

Frank Vogel

Wasseraufnahme und Wasserabgabe (Trocknung) unter verschiedenen Bedingungen für Brettschichtholz

*Grobe quantitative Erfassung der Wasseraufnahme und
Wasserabgabe über das Hirn- und Seitenholz*

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Copyright © 2008 Diplomica Verlag GmbH
ISBN: 9783836630054

Wasseraufnahme und Wasserabgabe (Trocknung) unter verschiedenen Bedingungen für Brettschichtholz

Grobe quantitative Erfassung der Wasseraufnahme und Wasserabgabe über das Hirn- und Seitenholz

Frank Vogel

Wasseraufnahme und Wasserabgabe (Trocknung) unter verschiedenen Bedingungen für Brettschichtholz

*Grobe quantitative Erfassung der Wasseraufnahme und
Wasserabgabe über das Hirn- und Seitenholz*

Frank Vogel

Wasseraufnahme und Wasserabgabe (Trocknung) unter verschiedenen Bedingungen für Brettschichtholz

Grobe quantitative Erfassung der Wasseraufnahme und Wasserabgabe über das Hirn- und Seitenholz

ISBN: 978-3-8366-3005-4

Herstellung: Diplomica® Verlag GmbH, Hamburg, 2009

Zugl. Fachhochschule Deggendorf, Deggendorf, Deutschland, Diplomarbeit, 2008

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden und der Verlag, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

© Diplomica Verlag GmbH

<http://www.diplomica.de>, Hamburg 2009

Vorwort

Als mir die Diplomarbeit angeboten wurde, war ich sofort bereit, diese zu bearbeiten. Dieses Thema finde ich sehr interessant. Besonders reizte mich, dass dieses Thema noch nicht genau in der Fachliteratur beschrieben ist. Daher war es schwierig, die nötige Literatur zu bekommen. Alle Bücher oder Skripten schreiben zwar über dieses Thema, geben aber keine ausreichenden Aussagen über die Geschwindigkeit und die genauen Mechanismen der Wasseraufnahme in Hölzern und besonders in Brettschichtholz.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei den Mitarbeitern des Labors des Fachbereiches bedanken, die mir immer bei Problemen schnell und unkompliziert geholfen haben. Weiter möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Sägewerkes Ebner in Achslach für das zur Verfügung stellen der Trockenkammer bedanken. Ohne die Trockenkammer hätten die Trocknungsversuche sicher sehr viel mehr Zeit in Anspruch genommen. Besonders möchte ich mich aber bei Herrn Dipl. Ing. Peter Bertsche für die hervorragende Betreuung der Diplomarbeit bedanken.

Als letztes möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mich während meines Studiums immer unterstützt hat.

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist zu klären, ob die nach VOB § 4 #5 verlangten Schutzmaßnahmen gegen Niederschlagswasser ausreichend sind.

Des weiteren soll diese Arbeit die Frage beantworten, ob große Holzquerschnitte in Konstruktionen, die der Nutzungsklasse 2 zuzuordnen sind mit einem geeigneten Hirnholz- und Seitenholzschutz gegen eine übermäßige Feuchteauf- und Feuchteabgabe geschützt werden können.

Dazu wurden 17 Versuche durchgeführt. Dabei wurden Leimhölzer mit den Abmessungen 0,30 x 0,32 x 1,50 m als Probekörper verwendet. Die Versuche unterteilten sich in 3 große Serien. Der erste Teilbereich war eine einseitige Wassereinwirkung des Hirnholzes (mit und entgegen der Schwerkraft) oder des Seitenholzes. Im zweiten Abschnitt wurden die Probekörper vollständig (sechsseitig) befeuchtet. Im dritten Bereich wurden die Probekörper bis auf einen Feuchtigkeitsgehalt über 23 Massenprozent gewässert, teilweise mit Imprägnierungen behandelt oder mit Klemmungen versehen und anschließend in einer Trockenkammer in einem Zeitraum von vier Tagen getrocknet.

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass auf einen wirksamen Holzschutz bei einer Wassereinwirkung oder bei der Trocknung nicht verzichtet werden darf. Die Wasseraufnahmekoeffizienten der imprägnierten Prüfkörper lagen teilweise sogar sehr deutlich unter den Wasseraufnahmekoeffizienten der ungeschützten Prüfkörper.

