

Krus, M.: Bestimmung feuchtetechnischer Kennwerte und Berechnung des Feuchtehaushalts von Holz-Prüfkörpern bei natürlicher Bewitterung. Tagungsband 5. Internationales Kolloquium – Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen. AEDIFICATIO Publishers, Freiburg 1999, S. 283-292.

Bestimmung feuchtetechnischer Kennwerte und Berechnung des Feuchtehaushalts von Holz-Prüfkörpern bei natürlicher Bewitterung

M. Krus

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

(Leiter: o. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis)

Zusammenfassung

Um den Feuchtehaushalt in Bauteilen aus Holz berechnen zu können, werden für das Eichenholz als Vertreter eines Laubholzes (Hartholz) und für das Fichtenholz als Vertreter eines Nadelholzes (Weichholz) die feuchtetechnischen Kennwerte bestimmt. Dabei zeigt sich, daß dieser Baustoff - wahrscheinlich aufgrund von Quellvorgängen - extrem unterschiedliche Kapillartransportkoeffizienten für die Weiterverteilung und den Trocknungsvorgang besitzt. Obwohl bei den am Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelten Rechenverfahren für instationären Wärme- und Feuchtetransport keine Unterscheidung zwischen Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung und den Trocknungsvorgang möglich ist, kann am Beispiel von Holz-Prüfkörpern unter natürlicher Bewitterung gezeigt werden, daß eine gute Übereinstimmung der Rechenergebnisse mit den Messungen erreichbar ist.

Stichwörter: Holz, Feuchtekenwerte, Bewitterung, Berechnung

Abstract

With oak as a representative for leaf-wood (hardwood) and spruce as a representative for conifers (softwood) the hygric material properties are determined to enable the calculation of the moisture balance in wooden building structures. It appeared that this building material shows, probably due to its extreme swelling properties, extremely different transport coefficients for the redistribution and the drying process. Although there is no possibility to distinguish between redistribution and drying in the computer model, which is developed at the Fraunhofer-Institute for building physics, it can be shown that a good agreement of calculation and measurement is obtainable. For this purpose wooden prisms are

exposed to natural weathering in a west oriented test wall and the course of their water content is determined by weighing.

Keywords: Wood, Hygric Properties, Weathering, Calculation

1. Problemstellung

Ganz besonders beim Baustoff Holz kann Wasser Schäden verursachen, die für den Bauherrn und Nutzer des Gebäudes einen großen Kostenaufwand bedeuten können. Wenn die Luftfeuchtigkeit der umgebenden Luft über längere Zeit höher als 80 % liegt, kann es bei Holz zum Wachstum von Pilzen kommen. Einige Pilzarten zerstören mit der Zeit das Gefüge des Holzes; das Holz beginnt zu faulen. Um den Feuchtehaushalt von Bauteilen und Baumaterialien zu ermitteln, können entweder langwierige und teure experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden oder es kann das am Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelte Programm WUFI [1] zur Berechnung von Feuchte- und Wärmetransportvorgängen eingesetzt werden. Mit diesem Programm konnte bei Verwendung einfacher Materialkennwerte [2] für mineralische Baustoffe eine ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen Rechnung und Experiment auch unter den komplexen natürlichen Randbedingungen erreicht werden (siehe z.B. [1 - 3]). Für Holz, dessen Eigenschaften sich in mancherlei Hinsicht von denen mineralischer Baustoffe unterscheiden, ist aber noch nicht geklärt, inwieweit Messung und Rechnung sich decken. Ziel dieser Arbeit ist zu zeigen, wie für Berechnungen notwendigen Stoffeigenschaften des Holzes bestimmt werden können und der Vergleich der Berechnungen mit Messungen bei Laborversuchen sowie bei natürlicher Bewitterung.

