

Feuchteverformungs- und Sorptionseigenschaften des verdichteten Holzes

Report**Author(s):**

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

Publication date:

2002

Permanent link:

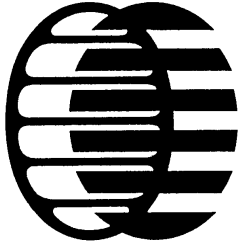
<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004894907>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Originally published in:

Int. Bericht ETHZ/HW-HP-LZfP 5



Professur Holzwissenschaften
Eidgenössische Technische Hochschule
ETH Zentrum
CH-8092 Zürich

Int. Bericht ETHZ/HW-HP-LZfP Nr. 5

**Feuchteverformungs- und Sorptionseigenschaften des
verdichteten Holzes**

R. POPPER, P. NIEMZ, G. EBERLE

Zürich, 01. Oktober 2002

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Material und Methodik	3
2.1	Versuchsmaterial.....	3
2.2	Versuchsdurchführung.....	4
2.2.1	Feuchtigkeitsgehalt.....	4
2.2.2	Das lineare Quellmass.....	4
2.2.3	Rohdichte.....	5
2.2.4	Relative Luftfeuchtigkeit.....	6
3	Resultate und Diskussion	7
3.1	Sorptionseigenschaften.....	7
3.2	Feuchteverformung: Lineare Quellung entlang der Sorptionsisotherme.....	9
3.3	Rohdichte.....	13
3.4	Feuchtigkeitsgehalt.....	14
4	Schlussfolgerungen	15
5	Literatur	16

1 Einleitung

Um das Schwachholz zu verwerten wurde an der Professur Holztechnologie, ETH Zürich eine Methode entwickelt, die es ermöglicht, das nasse Rundholz in eckige Balken (Formholz) zu verdichten (Schrepfer, 1997).

Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist es, das Feuchteverformungs- und das Sorptionsverhalten des verdichteten Rundholzes im gesamten hygroskopischen Bereich zu bestimmen und zu qualifizieren.

2 Material und Methodik

2.1 Versuchsmaterial

Als Versuchsmaterial diente verdichtetes Ahorn- (*Acer pseudoplatanus* L.) und Eschenholz (*Fraxinus excelsior* L.). Das nasse Rundholz wurde durch Anwendung von Druck und Temperatur in eckige Balken (Formholz) verdichtet. Die Apparatur sowie die Parameter der Verdichtungsmethode sind in der Arbeit von Schrepfer (1997) genau beschrieben. Die Proben wurden bei Ahornholz aus 4 (A1 bis A4) und bei Eschenholz aus 5 (E1 bis E5) verschiedenen Orten des verdichteten Balkens entnommen. An diesen Proben wurden Feuchteverformungs- und Sorptionsmessungen vorgenommen, wobei die maximalen Quellungswerte in den drei anatomischen Richtungen des Holzes im hygroskopischen Bereich zwischen 0% und 93% relativer Luftfeuchtigkeit bei einer

Temperatur von 20°C gemessen wurden. Die Untersuchungen wurden an je 4 Probeklötzchen (tangential x radial x axial = 2 x 2 x 1 cm) durchgeführt. Die Jahrringe verliefen in diesen Probenkörpern kantenparallel.

2.2 Versuchsdurchführung

Zur Einstellung der relativen Luftfeuchtigkeit dienten Behälter mit gesättigten Salzlösungen gemäss Tabelle 2-1. 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.

Die Temperatur betrug 20°C. Die Holzfeuchte wurde mittels Darrmethode bestimmt. Die Messung der Längenänderung erfolgte mit einem inkrementalen Wegaufnehmer, der über einen Datenlogger an einen Computer angeschlossen wurde. Zur Datenerfassung diente das Computerprogramm LOGGMA (POPPER, 1991). Als Bezugslänge der Feuchteverformung diente der Darrzustand. Das Gewicht der Proben wurde mittels einer elektronischen Waage, die über eine serielle Schnittstelle (RS 232c) an einen Computer angeschlossen wurde, ermittelt. Zur Gewichtserfassung diente das Computerprogramm WAAGMA (POPPER, 1991). Folgende Kenngrössen wurden geprüft:

2.2.1 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 2-1

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

wobei m_u Masse der feuchten Probe in g,

m_0 Masse der wasserfreien (darrtrockenen) Probe in g.