Weiterhin konnte mit den Versuchen aufgezeigt werden, dass rund 25 % des Feuchtigkeitshaushaltes des Holzes über das Seitenholz getätigt wird.

Inhaltsverzeichnis

1	Feuchtigkeitshaushalt des Bauholzes	7
1.1	Erläuterung der relevanten Begriffe	7
1.1.1	Holzfeuchtigkeit	7
1.1.2	Wassereindringkoeffizient	8
1.1.3	Wasseraufnahmekoeffizient.....	10
1.1.4	Sorption	11
1.1.5	Trocknung	14
1.2	Berechnungsmethoden	15
1.2.1	Wassereindringkoeffizient	15
1.2.2	Wasseraufnahmekoeffizient.....	17
2	Versuche.....	19
2.1	Vorversuche.....	22
2.1.1	Vorversuch mit Imprägnierung	23
2.1.2	Vorversuch ohne Imprägnierung	24
2.1.3	Auswertung	26
2.2	Versuche mit stehenden Prüfkörpern	27
2.2.1	Versuch 1, Wasseraufnahme über unteres ungeschütztes Hirnholz	27
2.2.2	Versuch 2, Wasseraufnahme über oberes ungeschütztes Hirnholz	35
2.2.3	Versuch 3, Wasseraufnahme über unteres geschütztes Hirnholz	41
2.2.4	Versuch 4, Wasseraufnahme über unteres geklemmtes Hirnholz	45
2.2.5	Auswertung	50
2.3	Versuche mit liegend angeordneten Prüfkörpern und einseitiger Wasseraufnahme	54
2.3.1	Versuch 5, einseitige Wasseraufnahme über Seitenholz, Seitenholz nicht imprägniert.....	54
2.3.2	Versuch 6, einseitige Wasseraufnahme über Seitenholz, Seitenholz und Hirnholz geschützt.....	60
2.3.3	Auswertung.....	66

2.4 Versuche liegend mit sechsseitiger Wasseraufnahme	71
2.4.1 Versuch 7, Holz nicht imprägniert.....	71
2.4.2 Versuch 8, Seitenholz und Hirnholz imprägniert	76
2.4.3 Versuch 9, Hirnholz geklemmt, Seitenholz imprägniert	81
2.4.4 Versuch 10, Hirnholz geschützt, Seitenholz unbehandelt.....	86
2.4.5 Auswertung.....	90
2.5 Trocknungsversuche.....	93
2.5.1 Versuch 11, unbehandeltes Holz	94
2.5.2 Versuch 12, Holz nach dem Wässern mit kompletter Imprägnierung	100
2.5.3 Versuch 13, Hirnholz geklemmt, Seitenholz imprägniert	105
2.5.4 Versuch 14, mit Seitenholzimprägnierung.....	111
2.5.5 Versuch 15, einseitig gewässert, komplett imprägniert	117
2.5.6 Auswertung	123
3 Fazit der Diplomarbeit	127
3.1 Auswertung der kompletten Versuche	127
3.1.1 Hirnholz.....	127
3.1.2 Seitenholz.....	128
3.1.3 komplett befeuchteter Holzquerschnitt	129
3.2 Feuchtigkeitshaushalt des Holzes.....	129
3.2.1 Hirnholz	130
3.2.2 Seitenholz	130
3.2.3 Vergleich	130
4 Anhang	131
4.1 Verzeichnis der Bilder	131
4.2 Verzeichnis der Tabellen.....	133
4.3 Ergebnisse zur Versuche in tabellarischer Form	137
4.1.1 Vorversuche.....	137
4.1.2 Versuch 1	144
4.1.3 Versuch 2	149
4.1.4 Versuch 3	153

4.1.5 Versuch 4	157
4.1.6 Auswertung.....	159
4.1.7 Versuch 5	161
4.1.8 Versuch 6	168
4.1.9 Auswertung.....	175
4.1.10 Versuch 7	179
4.1.11 Versuch 8	182
4.1.12 Versuch 9	185
4.1.13 Versuch 10	188
4.1.14 Auswertung.....	191
4.1.15 Versuch 11.....	193
4.1.16 Versuch 12.....	196
4.1.17 Versuch 13.....	199
4.1.18 Versuch 14.....	202
4.1.19 Versuch 15.....	205
4.1.20 Auswertung.....	208
 4.4 Zeichnungen zur Anordnung der Messpunkte	210
 4.5 Literaturverzeichnis.....	216

1 Feuchtigkeitshaushalt des Bauholzes

Im ersten Kapitel sollen die wichtigsten Begriffe, die für dieses Thema relevant sind, erläutert werden. Des weiteren soll die Berechnung beziehungsweise die Bestimmung dieser Begriffe dargestellt werden.

