraufnahme: Vergleich zwischen Messung (Kreise) und Rechnung (Linie). Links: Verlauf des Wassergehalts über die Zeit / Rechts: das Feuchteprofil nach 3 Tagen des Versuchs. (Quelle: IBP / HBP)

Der w -Wert für Fichte wurde zum einen über den normativen w -Wert-Versuch (Tab. 5, Spalte 1 und 2) und zum anderen über den Saugversuch ermittelt, bei dem die Wasseraufnahme und das Feuchteprofile während und am Ende des Versuchs mit einem NMR-Scanner erfasst wurde (Tab. 5, Spalte 3). Außerdem werden die Versuche nachgerechnet, woraus sich ein w -Wert ergibt. Es ist zu erwarten, dass die w -Werte ermittelt aus allen durchgeführten Messungen mehr oder weniger gleich sind. Wie Tab. 5 zeigt, weichen die Werte dennoch voneinander ab. Die Abweichungen können sowohl auf probenspezifische Faktoren (Materialstreuung, Probengröße; vgl. Kapitel 3.1.2) als auch auf methodenbedingte Einflüsse (Messungenauigkeiten, Messablauf) zurückgeführt werden. Beispielweise kann die geringe Trocknung während der NMR-Scans zu einer Reduktion der w -Werte führen, insbesondere in radialer / tangentialer Richtung, wo aufgrund der ohnehin niedrigen w -Werte bereits kleine Unterschiede daher stark auswirken. Alle Werte liegen dennoch in üblichen Toleranzbereichen.

Tab. 5: Vergleich w -Wert-Versuch / Saugversuch inkl. NMR-Messung und Nachrechnung

	Messung IBP w -Wert (10 x 10 x 1 cm)	Messung HBP w -Wert (8 x 8 x 8 cm)	Messung IBP (Saugvers - NMR) (4 x 4 x 8 cm)	WUFI-Material Nachrechnung Versuche
longitudinal w-Wert [kg/m²√h]	--	0,61 – 0,67	0,91 – 1,00	1,13
radial/tangential w-Wert [kg/m²√h]	0,11 - 0,12	0,07 – 0,08	0,07 – 0,09	0,12

3.3.5 Weiterverteilungsversuch – Feuchteprofil (D_{ww})

Nach dreitägigem Wasseraufnahmeversuch wird der Wasserkontakt unterbrochen und die Stirnflächen werden mit dampfdichter Folie versiegelt. Das aufgesaugte Wasser verteilt sich anschließend innerhalb der Proben weiter, ohne dass eine Austrocknung stattfindet. Die Feuchteprofile werden zu definierten Zeitpunkten mittels NMR-Scanner erfasst. Die Weiterleitung nach dem Saugversuch sollte ebenfalls mit dem geeigneten Flüssigtransportkoeffizient D_{ww} nachrechenbar sein. Die Kapillartransportkoeffizienten für die Weiterverteilung D_{ww} wurden iterativ bestimmt, so dass die Profile mit dem hygrothermischen Simulationsprogramm WUFI® nachberechnet werden konnte (Abb. 14 und Abb. 15).

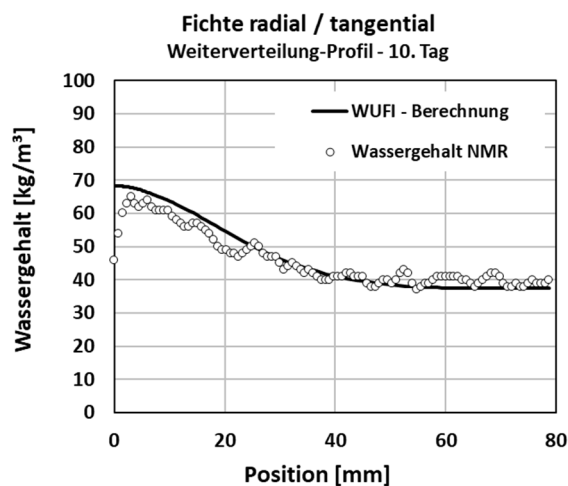


Abb. 14: **Weiterleitung radiale/ tangential**
Richtung: Vergleich zwischen Messung (Kreise) und Rechnung (Linie). Feuchteprofil nach 10 Tagen des Weiterleitungsversuchs (Quelle: IBP / HBP)