2.2.2 Das lineare Quellmass

Das Quellmass a_u ergibt sich bei Quellung vom darrgetrockneten auf den feuchten Zustand des Materials. Je nach dem für welche Richtung (tangential TG , radial RD und axial AX) und welchen Feuchtigkeitsgehalt u der Versuchsprobe die Ausmasse a ermittelt werden, unterscheidet man zwischen dem tangentialen a_{TG_u} , dem radialen a_{RD_u} und dem axialen Quellmass a_{AX_u} :

Gleichung 2-2

$$a_{TG_u} = 100 \cdot \frac{(a_{TG_u} - a_{TG_0})}{a_{TG_0}} \text{ in \%}$$

Gleichung 2-3

$$a_{RD_u} = 100 \cdot \frac{(a_{RD_u} - a_{RD_0})}{a_{RD_0}} \text{ in \%}$$

Gleichung 2-4

$$a_{AX_u} = 100 \cdot \frac{(a_{AX_u} - a_{AX_0})}{a_{AX_0}} \text{ in \%}$$

Das lineare Volumenquellmass a_{Vu} wird als Summe aus dem tangentialen, radialen und axialen Quellmass definiert:

Gleichung 2-5

$$a_{Vu} = a_{TG_u} + a_{RD_u} + a_{AX_u} \text{ in \%}$$

- wobei a_{TG_u} Tangentialabmessung der Probe bei Materialfeuchte u ,
 a_{TG_0} Tangentialabmessung der darrgetrockenen Probe,
 a_{RD_u} Radialabmessung der Probe bei Materialfeuchte u ,
 a_{RD_0} Radialabmessung der darrgetrockenen Probe,
 a_{AX_u} Axialabmessung der Probe bei Materialfeuchte u ,
 a_{AX_0} Axialabmessung der darrgetrockenen Probe.

Tabelle 2-1: Die verwendeten Klimate und ihre Erzeugung

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

2.2.3 Rohdichte

Die Rohdichte von Holz r 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 2-6

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

wobei m_N Masse der normalklimatisierten Probe in g ,
 V_N Volumen der normalklimatisierten Probe in cm^3 .

Ähnlich gilt für das trockene Holz:

$$r_0 = \frac{m_0}{V_0} \text{ in } g/cm^3,$$

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

2.2.4 Relative Luftfeuchtigkeit

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

Gleichung 2-7

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

wobei p_D Partialdruck des Wasserdampfes,
 p_s Sättigungsdruck.

3 Resultate und Diskussion

3.1 Sorptionseigenschaften

Tabelle 3-1 stellt die nach dem Hailwood-Horrobin Sorptionsmodell (1946) berechneten Werte für die spezifische Oberfläche des Sorbens (Σ), die Unzugänglichkeit des Sorbens (Z), das monomolekulare (U_m) und polymolekulare (U_p) Wasser sowie die Fasersättigungsfeuchtigkeit (U_{FS}) zusammen. Folgende Abbildungen 3-1 bis 3-3 zeigen die gemessenen und nach dem Hailwood-Horrobin Sorptionsmodell (HH-Modell) berechneten Isothermen des Versuchsmaterials.

Tabelle 3-1: Die nach dem HH-Modell berechneten Werte für das unbehandelte und verdichtete Ahorn- und Eschenholz

Probe	U_m (%)	U_p (%)	U_{FS} (%)	Z (%)	S (m^2/g)
Ahorn unb.	5.3	25.6	30.9	49	189
Esche unb.	5.5	26.7	32.2	47	197
A1	7.3	10.2	17.5	31	259
A2	5.6	11.4	17.0	47	199
A3	7.2	13.5	20.7	32	254
A4	6.3	14.8	21.2	40	225
E1	7.7	11.6	19.3	27	272
E2	9.4	11.8	21.2	10	333
E3	7.9	14.8	22.7	25	279
E4	9.5	11.3	20.8	10	336
E5	8.3	12.2	20.5	21	295