1.1 Erläuterung der relevanten Begriffe

1.1.1 Holzfeuchtigkeit

Der Werkstoff Holz besitzt aufgrund seiner makroskopischen Kapillarporosität eine sehr große innere Oberfläche. Er kann durch diese Eigenschaft Feuchtigkeit aus seiner Umgebung aufnehmen beziehungsweise an sie abgeben. Die Holzfeuchte wird in Bezug auf das darrtrockene (wasserfreie) Holz angegeben und besitzt als Einheit Massenprozent (als Abkürzung M.-%). Die Feuchtigkeit des frisch geschlagenen Holzes beträgt je nach Art, Fällzeit und Standort 50 bis 150 M.-%, wobei aufgrund des Aufbaues des Holzes die Feuchtigkeit im Kern bei Kernholzbäumen geringer als im Splintholz ist.

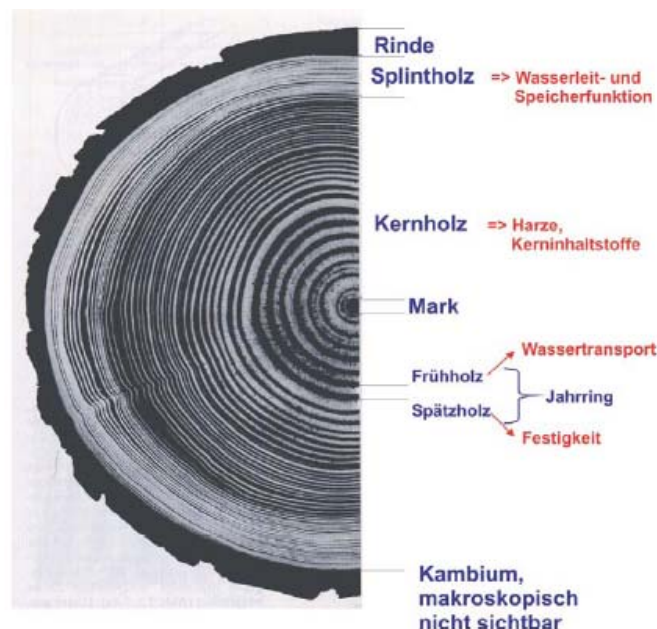


Bild 1.1: Querschnitt durch einen Nadelholzstamm [10]

Beim Austrocknen frisch geschlagenen Holzes mit oben genannten Feuchtegehalten diffundiert zuerst nur das freie Wasser aus dem makrokapillaren Hohlraumsystem. Erst wenn das gesamte freie Wasser an die Umgebung abgegeben wurde, kann das gebundene Wasser aus den feinen Poren der wassergesättigten Fasern der Zellwände verdunsten. Den Punkt ab dem das Holz kein freies, sondern nur noch gebundenes Wasser enthält, nennt man Fasersättigungspunkt oder Fasersättigungsfeuchtigkeit. Bei den europäischen Holzarten kann man von Fasersättigungsfeuchtigkeiten von 22 – 35 M.-% ausgehen. Im Mittel wird mit einer Fasersättigung bei 30 M.-% gerechnet. An der unteren Grenze liegen Nadelhölzer mit einem hohen Harzgehalt (Kiefer, Lärche) und ringporige Laubhölzer (Eiche). An der oberen Grenze liegen Nadelhölzer ohne Kern (Fichte, Tanne) und zerstreutporige Laubhölzer (Buche).

Vom Fasersättigungspunkt bis zu einer Feuchtigkeit von etwa 15 M.-% wird das Wasser in den Kapillaren angelagert. Von 15 – 6 M.-% wird es durch van – der – Waalssche Kräfte und unterhalb von 6 M.-% durch chemische Reaktionen an die Zellulosefasern gebunden.