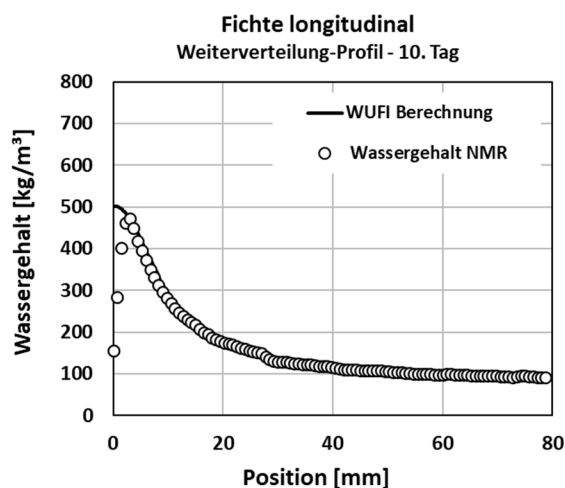


Abb. 15: **Weiterleitung longitudinale**
Richtung: Vergleich zwischen Messung (Kreise) und Rechnung (Linie). Das Feuchteprofil nach 10 Tagen des Weiterleitungsversuchs. (Quelle: IBP / HBP)

3.3.6 Trocknungsversuch – Feuchteverlauf (D_{ww})

Die gesättigten Proben (freie Wassersättigung nach 28 Tagen, siehe Kapitel 2.5) werden an fünf Seiten abgedichtet, sodass sie nur über eine Seite trocknen. Sie werden in einem konstanten Klima von 23 °C und 50% rel. Luftfeuchte so lange gelagert und regelmäßig gewogen, bis eine konstante Masse erreicht ist. Unter diesen Bedingungen wird die Feuchte in Proben

durch Konvektion an der Oberfläche, Dampfdiffusion und die kapillare Weiterleitung des flüssigen Wassers an die Luft transportiert. Es ist zu erwarten, dass die Feuchteprofile, die beim Weiterleitungsversuch mit D_{ww} gut nachsimuliert werden konnten, auch für den Trocknungsverlauf angemessen sind. Daher wird der Trocknungsversuch für radiale / tangential Richtung nachberechnet, um die aus der Weiterleitung ermittelten D_{ww} Werte zu verifizieren. (siehe Abb. 14 und Abb. 15)

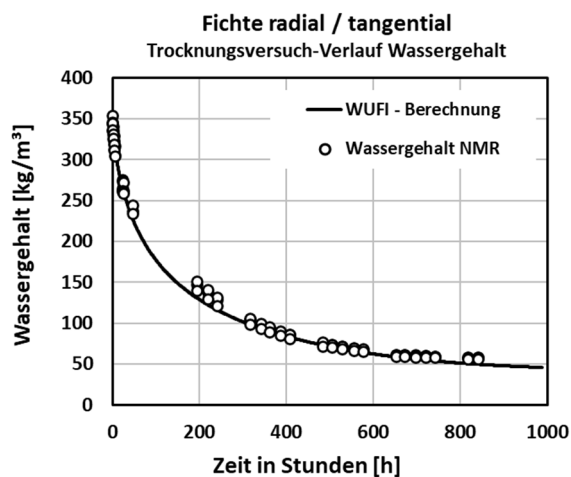


Abb. 16: **radiale/tangential Richtung:**
Vergleich zwischen Messung (Kreise) und Rechnung (Linie).
Verlauf des Wassergehalts beim Trocknungsversuch (Quelle: IBP / HBP)

Die zuvor ermittelten Flüssigtransportkoeffizienten (D_{ws} und D_{ww}) für Fichte radial/tangential und Fichte longitudinal befinden sich in der Zusammenfassung der Materialdaten in Kapitel 4.

3.3.7 Klebeschicht radial/tangential

Die mit dem NMR-Scanner ermittelte Feuchteverteilung nach dem Saugversuch der verklebten Proben zeigt, dass die Klebeschicht nahezu keinen kapillaren Wassertransport aufweist. (Abb. 17). Daher wird der Klebeschicht in hygrothermischen Simulationen ausschließlich ein Diffusionswiderstand (μ -Wert) zugewiesen.

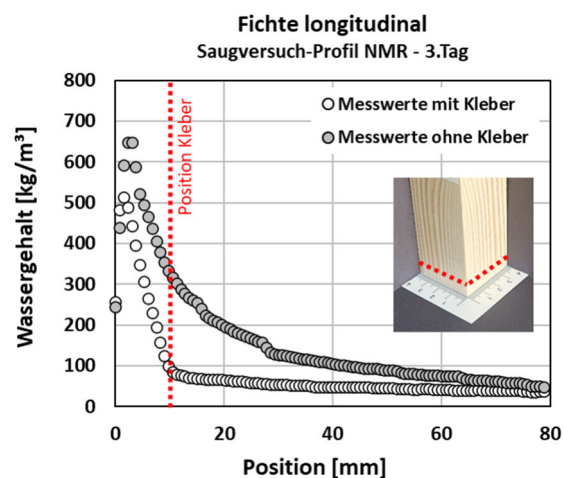


Abb. 17: **Fichte longitudinal:** Feuchteprofil nach 3 Tagen Saugversuch mit und ohne Kleberschicht. (Quelle: IBP / HBP)

Um den Diffusionswiderstand zu ermitteln, wird mittels WUFI® der Dry-Cup und der Wet-Cup Versuch nachberechnet. Die berechneten Werte werden den Messwerten gegenübergestellt.