Aus Tabelle 3-1 ist ersichtlich, dass das verdichtete Ahorn- und Eschenholz in der monomolekularen Bedeckung mehr Wasser aufnimmt als das unbehandelte Holz. Die Zugänglichkeit der sorptiv aktiven Gruppen des verdichteten Holzes ist im Vergleich zum unbehandelten Holz bedeutend höher. Die Berechnung von Z basiert auf der Annahme, dass für die Aufnahme von Wasser in der monomolekularen Schicht die primären und die sekundären alkoholischen Gruppen des Holzes verantwortlich sind. Demnach kann man die Unzugänglichkeit des Sorbens als ein Mass für die Kristallinität der Cellulose annehmen. Die Z-Werte in Tabelle 3-1 deuten darauf hin, dass durch den Verdich-

tungsprozess die Wasserstoffbrücken zwischen den Celluloseketten teilweise aufgebrochen und somit die Zugänglichkeit für die Wassermoleküle erhöht wurden. Das polymolekular sorbierte Wasser sowie die Fasersättigungsfeuchtigkeit ist durch die Verdichtung des Holzes gegenüber dem unbehandelten Holz herabgesetzt, was auf die Verminderung der Porenstruktur des verdichteten Materials zurückzuführen ist.

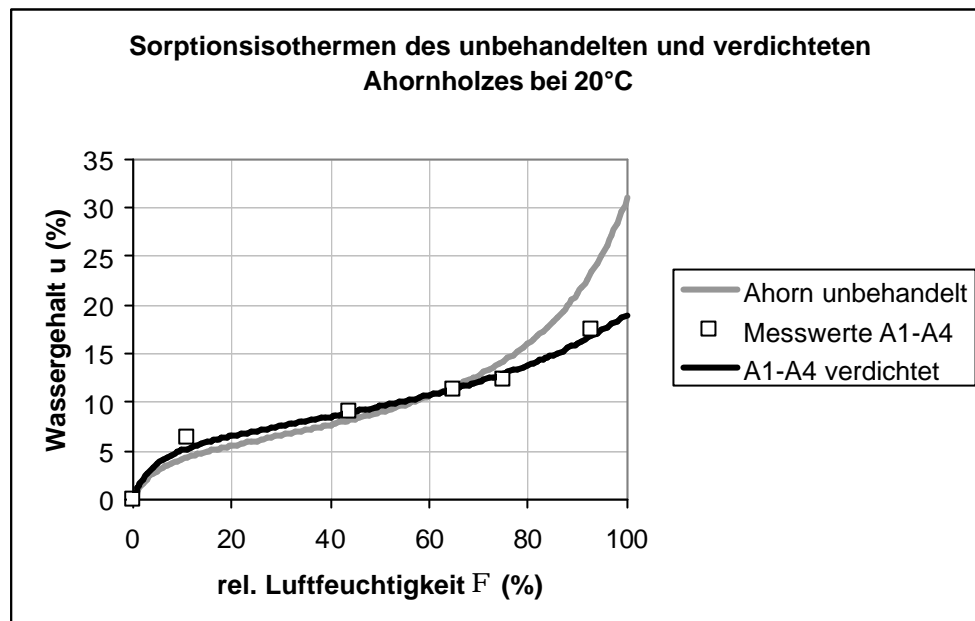


Abbildung 3-1 Sorptionsisothermen des unbehandelten und verdichteten Ahornholzes bei 20°C