1.1.2 Wassereindringkoeffizient

Der Wassereindringkoeffizient wird auch als Sauggeschwindigkeit bezeichnet und wird nach folgender Formel berechnet:

$$v = \frac{\text{Länge des Saugweges}}{\text{Zeit}} \rightarrow \frac{m}{\sqrt{h}}$$

Er gibt an, wie weit Wasser in der ersten Saugstunde im Baustoff kapillar befördert wird. Nach DIN 52183 erfolgt die Ermittlung des Wassereindringkoeffizienten durch Wasseraufsaugen an lotrechten, vierseitig abgedichteten Baustoffproben.

Die Kraft, die zur Meniskusbildung der benetzenden Flüssigkeit führt und damit zum Aufsteigen in die Kapillarporen, bestimmt das Wasseraufsaugvermögen und damit auch die Sauggeschwindigkeit. Diesen Vorgang nennt man Kapillarzug. Er ist von der Porengröße und dem Randwinkel der benet-

zenden Flüssigkeit auf den Feststoff abhängig. Je kleiner der Porenradius, umso größer ist der Kapillarzug. Der Benetzungswinkel ist von der Oberflächenspannung der Flüssigkeit abhängig. Das heißt, je kleiner der Randwinkel ist (je stärker eine Flüssigkeit benetzt), umso größer wird der Kapillarzug.

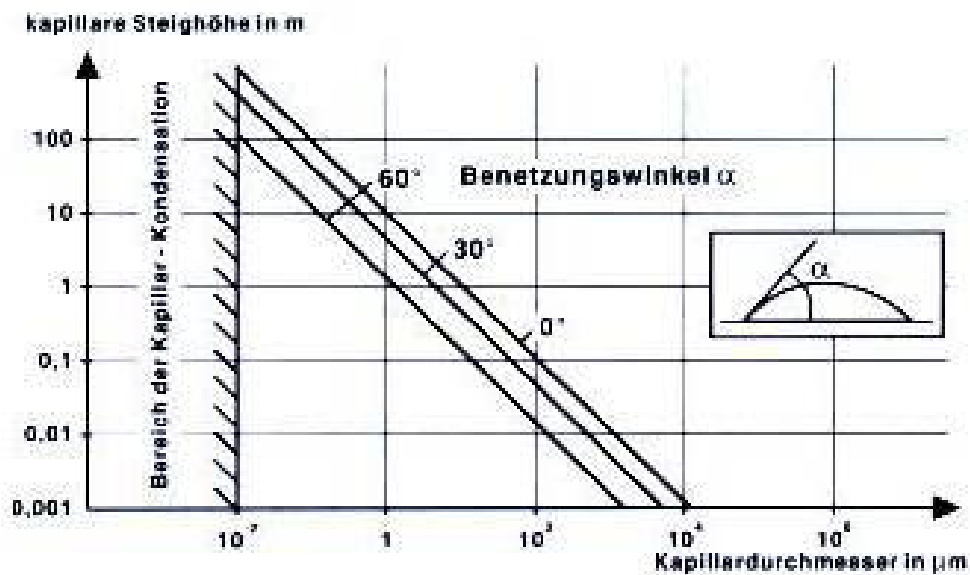


Bild 1.2: kapillare Steighöhe in Abhängigkeit des Benetzungswinkels α und des Kapillardurchmessers [12]

Tabelle 1.1: Zusammenhang zwischen Kapillardurchmesser und der maximalen Steighöhe max h

Kapillardurchmesser	1 mm	0,1 mm	0,01 mm	1 μm	0,1 μm
maximale Steighöhe	3 cm	30 cm	3 m	30 m	300 m

Die Tatsache, dass je kleiner der Porenradius ist, umso größer der Kapillarzug, trifft aber nur für senkrechte Kapillaren zu. Staufenbiel hat in seinem Buch Bauphysik und Baustofflehre in Versuch 1.15 gezeigt, dass Wasser in waagerechten, größeren Kapillaren schneller befördert wird als in engeren. Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse seiner Versuche und damit den

Zusammenhang zwischen dem Porendurchmesser und der Sauggeschwindigkeit.