Tab. 6: s_d -Werte¹⁾ der Klebeschicht. Die Rechnung erzeugt den gleichen Diffusionsstrom wie die Messung.

Richtung	Dry-Cup 3 – 50%		Wet-Cup 50 – 93%	
	s_d -Wert ¹⁾		s_d -Wert ¹⁾	
	Messung [m]	Rechnung [m]	Messung [m]	Rechnung [m]
radial/tangential	1,94	1,70	0,63	0,65

¹⁾ in der Software WUFI® werden dünne Schichten mit 1 mm angenommen.

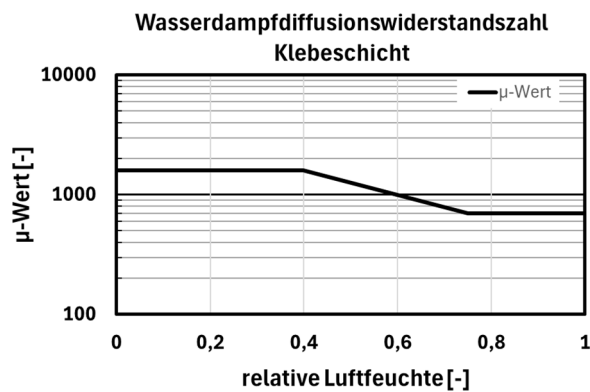


Abb. 18: Verlauf der Wasserdampf-
diffusionswiderstandszahl (μ)
(Quelle: IBP / HBP)

4 Zusammenfassung Materialdaten

Tab. 7: Gemessene und ermittelte Materialkennwerte der **Fichte longitudinal**

Eigenschaft	Einheit	Ergebnisse / Mittelwert		
Rohdichte (trocken)	kg/m³	407		
Porosität	-	0,73		
Spez. Wärmekapazität	J/kgK	1400		
Feuchtegehalt bei				
23°C / 50%	kg/m³ / M.-%		40 / 9,8	
23°C / 65%			52 / 12,8	
23°C / 80%			66 / 16,3	
23°C / 93%			89 / 21,8	
23°C / 97%			107 / 26,5	
freie Wassersättigung w _{f, 28d}	kg/m³ / M.-%	723 / 178		
max. Wassersättigung w _{max}	kg/m³ / M.-%	730 / 180		
Wärmeleitfähigkeit (trocken)	W/m·K	0,20		
Diffusionswider. μ (23°C 3-50%) ¹⁾	-	3,1		
Diffusionswider. μ (23°C 50-93%) ¹⁾		2,4		
Diffusionswiderstandszahl. μ (Aus Messwerten abgeleitet und mit Dry-Cup und Wet-Cup Versuchen nachsimuliert)	% -	r. Lf.	μ	
		0	3,2	
		25	3,2	
		50	2,75	
		100	2,75	
Wasseraufnahmekoeffizient w _{24h} A _{24h} = w / 60	kg/m²√h kg/m²√s	1,13 0,0188		
Flüssigtransport- Koeffizienten D _{ws} / D _{ww}	kg/m³ m²/s	Wasserg.	D _{ws}	D _{ww}
		40	3E-11	3E-11
		89	9E-10	9E-10
		107	4E-9	4E-10
		251	2E-9	4E-11
		354	5E-11	2E-12
1) Messwerte				

Tab. 8: Gemessene und ermittelte Materialkennwerte der **Fichte radial/tangential**