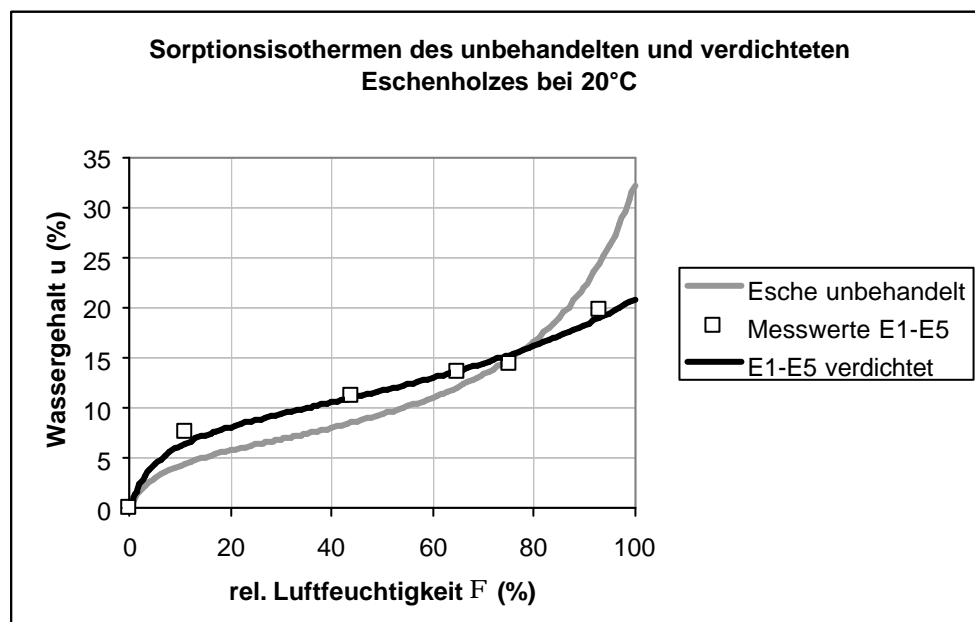


Abbildung 3-2 Sorptionsisothermen des unbehandelten und verdichteten Eschenholzes bei 20°C

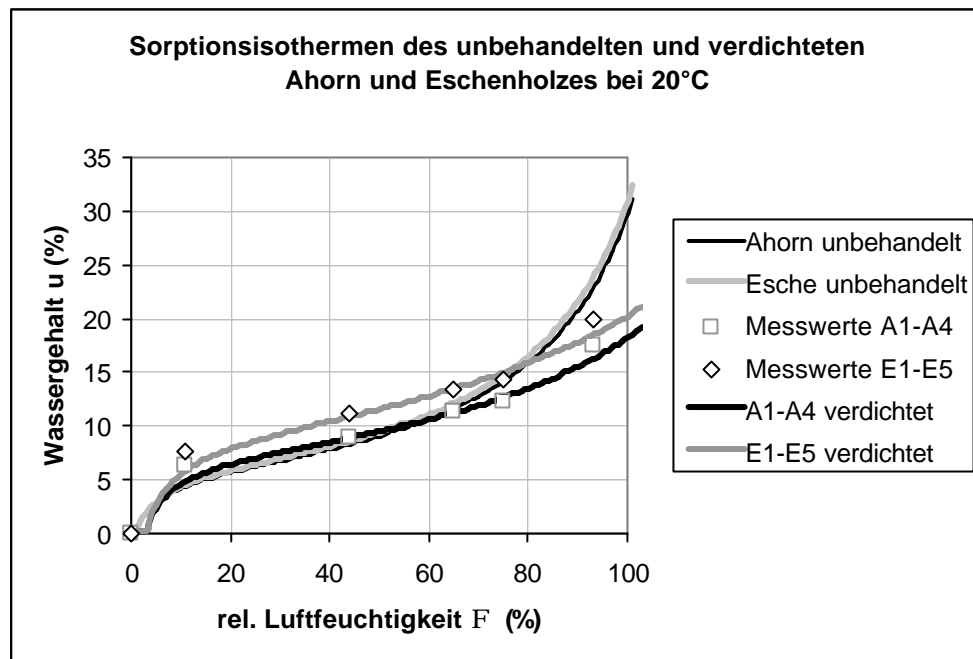


Abbildung 3-3 Sorptionsisothermen des unbehandelten und verdichteten Ahorn- und Eschenholzes bei 20°C

Aus den Bildern ist zu entnehmen, dass das verdichtete Eschenholz im gesamten hygroskopischen Bereich mehr Wasser sorbiert als das verdichtete Ahornholz. Im Bereich der Chemi- und Physisorption ist die Affinität zum Wasser bei beiden verdichteten Holzarten höher als diejenige des unbehandelten Ahorn- und Eschenholzes. Dies deutet auf eine gewisse Zerstörung der inneren Struktur des Holzes hin und demzufolge auf eine Freisetzung der sorptiv aktiven Stellen des Holzes.