Tabelle 1.2: Zusammenhang zwischen Kapillardurchmesser und der Saugeschwindigkeit in waagerechten Kapillaren

Kapillardurchmesser	1 mm	0,1 mm	0,01 mm	1 µm	0,1 µm
Geschwindigkeit v	50 m/min	5 m/min	50 cm/min	5 cm/min	5 mm/min

1.1.3 Wasseraufnahmekoeffizient

Der Wasseraufnahmekoeffizient wird im Allgemeinen auch als Saugfähigkeit bezeichnet und mit der folgenden Formel berechnet:

$$w = \frac{\text{Menge des aufgenommenen Wassers}}{\text{Fläche} \cdot \sqrt{\text{Zeit}}} \rightarrow \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}}}$$

Die Saugfähigkeit ist die Eigenschaft feinporiger Baukörper Wasser in die Feinporen zu saugen. Sie gibt an, wie viel Wasser in einer bestimmten Zeit durch eine Bauteiloberfläche hindurch aufgenommen wird. Der Wasseraufnahmekoeffizient trägt die Einheit kg/(m²·√h). Somit wird mit dem Wasseraufnahmekoeffizienten angegeben, wie viel Wasser durch einen Quadratmeter Bauteiloberfläche hindurch in der ersten Stunde eingesaugt wird.

Kommen porige, wasserbenetzbare Baustoffe mit Wasser in Kontakt, zieht der an den Menisken erzeugte Kapillardruck das Wasser in die Poren hinein. Die Wasserspeicherung im Bereich der sogenannten Kapillarkondensation wird durch die Füllung von Porenbereichen, beginnend bei den kleinsten Porenweiten und ansteigend zu immer größeren Porenweiten, erreicht.

Mit zunehmender Eindringtiefe wird der viskose Fließwiderstand des Wassers immer größer. Die Folge davon ist, dass die Eindringtiefe nur mit der Wurzel der Zeit linear zunimmt.

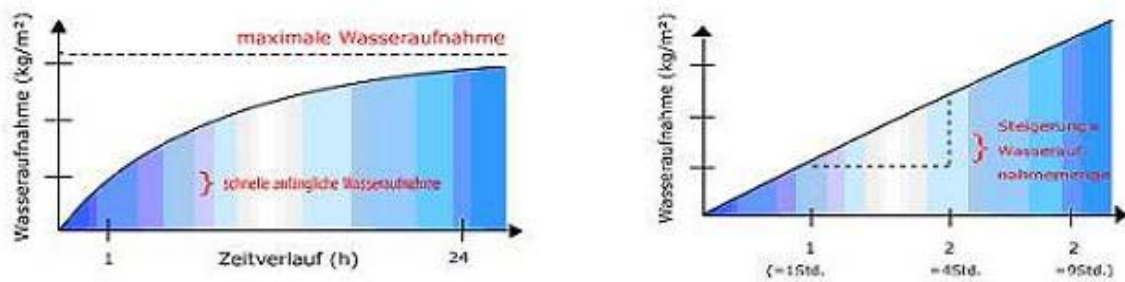


Bild 1.3: links: Wasseraufnahme nach der Zeit t rechts: Wasseraufnahme nach der Wurzelzeit $\sqrt{t}$ [2]

1.1.4 Sorption

Unter dem Begriff Sorption versteht man die Wasserdampfaufnahme und Wasserdampfabgabe eines porösen Baustoffes. Die Feuchte eines Baustoffes wird von den Sorptionseigenschaften bestimmt, wenn sich kein Kondenswasser bildet oder von außen kein Wasser in den Baustoff eindringen kann. Die Sorptionsfeuchte, auch Gleichgewichtsfeuchte genannt, stellt sich, wie der Name schon sagt, im Gleichgewicht mit der Luftfeuchtigkeit ein.

In diesem Zusammenhang wird zwischen der Adsorption, als Wasserdampfaufnahme bei der Zunahme der reinen Luftfeuchtigkeit, und Desorption als Wasserdampfabgabe bei Abnahme der relativen Luftfeuchte unterschieden. Die Sorption wird in 3 verschiedene Phänomene unterteilt, die Chemisorption, die Physisorption und die Kapillarkondensation.

Die Chemisorption ist eine starke chemische Bindung von Molekülen an der Porenoberfläche. Sie ist nicht reversibel.

Die Physisorption ist eine schwache physikalische Bindung, ähnlich den van-der-Waalschen Bindung, von Molekülen an der Porenoberfläche. Dieser Prozess ist prinzipiell reversibel, weil sich die Chemie des Stoffes durch diesen Vorgang nicht ändert.

Die Kapillarkondensation findet in kleinen Poren statt, da hier durch Oberflächenkräfte der Sättigungsdampfdruck des Wassers herabgesetzt ist.