2. Probenmaterial

Holz unterscheidet sich von anderen kapillarporösen Materialien, denn es ist ein lebendes Material und aus Zellen aufgebaut. Ein wichtiger Unterschied liegt darin, daß die Zellwände im hygrokopischen Bereich bei Feuchteaufnahme und -abgabe relativ stark quellen und schwinden. Holz ist ein anisotropes Material, bei dem viele Materialeigenschaften, insbesondere auch die Feuchtetransporteigenschaften, für die drei verschiedenen Achsrichtungen stark unterschiedlich sind. Für die Untersuchungen, die in [4] ausführlicher beschrieben sind, wird die Fichte als Vertreter der Nadelhölzer (Weichhölzer) und die Eiche als Vertreter der Laubhölzer (Harthölzer) ausgewählt. Im Rahmen dieser Arbeit werden nur Ergebnisse für die axiale Richtung, in welcher der effektivste Wassertransport stattfindet, gezeigt.

3. Bestimmung der feuchtetechnischen Materialkennwerte

Zur Berechnung des Feuchtehaushalts eines Baustoffes werden zwei Transportkenngrößen benötigt, die Dampfdiffusions- und die Kapillarttransportkoeffizienten. Die thermischen Kennwerte sind der Literatur entnommen [5].

3.1 Dampfdiffusionswiderstandszahlen

Die bei unterschiedlichen Luftfeuchten ermittelten Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen sind Bild 1 dargestellt. Zum Vergleich sind auch der Literatur entnommene Werte hinzugefügt worden ([5, 6]). Die Meßergebnisse für die Eiche lassen eine gute Übereinstimmung zu den Literaturwerten erkennen. Die Widerstandszahl nimmt mit steigender mittlerer Luftfeuchte stark ab. Insgesamt kann dieses Holz bezüglich axialer Transportrichtung als sehr diffusionsoffen bezeichnet werden. Bei der Fichte ergeben sich noch niedrigere Werte, ebenfalls mit stark sinkendem Widerstand bei ansteigender Feuchte. Es werden Diffusionswiderstandszahlen im hohen Feuchtebereich gemessen, die bei 1 oder darunter liegen. Dies kann nur dadurch erklärt werden, daß hierbei der Diffusion ein sehr großer Transport in flüssiger Phase überlagert ist (vergleiche [7]).

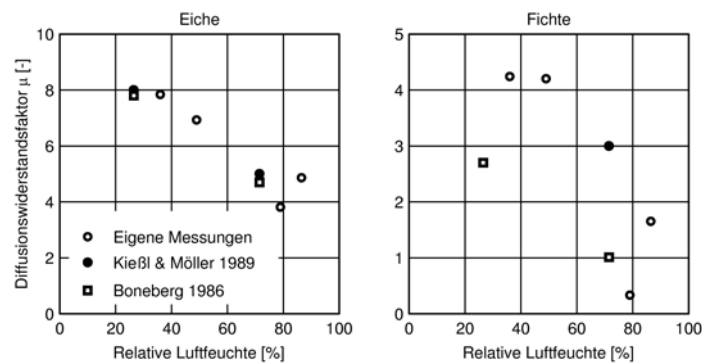


Abbildung 1: Gemessene Difusionswiderstandszahlen in Abhängigkeit von der mittleren relativen Luftfeuchte.

3.2 Kapillartransportkoeffizienten

In Bild 2 sind die während des Saugversuches mit einer NMR-Anlage ermittelten Wassergehaltsprofile für die axiale Saugrichtung dargestellt. Es ergibt sich trotz der sehr langen Saugzeit von etwa 1300 Stunden lediglich eine Eindringtiefe (hier definiert als den Wendepunkt der Feuchteverteilung bei etwa 50 % Sättigung) von etwa 4 cm beim Eichenholz und 5,5 cm beim Fichtenholz. Dabei zeigt die Fichte aufgrund der höheren freien Wassersättigung höhere Feuchtegehalte. Aus diesen gemessenen Verteilungen sind die in Bild 3 gezeigten Kapillartransportkoeffizienten berechnet. Für die Eiche ergeben sich unterhalb eines auf die Sättigung bezogenen Wassergehaltes von 0,8 feuchteunabhängige Transportkoeffizienten. Oberhalb dieses Feuchtegehaltes steigt der Koeffizient kontinuierlich an. Die Fichte zeigt ein ähnliches Bild