3.2 Feuchteverformung: Lineare Quellung entlang der Sorptionsisotherme

Die Feuchteverformungsmessungen sind mit einem Fehler behaftet, der auf den Darrausmassen der Proben beruht. Obwohl die Proben ausserordentlich schonend getrocknet wurden, entstanden enorme Trocknungsrisse, die eine korrekte Messung verunmöglichten. Die Trocknung erfolgte nach der Wasserlagerung der Proben. Die Darrausmasse sind höher ausgefallen als die Ausmasse der bei 11% rel. Luftfeuchtigkeit klimatisierten Proben, was beweist, dass die Verdichtung durch die Wasserlagerung wenigstens teilweise reversibel ist. Wie aus Tabelle 3.5 (siehe Absatz 3.3) zu entnehmen ist, ist die Rohdichte der darrgetrockneten Proben niedriger als diejenige der normal-klimatisierten Proben. Demnach müssten die realen Verformungswerte der Proben höher ausfallen als in den Grafiken dargestellt. Diese Aussage wird auch bestätigt durch die Sorptionsisothermen des Versuchsmate-

rials. Aus diesen ist ersichtlich, dass die Wasseraufnahme des verdichteten Holzes in dem Bereich der Chemi- als auch der Physisorption sehr hoch ausgefallen ist. Abgesehen von den Absolutwerten zeigen die Resultate der Messungen deutlich, dass erst ab ca. 75% relativer Luftfeuchtigkeit, d.h. im Bereich der Kapillarkondensation ein massiver Feuchteverformungsanstieg zu verzeichnen ist, der denjenigen des unbehandelten Holzes bei weitem übersteigt. Die Messungen haben erwartungsgemäss gezeigt, dass die Axialverformung gegenüber der Tangential- und der Radialverformung vernachlässigbar klein ist, so dass die Transversalverformung für die Feuchteverformung des verdichteten Holzes massgebend ist. Die folgenden Abbildungen zeigen den Verlauf der linearen Feuchteverformung des verdichteten Ahorn- und Eschenholzes im gesamten im Versuch verwendeten hygroskopischen Bereich als Funktion der relativen Luftfeuchtigkeit F (Abb. 3-4 bis 3-7). Jeder Punkt in den Grafiken entspricht einem Mittelwert von mindestens 16 Versuchsproben. Aus den Bildern ist ersichtlich, dass das verdichtete Eschenholz allgemein stärker quillt als das verdichtete Ahornholz.

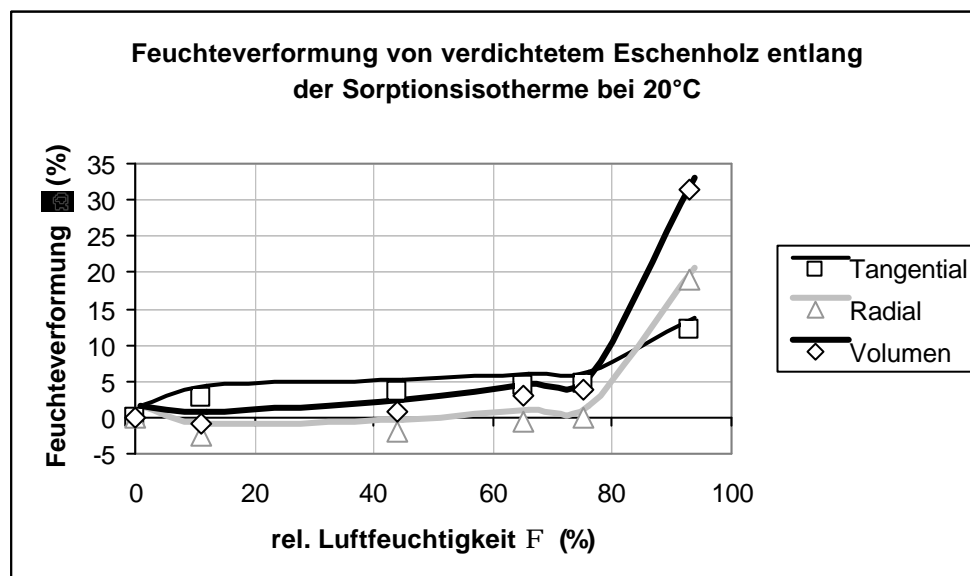


Abbildung 3-4: Feuchteverformung des verdichteten Eschenholzes entlang der Sorptionsisotherme bei 20°C