Dieser Vorgang ist verzögert reversibel, in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit.

Der Anteil der Chemisorption ist in den meisten Fällen vernachlässigbar. In der Regel wird der wesentliche Anteil der Sorption von der Physisorption und der Kapillarkondensation übernommen.

Die Porenstruktur eines Baustoffes bestimmt im Wesentlichen das Sorptionsverhalten. Die Größe der inneren Oberfläche beeinflusst direkt den Anteil der Physisorption. Der Anteil der Kapillarkondensation findet nur in Poren mit einem Durchmesser <100 nm statt. Damit ist der Anteil der Kapillarkondensation fest mit dem Volumenanteil dieser Porengröße verbunden. Da die Kapillarkondensation nur verzögert reversibel ist, ist in Trocknungsversuchen (Desorption) mit zu kurzer Dauer eine höhere Sorptionsfeuchte zu beobachten als beim Befeuchten (Adsorption). Dieses Phänomen kann man als Hysterese bezeichnen. Die genaue Definition der Hysterese lautet: Das Zurückbleiben einer Wirkung hinter der sie verursachenden veränderlichen physikalischen Größe.

In Fällen, die keine Hysterese aufzeigen ist anzunehmen, dass die Kapillarkondensation keinen oder nur einen sehr geringen Anteil an der Sorption darstellt. Der Einfluss der Kapillarkondensation und damit der Hysterese ist in der Regel auf den Bereich hoher Luftfeuchten beschränkt.

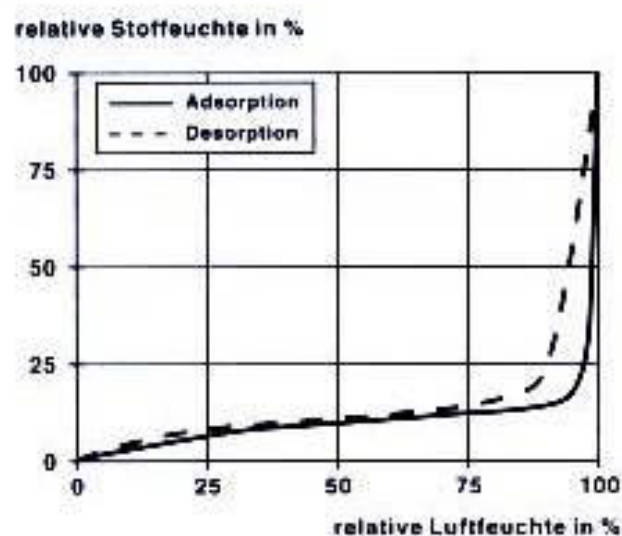


Bild 1.4: Effekt der Hysterese [12]

Graphisch trägt man die Sorption als Sorptionsisotherme auf. Sie zeigt den Zusammenhang zwischen der Stofffeuchte, der Luftfeuchtigkeit und einer bestimmten Temperatur an. Mit Hilfe der Isotherme kann man die Stofffeuchte in Abhängigkeit von der Luftfeuchte bestimmen. Bei besonders porösen Baustoffen ist der Einfluss der Temperatur verhältnismäßig klein und kann damit vernachlässigt werden.