Eigenschaft	Einheit	Ergebnisse / Mittelwert			
Rohdichte (trocken)	kg/m³	407			
Porosität	-	0,73			
Spez. Wärmekapazität	J/kgK	1400			
Feuchtegehalt bei					
23°C / 50%	kg/m³ M.-%	40 / 9,8			
23°C / 65%		52 / 12,8			
23°C / 80%		66 / 16,3			
23°C / 93%		89 / 21,8			
23°C / 97%		107 / 26,3			
freie Wassersättigung w _{f, 28d}	kg/m³ M.-%	723 / 178			
max. Wassersättigung w _{max}	kg/m³ M.-%	730 / 180			
Wärmeleitfähigkeit (trocken)	W/m·K	0,095			
Diffusionswider. μ (23°C 3-50%) ¹⁾	-	151			
Diffusionswider. μ (23°C 50-93%) ¹⁾		31			
Diffusionswiderstandszahl μ (Aus Messwerten und aus der Literatur abgeleitet und mit Dry-Cup und Wet- Cup Versuchen nachsimuliert)	% -	r. Lf.	μ	r. Lf.	μ
		0	884	30	168
		5	884	35	136
		10	518	40	112
		15	362	45	93
		20	271	50	91
		25	211	100	91
Wasseraufnahmekoeffizient w _{24h} A _{24h} = w / 60	kg/m²√h kg/m²√s	0,12 0,002			
Flüssigtransport- Koeffizienten D _{ws} / D _{ww}	kg/m³ m²/s	Wasserg.	D _{ws}	D _{ww}	
		40	8,0E-11	8,0E-11	
		89	1,1E-10	1,1E-10	
		107	1,1E-10	--	
		377	2,0E-13	2,5E-09	
		723	5,0E-15	2,5E-09	

¹⁾ Messwerte

Tab. 9: Ermittelte Materialkennwerte der **Klebeschicht**

Eigenschaft	Einheit	Materiakennwerte		
Diffusionswiderstandszahl μ (bezieht sich auf eine 1 mm dicke Materialschicht)	% - m	r. Lf.	μ	sd
		0	1700	1,7
		40	1700	1,7
		75	650	0,65
		100	650	0,65
Der gesamte Feuchtetransport der Klebeschicht wird dem Diffusionswiderstand zugewiesen. Die Flüssigtransportkoeffizienten (DWS und DWW) sind nicht vorhanden. Die restlichen Daten entsprechen denen von Fichte radial/tangential				

5 Anhang (detaillierte Messwerte)

5.1 Rohdichte trocken ρ_0 Fichte

Tab. 10: Ermittelte Trockenrohdsichten ρ_0 Fichte (bei 103°C getrocknet) (HBP)

Nr. HBP	Masse trocken [g]	Volumen Trocken [mm ³]	Einzelwert ρ_0 [kg/m ³]	Mittelwert ρ_0 [kg/m ³]
FI 1	20,282	50784,2	399,4	407,0
FI 2	20,237	50903,2	397,6	
FI 3	22,546	49888,1	451,9	
FI 4	21,042	51051,0	412,2	
FI 5	20,137	51128,7	393,8	
FI 6	20,281	50866,3	398,7	
FI 7	20,718	50375,5	411,3	
FI 8	20,464	50904,9	402,0	
FI 9	20,190	50622,8	398,8	
FI 10	20,496	50643,6	404,7	

5.2 Sorptionsfeuchten

Tab. 11: Ermittelte Holzfeuchten u bei entsprechenden relativen Luftfeuchten (IBP)

Nr. IBP	Klima	Einzelwert u [M.-%]	Mittelwert u [M.-%] / [kg/m ³]
F564_A15	23°C / 65% Klimakammer	12,71	12,8 / 52
F564_A16		12,85	
F564_A17		12,79	
F564_A18	23°C / 80% Klimakammer	16,33	16,3 / 66
F564_A19		16,29	
F564_A20		16,27	
F564_A21	23°C / 93% Eksikkator ¹⁾ Ammoniumdihydro- genphosphat	21,9	21,8 / 89
F564_A22		21,8	
F564_A23		21,8	
F564_A24	23°C / 97% Eksikkator ¹⁾ Kaliumsulfat	26,94	26,5 / 107
F564_A25		25,89	
F564_A26		26,68	

5.3 Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl μ bzw. s_d -Wert

Tab. 12: Ermittelte Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahlen μ von Fichte radial/tangential (IBP) ohne Kleber

Nr. IBP	Dry-Cup 3 – 50%		Nr. IBP	Wet-Cup 50 – 93%	
	Einzelwert [-]	Mittelwert [-]		Einzelwert [-]	Mittelwert [-]
	161	151	F564_A10F	27	31
F564_A11T	117		F564_A11F	29	
F564_A12T	167		F564_A12F	34	
F564_A13T	174		F564_A13F	34	
F564_A14T	138		F564_A14F	30	

Tab. 13: Ermittelte Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl μ von Fichte radial/tangential (IBP) mit Kleber