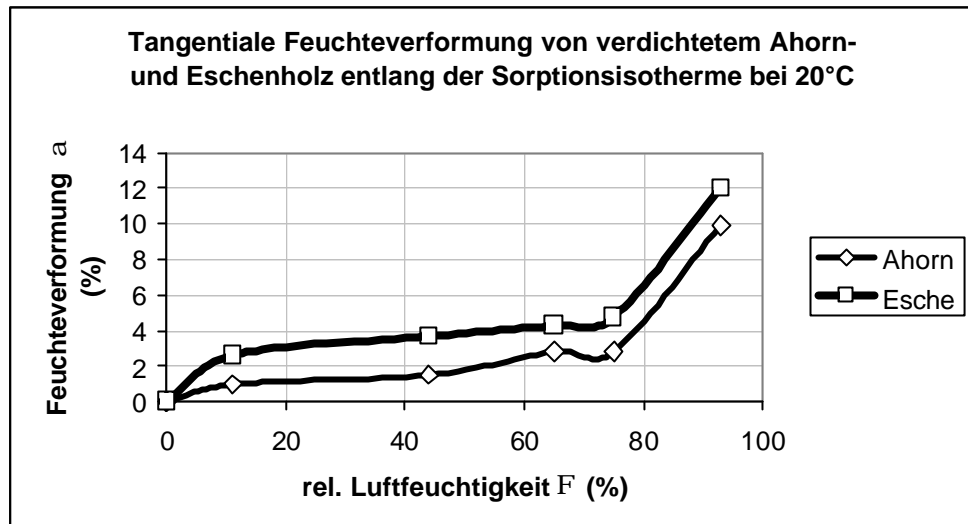


Abbildung 3-5: Tangentiale Feuchteverformung des verdichteten Ahorn- und Eschenholzes entlang der Sorptionsisotherme bei 20°C

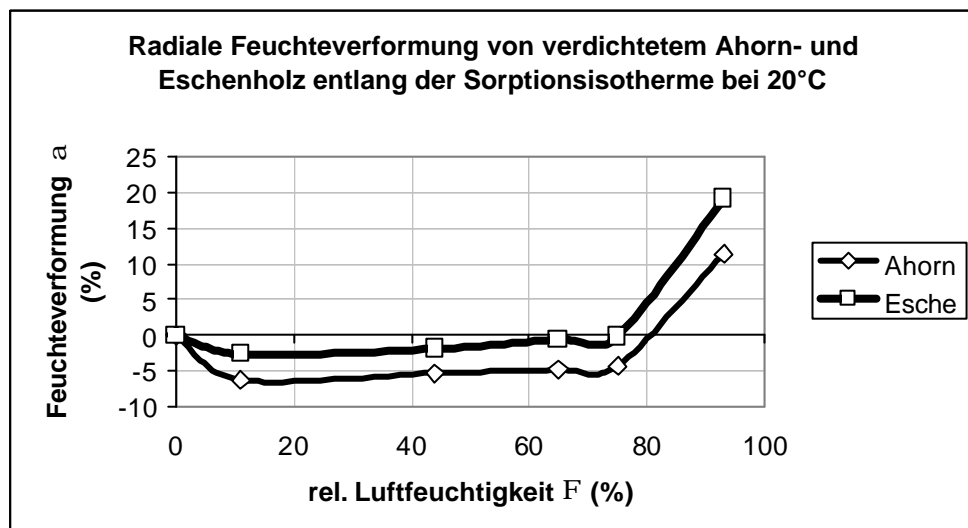


Abbildung 3-6: Radiale Feuchteverformung des verdichteten Ahorn- und Eschenholzes entlang der Sorptionsisotherme bei 20°C