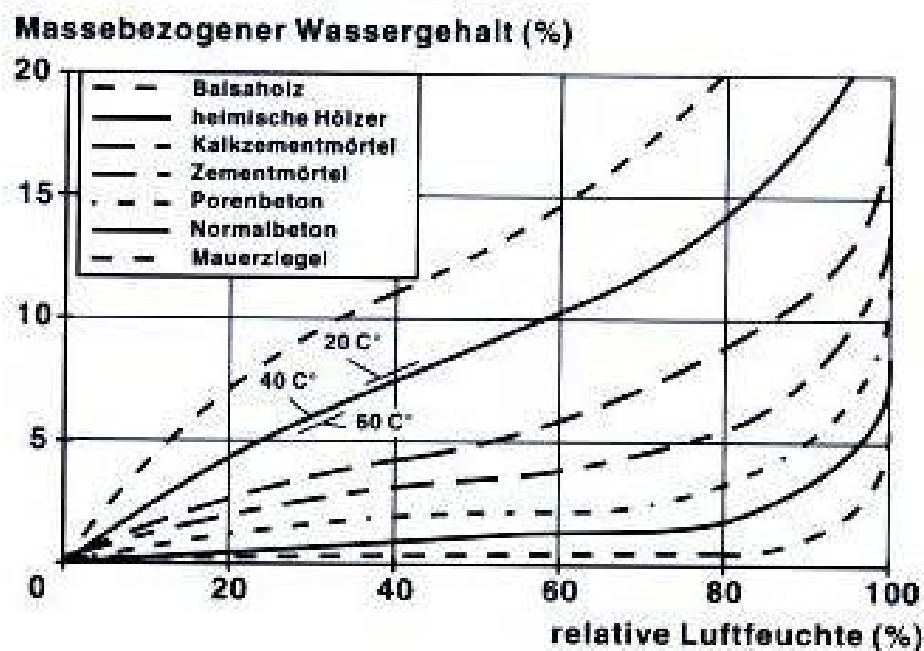


Bild 1.5: Sorptionsisotherme verschiedener Baustoffe [12]

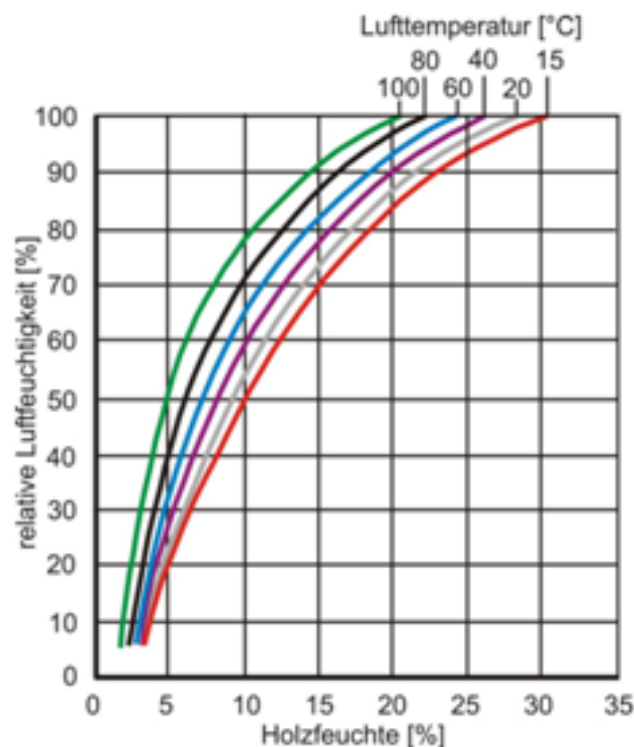


Bild 1.6: Sorptionsisotherme von Holz in Abhängigkeit der Luftfeuchte und der Temperatur [10]

1.1.5 Trocknung

Die Trocknung von porösen Baustoffen und somit auch von Holz, geschieht in 2 Abschnitten.

Im ersten Abschnitt bildet das Porenwasser Menisken am äußeren Rand der Kapillaren. Durch die Trocknung schwindet der Körper. An der Oberfläche verdunstet mindestens soviel Wasser, dass diese Menge der Volumenminde- rung des Körpers entspricht. Die Verdunstungsgeschwindigkeit bleibt über lange Zeit konstant, denn sie ist nicht von der Stoffart, sondern von äußeren Faktoren, wie der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit, der Bewegung der Luft und der Wärmestrahlung abhängig.

Im zweiten Abschnitt fällt die Verdunstungsgeschwindigkeit steil ab. Die Trocknung geschieht jetzt nicht nur an der Oberfläche, auch im Inneren des Körpers beginnt nun der Trocknungsprozess. Der dabei entstehende Wasserdampf muss erst einmal zur Bauteiloberfläche hin diffundieren um austreten zu können. Diesen Vorgang beeinflusst das Porengefüge sehr stark, denn der Wasserdampf kann nur durch die Poren an die Oberfläche des

Bauteiles gelangen. Der zweite Abschnitt endet mit der Gleichgewichtsfeuchte, die in Kapitel 1.1.4 erklärt wurde.

1.2 Berechnungsmethoden

Die Viskosität der Flüssigkeit und die Stärke des Kapillarzuges bestimmen die Geschwindigkeit des Transportes innerhalb der Kapillaren. Wenn man empirische Untersuchungen und theoretische Modelle vergleicht, kommt man zum übereinstimmenden Ergebnis, dass die kapillar aufgenommene Flüssigkeitsmenge pro Flächeneinheit und die Steighöhe proportional zur Wurzel aus der Zeit verlaufen. Aus diesem Grund wird das Saugverhalten poröser Baustoffe mit den Transportkoeffizienten angegeben.