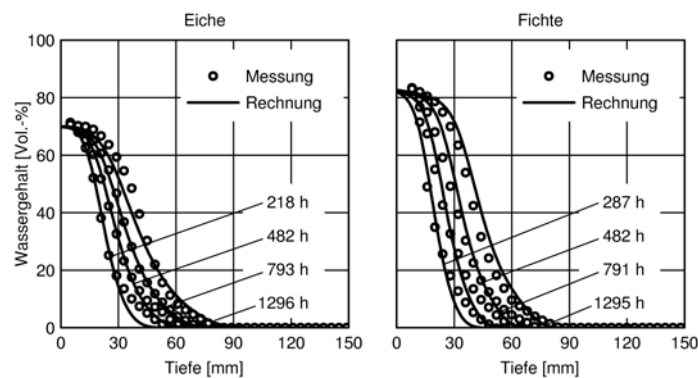


Abbildung 2: Gemessene (Punkte) und berechnete (Linien) Feuchteverteilungen während des Saugvorgangs.

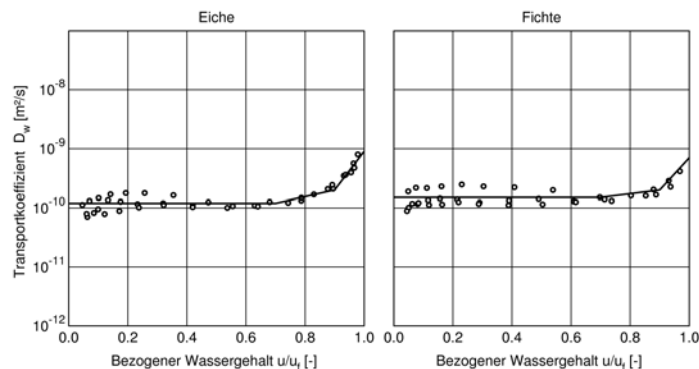


Abbildung 3: Aus den Feuchteprofilen (siehe Bild 2) bestimmte Transportkoeffizienten für den Saugvorgang.

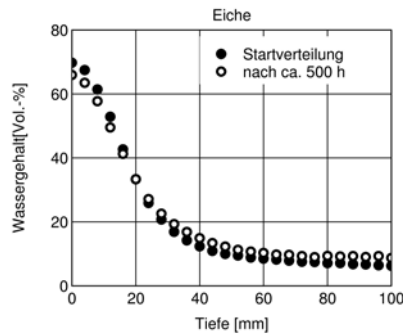


Abbildung 4: Während der Weiterverteilung gemessene Feuchteprofile mit dem Unterschied, daß erst ab einem bezogenen Feuchtegehalt von 0,9 ein Anstieg zu erkennen ist. Die im Anschluß an die Saugversuche durchgeführten Messungen zur Bestimmung der Transportkoeffizienten für die kapillare Weiterverteilung ergeben selbst 500 Stunden nach Unterbrechung der Wasserzufuhr kaum veränderliche Feuchteprofile (siehe Bild 4). Dies bedeutet, daß keine oder zumindest nur eine extrem geringfügige Weiterverteilung stattfindet. Dies wurde für beide Holzarten beobachtet.

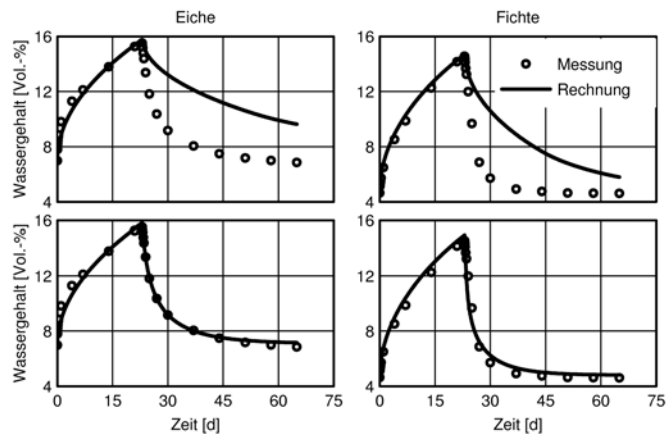


Abbildung 5: Verlauf des Wassergehaltes während des Saug- und Trocknungsversuchs unter Laborbedingungen. Während für den Saugvorgang eine gute Übereinstimmung von Rechnung und Messung erreicht wird, sind für die Trocknung große Abweichungen vorhanden (obere Abbildungen). Erst bei Verwendung der approximierten Transportkoeffizienten wird eine gute Übereinstimmung erreicht (untere Abbildungen).