Nr. IBP	Dry-Cup 3 – 50%		Nr. IBP	Wet-Cup 50 – 93%	
	Einzelwert [-]	Mittelwert [-]		Einzelwert [-]	Mittelwert [-]
F564_A10T_nV	247	251	F564_A10F_nV	65	65
F564_A11T_nV	235		F564_A11F_nV	56	
F564_A12T_nV	277		F564_A12F_nV	76	
F564_A13T_nV	280		F564_A13F_nV	72	
F564_A14T_nV	219		F564_A14F_nV	54	

Tab. 14: Berechneter s_d -Wert des Klebers radial/tangential (Dry-Cup) (IBP)

ohne Kleber		mit Kleber		Kleber alleine	
Dicke ¹⁾ [mm]	sd-Wert [m]	Dicke ¹⁾ [mm]	sd-Wert [m]	sd-Wert [m]	Mittelwert
20,7	3,34	20,0	4,95	1,61	1,94
20,3	2,38	20,0	4,71	2,33	
20,6	3,45	20,0	5,55	2,10	
20,5	3,56	20,0	5,62	2,06	
20,3	2,78	19,9	4,36	1,58	

¹⁾ die ungeklebten Proben können auf Grund einer Fuge dicker als die geklebten Proben sein.

Tab. 15: Berechneter s_d -Wert des Klebers radial/tangential (Wet-Cup) (IBP)

ohne Kleber		mit Kleber		Kleber alleine	
Dicke ¹⁾ [mm]	sd-Wert [m]	Dicke ¹⁾ [mm]	sd-Wert [m]	sd-Wert [m]	Mittelwert [m]
21,1	0,58	19,8	1,28	0,70	0,62
21,4	0,61	19,7	1,11	0,50	
21,2	0,72	19,8	1,50	0,78	
21,0	0,72	19,8	1,42	0,70	
20,9	0,62	19,7	1,06	0,44	

¹⁾ die ungeklebten Proben können auf Grund einer Fuge dicker als die geklebten Proben sein.

Tab. 16: Ermittelte Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahlen μ von Fichte longitudinal (IBP) ohne Kleber

Nr. IBP	Dry-Cup 3 – 50%		Nr. IBP	Wet-Cup 50 – 93%	
	Einzelwert [-]	Mittelwert [-]		Einzelwert [-]	Mittelwert [-]
F564_A5T	3,1	3,1	F564_A5F	2,3	2,4
F564_A6T	3,2		F564_A6F	2,4	
F564_A7T	3,1		F564_A7F	2,5	
F564_A8T	3,0		F564_A8F	2,4	
F564_A9T	3,0		F564_A9F	2,4	

Tab. 17: Ermittelte Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl μ Proben Fichte longitudinal (IBP) mit Kleber

Nr. IBP	Dry-Cup 3 – 50%		Nr. IBP	Wet-Cup 50 – 93%	
	Einzelwert [-]	Mittelwert [-]		Einzelwert [-]	Mittelwert [-]
F564_A5T_nV	5,0	4,9	F564_A5F_nV	3,7	3,9
F564_A6T_nV	5,2		F564_A6F_nV	4,0	
F564_A7T_nV	4,8		F564_A7F_nV	3,8	
F564_A8T_nV	4,3		F564_A8F_nV	3,5	
F564_A9T_nV	5,1		F564_A9F_nV	4,3	

6 Literatur

- [DIN EN 13755: 2008] Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung der Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck, Beuth-Verlag, Berlin, August 2008
- [DIN EN ISO 12570: 2018] Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Feuchtegehaltes durch Trocknen bei erhöhter Temperatur, Beuth-Verlag, Berlin, Juli 2018
- [DIN EN ISO 12571: 2022] Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften, Beuth-Verlag, Berlin, April 2022
- [DIN EN ISO 12572: 2025] Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Verfahren mit einem Prüfgefäß, Beuth-Verlag, Berlin, März 2025
- [DIN EN ISO 15148: 2018] Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen, Beuth-Verlag, Berlin, Dezember 2018
- [Fitz et al. 2004] Fitz, C., Krus, M., Zillig, W.: Untersuchungen zum Feuchteschutz von Leichtbaukonstruktionen mit Bauplatten aus Holzwerkstoffen, HTB-10/2004, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Holzkirchen, November 2004
- [Holm 2001] Holm, A.: Ermittlung der Genauigkeit von instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen mittels eines stochastischen Konzeptes, Dissertation, Universität Stuttgart, 2001
- [Kollmann 1982] Kollmann, F.: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*, 2. Auflage, Band 1, Springer-Verlag, Berlin, 1982
- [Krus 1995] Krus, M.: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe - Theoretische Grundlagen und neue Mess-techniken, Dissertation, Universität Stuttgart, 1995