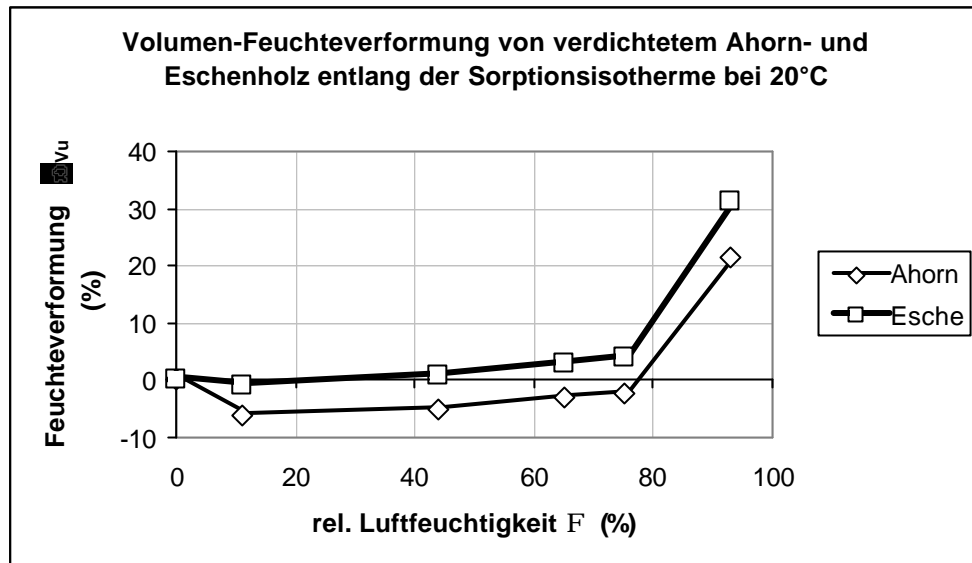


Abbildung 3-7: Volumen-Feuchteverformung des verdichteten Ahorn- und Eschenholzes entlang der Sorptionsisotherme bei 20°C



Abbildung 3-8: Trocknungsriß im Eschenholz

Tabelle 3-2: Volumenquellung a_{V_u} % entlang der Sorptionsisotherme

Probe	rel. Luftfeuchtigkeit F (%)				
	11	44	65	75	93
Ahornholz	-6.25	-4.98	-3.05	-2.43	21.53
Eschenholz	-0.90	0.81	2.94	3.96	31.38

Tabelle 3-3: Tangentialquellung a_{TGU} % entlang der Sorptionsisotherme

Probe	rel. Luftfeuchtigkeit F (%)				
	11	44	65	75	93
Ahornholz	0.99	1.49	2.82	2.83	9.89
Eschenholz	2.61	3.68	4.28	4.76	12.03

Tabelle 3-4: Radialquellung a_{RDU} % entlang der Sorptionsisotherme

Probe	rel. Luftfeuchtigkeit F (%)				
	11	44	65	75	93
Ahornholz	-6.23	-5.31	-4.78	-4.31	11.39
Eschenholz	-2.65	-1.90	-0.55	-0.17	19.04

3.3 Rohdichte

Wie aus der folgenden Tabelle 3-5 ersichtlich ist, besteht ein Unterschied einerseits zwischen verdichtetem Ahorn- und Eschenholz als auch zwischen deren Normal- und Darr-Rohdichte. Die Darr-Rohdichte des Versuchsmaterials ist bei den beiden Holzarten niedriger als diejenige der Normal-Rohdichte, was auf den obenerwähnten Fehler bei der Volumenbestimmung des darrgetrockneten Materials zurückzuführen ist (Trocknungsrisse).

Tabelle 3-5 Normal- und Darr-Rohdichte des Versuchsmaterials

Probe	Normal-Rohdichte r_N (g/cm^3)	Darr-Rohdichte r_0 (g/cm^3)
Verdichtetes Ahornholz	0.75 ± 0.16	0.65 ± 0.11
Verdichtetes Eschenholz	0.82 ± 0.11	0.74 ± 0.12
Unverdichtetes Ahornholz	0.61 ± 0.10	
Unverdichtetes Eschenholz	0.69 ± 0.11	

In Bezug auf die Normal-Rohdichte ergibt sich aus Tabelle 3-5 für das Ahornholz ein Verdichtungsfaktor von etwa 1.23 und für das Eschenholz ein solcher von ca. 1.19. Eine höhere Verdichtung des Holzes bringt eine stärkere Zerstörung der inneren Struktur des Materials mit sich. Dies wird dokumentiert in einer höheren Affinität zum Wasser (siehe Absatz 3.1: Sorptionseigenschaften und Absatz 3.2: Feuchteverformung).

3.4 Feuchtigkeitsgehalt

In folgender Tabelle 3-6 sind die Gleichgewichtsfeuchtigkeiten u_F der Versuchsproben für die im Versuch verwendeten relativen Luftfeuchtigkeiten von 11%, 44%, 65%, 75% und 93% zusammengefasst. Das stärker verdichtete Eschenholz zeigt im gesamten hygroskopischen Bereich eine höhere Gleichgewichtsfeuchtigkeit gegenüber dem weniger verdichteten Ahornholz. Die Gleichgewichtsfeuchtigkeit des verdichteten Eschen- und Ahornholzes ist im unteren hygroskopischen Bereich (bis etwa $\Phi=75\%$) bedeutend höher als bei unbehandeltem Eschen- und Ahornholz.