4. Vergleich von Mess- und Rechenergebnissen

4.1. Laboruntersuchungen

Der Verlauf der Wasseraufnahme während eines 23-tägigen Saugversuchs ist in Bild 5 als Meßpunkte eingetragen. Sowohl für die Eiche als auch für die Fichte ergibt sich erwartungsgemäß eine gute Übereinstimmung des Rechenergebnisses (Linie) mit der Messung. In Bild 5 ist außerdem der Verlauf der Wasserabgabe während der anschließenden Trocknungsphase dargestellt. Man erkennt, daß bei beiden Holzarten anfänglich eine sehr schnelle Trocknung stattfindet, die dann asymptotisch zur Ausgleichsfeuchte geht. Auch hier ist das Rechenergebnis als durchgezogene Linie aufgeführt. Dabei wurde, entsprechend den Ergebnissen der NMR-Messungen, davon ausgegangen, daß keine Weiterverteilung stattfindet. Die Rechnung stimmt hier nicht mit der Messung überein, da sie eine wesentlich langsamere Trocknung ergibt. Aus diesem Grund werden zusätzlich Approximationsverfahren für die Bestimmung der Transportkoeffizienten eingesetzt, dabei werden für die Trocknung die Transportkoeffizienten durch iterative Anpassung von berechnetem und gemessenem Trocknungsverlauf ermittelt (siehe [8]).

Die für diese Approximationsverfahren notwendigen feuchtetechnischen Grundkennwerte (freie Wassersättigung, u_{80} und w -Wert) sind in Tabelle 1 zusammen mit den approximierten Transportkoeffizienten aufgelistet. Für den Saugvorgang ergeben sich nur geringfügig feuchteabhängige Koeffizienten ähnlich denen aus der NMR-Messung. Überraschend sind jedoch die Transportkoeffizienten für die Trocknung. Im Gegensatz zu mineralischen Baustoffen, bei denen diese immer kleiner als die für den Saugvorgang sind und ganz besonders im Gegensatz zu den dargestellten Meßergebnissen aus der NMR-Messung für die Weiterverteilung, liegen hierbei die Koeffizienten zum Teil um mehrere Zehnerpotenzen über denen des Saugvorgangs. Mit diesen Transportkoeffizienten durchgeführte Berechnungen lassen für beide eine gute Übereinstimmung mit den Messungen für die Wasseraufnahme und die Trocknung (vergleiche Bild 5) erzielen.

Tabelle 1 Zusammenstellung der feuchtetechnischen Kennwerte

Holzart	freie Sättigung u_f [Vol.-%]	Praktischer Wassergehalt u_{80} [Vol.-%]	Wasseraufnahmekoeffizient w [kg/m ² √h]	Kapillartransportkoeffizienten exponentielle Approximation			
				Saugen		Weiterverteilen	
				D_{wo} [m ² /s]	D_{wf} [m ² /s]	D_{wwo} [m ² /s]	$D_{w wf}$ [m ² /s]
Eiche	50	11	0,6	$2 \cdot 10^{-10}$	$4,2 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$	2
Fichte	60	8	0,7	$2 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$	100

4.2 Freibewitterung

Der Verlauf des mittleren Wassergehalts ist für einen Beobachtungszeitraum von fast 80 Tagen in Bild 6 als Meßpunkte dargestellt. Ausgehend von einem Wassergehalt von etwa 4.5 Vol.-% entsprechend der Sorptionsfeuchte bei 50 % rel. Luftfeuchte steigt der Wassergehalt der Fichte aufgrund der Schlagregenereignisse im Untersuchungszeitraum bis auf maximal 7.5 Vol.-% an, trocknet dann aber wieder fast bis auf den Anfangswassergehalt aus. Bei der Eiche ergibt sich ein ähnlicher Verlauf auf etwas höherem Niveau, aber mit geringerer Schwankungsbreite.