Leider gilt dies nur für die Wasseraufnahme. Für die Feuchtigkeitsabgabe gibt es keine Koeffizienten. Dieser Prozess ist von zu vielen Bedingungen abhängig, um eine allgemein gültige Formel nach dem Vorbild der Wasseraufnahme zu entwickeln. Eines kann man allerdings sagen. Der Prozess der Wasserabgabe dauert länger als die Wasseraufnahme.

1.2.1 Wassereindringkoeffizient

Um den Wassereindringkoeffizienten ausrechnen zu können, muss man zuerst die Länge des Saugweges kennen. Diese Länge kann man nur in Versuchen bestimmen, denn man benötigt die dazugehörige Zeit.

Wenn der Durchmesser der Poren bekannt ist, kann man die maximale Steighöhe nach folgenden Berechnungsschema errechnen:

$G = F$	A = Querschnitt der Kapillarröhre	m ²
	d = innerer Kapillardurchmesser	m
$A * h * \rho * g = d * \pi * \sigma$	U = Umfang der Kapillare	m
	g = Erdbeschleunigung	9,81 m ² /s
$\frac{d^2 * \pi}{4} * h * \rho * g = d * \pi * \sigma$	G = Gewichtskraft	N
	h = kapillare Steighöhe	m
$h = \frac{d * \pi * \sigma * 4}{d^2 * \pi * \rho * g}$	p = Kapillardruck (-unterdruck)	N/m ²
	F = Kapillarkraft	N
	ρ = Dichte des Wassers	1000 kg/m ³
$max h = \frac{4 * \sigma}{d * \rho * g}$	σ = Oberflächenspannung des Wassers	≈0,075 N/m
		≈0,075 $\frac{(kg*m)}{(m*s^2)}$

Beispiel:

angenommener Kapillardurchmesser d = 0,01mm ⇒ d = 0,00001m

$$max h = \frac{4 * \sigma}{d * \rho * g}$$

$$max h = \frac{4 * 0,075 \frac{kg * m}{m * s^2}}{0,00001 m * 1000 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2}}$$

$$max h = \frac{0,3m}{0,1} = 3,0 m$$

Tabelle 1.3: Oberflächenspannung des Wassers infolge der Temperatur

Temperatur	Oberflächen- spannung Wasser (kg*m/m*s ²)
0 °C	0,0756
10 °C	0,0741
20 °C	0,0726

Die allgemeine Formel für den Wassereindringkoeffizienten lautet:

$$v = \frac{\text{Länge des Saugweges}}{\text{Zeit}} \rightarrow \frac{m}{\sqrt{h}}$$

Beispiel: Länge des Saugweges : 3,0 m

Saugzeit: 10 Stunden

$$v = \frac{l}{\sqrt{h}}$$

$$v = \frac{3,0m}{\sqrt{10}}$$

$$v = 0,95 \frac{m}{\sqrt{h}}$$

1.2.2 Wasseraufnahmekoeffizient

Die allgemeine Formel für den Wasseraufnahmekoeffizienten lautet:

$$w = \frac{\text{Menge des aufgenommenen Wassers}}{\text{Fläche} * \sqrt{\text{Zeit}}}$$

Als Zahlenbeispiel möchte ich ein Ergebnis der nachfolgend beschriebenen Versuche benutzen.

Im Versuch 1 betrug die benetzte Fläche 0,1022 m². Das in der Versuchszeit von 278,5 Stunden aufgenommene Wasser wurde anhand einer Ge-

wichtsmessung mit 1,2 Liter bestimmt. Diese Menge Wasser entspricht einer Masse von 1,2 kg. So ergibt sich folgender Berechnungsgang:

$$w = \frac{\text{Menge des aufgenommenen Wassers}}{\text{Fläche} * \sqrt{\text{Zeit}}} \rightarrow \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 * \sqrt{\text{h}}}$$

$$w = \frac{1,2}{0,1022 * \sqrt{278,5}}$$

$$w = 0,7036 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 * \sqrt{\text{h}}}$$

Es ergibt sich somit ein Wasseraufnahmekoeffizient von 0,7036 kg/(m²*√h)