Tabelle 3-6 Gleichgewichtsfeuchtigkeit u_F des Versuchsmaterials

Probe	rel. Luftfeuchtigkeit F (%)				
	11	44	65	75	93
Ahorn-A1	7.02	9.25	11.62	12.19	16.64
Ahorn-A2	5.43	7.98	9.70	10.69	15.54
Ahorn-A3	6.78	9.69	12.38	13.46	18.84
Ahorn-A4	6.31	8.75	11.85	12.74	18.72
Esche-E1	7.82	10.26	12.37	13.11	18.24
Esche-E2	9.58	12.03	14.00	15.24	20.31
Esche-E3	7.74	10.55	13.65	14.62	20.74
Esche-E4	10.68	12.50	13.97	14.75	20.40
Esche-E5	8.46	10.92	13.47	13.74	19.56

4 Schlussfolgerungen

Aus den vorgenommenen Messungen an verdichtetem Ahorn- und Eschenholz lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- In Bezug auf die Normal-Rohdichte ergab sich für das Ahornholz ein Verdichtungsfaktor von etwa 1.23 und für das Eschenholz ein solcher von ca. 1.19.
- Das verdichtete Ahorn- und Eschenholz nimmt in der monomolekularen Bedeckung mehr Wasser auf als das unbehandelte Holz.
- Die Zugänglichkeit der sorptiv aktiven Gruppen des verdichteten Holzes ist im Vergleich zum unbehandelten Holz bedeutend höher. Dies deutet darauf hin, dass durch den Verdichtungsprozess die Wasserstoffbrücken zwischen den Celluloseketten teilweise aufgebrochen und somit die Zugänglichkeit für die Wassermoleküle erhöht wurden.
- Das polymolekular sorbierte Wasser sowie die Fasersättigungsfeuchtigkeit ist durch die Verdichtung des Holzes gegenüber dem unbehandelten Holz herabgesetzt, was auf die Verminderung der Porenstruktur des verdichteten Materials hindeutet.
- Das verdichtete Eschenholz sorbiert im gesamten hygroscopischen Bereich mehr Wasser als das verdichtete Ahornholz.
- Im Bereich der Chemi- und Physisorption ist die Affinität zum Wasser bei beiden verdichteten Holzarten höher als diejenige des unbehandelten Ahorn- und Eschenholzes. Dies deutet auf eine gewisse Zerstörung der inneren Struktur des Holzes hin und demzufolge auf eine Freisetzung der sorptiv aktiven Stellen des Holzes.
- Die Feuchteverformungsmessungen zeigen, dass erst ab ca. 75% relativer Luftfeuchtigkeit, d.h. im Bereich der Kapillarkondensation ein massiver Feuchteverformungsanstieg zu verzeichnen ist, der denjenigen des unbehandelten Holzes bei weitem übersteigt.
- Die Axialfeuchteverformung ist gegenüber der Tangential- und der Radialverformung vernachlässigbar klein, sodass die Transversalverformung für das Feuchteverformungsverhalten des verdichteten Holzes massgebend ist.
- Das verdichtete Eschenholz quillt allgemein stärker als das verdichtete Ahornholz.

5 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. Haiwood, A.J.; Horrobin, S. 1946: Absorption of water by polymers. Analysis in term of simple model. Trans. Far. Soc. 42B: 84-102.
6. Mytutoyo Digimatic DT-10. Gebrauchsanweisungen. Firmenliteratur
7. Mytutoyo Digimatic DL-10. Gebrauchsanweisungen. Firmenliteratur
8. POPPER, R. 1991: Datenerfassungsprogramm WAAGMA. Int. Bericht WAHO/ETHZ.
9. POPPER, R. 1991: Datenerfassungsprogramm LOGGMA. Int. Bericht WAHO/ETHZ.
10. Schrepfer, V. 1997: Formholz für den Baueinsatz. Int. Bericht Nr.97/1 Professur Holztechnologie, ETH-Zürich. Seite 1-50.