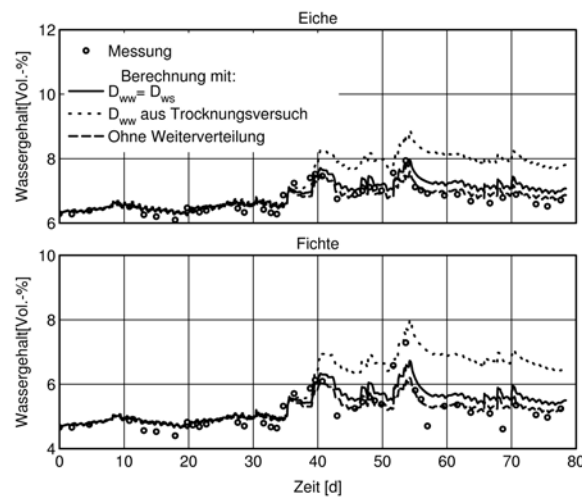


Abbildung 6: Verlauf des Wassergehaltes von bewitterten Holzproben während eines Beobachtungszeitraums von fast 80 Tagen.

Für die Berechnung des Feuchtehaushalts stellt sich das Problem der Wahl der geeigneten Transportkoeffizienten. Aus den NMR-Messungen ergeben sich extrem niedrige Koeffizienten für die Weiterverteilung, wogegen die Trocknungsversuche extrem hohe Koeffizienten liefern, die deutlich über denen des Saugvorgangs liegen. Deshalb wird für die Berechnungen als Kompromiß angenommen, daß die Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung bzw. Trocknung gleich groß sind wie die für den Saugvorgang. Des weiteren wird berechnet, welche Verläufe sich ergeben würden, wenn für die Weiterverteilung die Transportkoeffizienten aus dem Trocknungsversuch eingesetzt werden und wenn ohne Weiterverteilung gerechnet wird. Die Ergebnisse der Berechnungen für den Fall gleicher Transportkoeffizienten (durchgezogene Linie) zeigen für Eiche sowie Fichte für die ersten 40 Tage eine sehr gute Übereinstimmung und für die weiteren 40 Tage eine gute Übereinstimmung mit etwas zu hoch liegenden Mittelwerten und im Vergleich zur Messung geringeren Schwankungsbreiten (Bild 6). Verwendet man

die Transportkoeffizienten aus dem Trocknungsversuch, erhält man in allen vier Fällen stetig ansteigende Wassergehalte (gepunktete Linie), die wesentlich über denen der Messung liegen. Ohne Weiterverteilung erhält sowohl für die Eiche (Bild 6 oben) als auch für die Fichte (Bild 6 unten) Verläufe, die etwas unterhalb den durchgezogenen Linien liegen und überraschenderweise der Messung noch näher kommen (gestrichelte Linie). Auch hierbei ist die Schwankungsbreite deutlich geringer als bei der Messung.

5. Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Die Transportkoeffizienten für den Weiterverteilungsvorgang sind, wegen der sehr langsamen Feuchtebewegung bei der Weiterverteilung im Holz, im Rahmen dieser Arbeit mit der NMR-Anlage nicht bestimmbar. Das Austrocknen des Holzes erfolgt, wie die Laborversuche zeigen, aber wesentlich rascher als es durch die Rechnung ohne Weiterverteilung wiedergegeben wird. Die aus diesem Grunde durchgeführte Bestimmung der Weiterverteilungskoeffizienten durch iterative Anpassung des berechneten an den gemessenen Trocknungsverlauf führt zu einem überraschenden Ergebnis. Die derart ermittelten Transportkoeffizienten sind nicht wie bei mineralischen Baustoffen kleiner als die für den Saugvorgang, sondern zum Teil um viele Zehnerpotenzen größer. Bei reiner Weiterverteilung sind höhere Transportkoeffizienten als für den Saugvorgang physikalisch unsinnig, das heißt, es muß hier ein weiterer Transportmechanismus vorliegen. Bei diesem Material ist es naheliegend, den Grund für dieses abweichende Verhalten im Quellvermögen des Holzes zu suchen. Der Unterschied zwischen Weiterverteilen und Trocknen besteht darin, daß beim Weiterverteilen der Feuchtetransport in das trockene ungequollene Holz stattfindet. Die Saugkraft der kleinen Kapillaren, die bei der Weiterverteilung durch Leersaugen der großen Kapillaren zu einem Weitertransport ins Materialinnere führen, ist anscheinend nicht ausreichend groß, um einen wirklichen Transport zu ermöglichen. Beim Trocknungsvorgang findet der Transport aus dem gequollenen Zustand heraus statt. Die sehr hohen dafür ermittelten Transportkoeffizienten erwecken den Eindruck, daß das Wasser aus dem Holz "herausgepreßt" wird. Anders sind Transportkoeffizienten, die bis $100 \text{ m}^2/\text{s}$ erreichen, nicht zu erklären.

Bei dem Berechnungsprogramm WUFI kann nicht zwischen Weiterverteilen und Trocknung unterschieden werden. Es werden deshalb drei Berechnungsvarianten durchgeführt. Bei der ersten Variante werden die Transportkoeffizienten für das Weiterverteilen denen des Saugvorgangs gleichgesetzt, was zu einer recht guten Übereinstimmung mit der Messung führt. Bei Verwendung der aus dem Trocknungsversuch ermittelten Koeffizienten (Variante 2) ergeben sich dagegen viel zu große Wassergehalte. Überraschenderweise erhält man bei der dritten Variante ohne Weiterverteilung die beste Übereinstimmung des Gesamtverlaufs

mit der Einschränkung, daß die Schwankungsbreite deutlich unter der gemessenen liegt. Die beschriebene Übereinstimmung dürfte aber, falls durch längeren Wasserkontakt die Feuchte wesentlich tiefer in das Holz eindringt, nicht zu erreichen sein, da dann die ermittelten unterschiedlichen Transportkoeffizienten für Weiterverteilung und den Trocknung zum Tragen kommen.

6. Literatur

- [1] Künzel, H.M.: *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*. Dissertation, Universität von Stuttgart 1994.
- [2] Krus, M.: *Feuchtetransport- und Speicher coefficientsporöser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken*. Dissertation, Universität von Stuttgart 1995.
- [3] Krus, M., Künzel, H.M.: *Vergleich experimenteller und rechnerischer Ergebnisse anhand des Austrocknungsverhaltens von Ziegelwänden*. Internationales Symposium of CIB W67 Energy and Mass Flow in the Life Cycle of Buildings. Wien, 4.-10. August 1996, S. 493-498.
- [4] Vik, T.A.: *Bestimmung geeigneter feuchtetechnischer Stoffeigenschaften von Holz und Berechnung des Feuchtehaushaltes unter Verwendung der ermittelten Kennwerte*. Norwegische Technische Hochschule Trondheim, Diplomarbeit 1996.
- [5] Kollmann, F.: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Springer Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1951 - Erster Band. Zweite Auflage, Reprint 1982.
- [6] Kießl, K., Möller, U.: *Zur Berechnung des Feuchteverhaltens von Bauteilen aus Holz- und Holzwerkstoffen*. Holz als Roh- und Werkstoff **47** (1989), H. 8, S. 317-322.
- [7] Krus, M.: *Ist der Diffusionswiderstand von Baustoffen wirklich feuchteabhängig?* 9. Bauklimatisches Symposium Dresden, 14.-16. Sept. 1994, S. 287-302.
- [8] Holm, A., Krus, M.: *Bestimmung des Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung aus einfachen Trocknungsversuchen und rechnerischer Anpassung*. Bauinstandsetzen **4** (1998), H. 1, S. 33-52.