



Studiengang Restaurierung, Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaft

Möglichkeiten zur Festlegung  
tolerierbarer Kurzzeitschwankungen der relativen Luftfeuchte  
für Kulturgut aus Holz

Diplomarbeit

vorgelegt von

Roland Ulmer

März 2004

Prüfer: PD Dr. Andreas Burmester  
Prof. Erwin Emmerling

## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit dem Problem, wie die Reaktion von Kulturgut aus Holz auf Luftfeuchteänderungen ermittelt und bewertet werden kann. Anhand einer umfangreichen Literaturrecherche werden Größen für den Werkstoff Holz vorgestellt, mit denen sich sein hygroskopisches Verhalten beschreiben und quantifizieren läßt. Es werden keine pauschalen, „sicheren“ Werte empfohlen, sondern Methoden aufgezeigt, die eine individuelle, differenziertere Betrachtung und Bewertung des Luftfeuchteinflusses auf Kulturgut aus Holz ermöglichen sollen.

## **abstract** (with a little help from Nirmala Devi)

This diploma thesis surveys the problem of how to determine and judge the response of wooden cultural property to humidity variations. Based on a large-scaled literature survey several parameters are introduced which allow a description of the hygroscopic reaction and quantum of the material wood. No overall values are being recommended. Instead there are methods being introduced of how to get an access to a more differentiated and individual look at the influence of relative humidity to cultural property made of wood.

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung / abstract.....	2
Inhaltsverzeichnis.....	3
Dank.....	5
Abkürzungsverzeichnis.....	6
1 Einleitung.....	8
2 Anatomischer Bau des Holzes.....	11
2.1 Makrostruktur.....	11
2.2 Mikrostruktur.....	13
2.3 Submikrostruktur.....	15
3 Physikalische Kenngrößen.....	17
3.1 Rohdichte.....	17
3.2 Holzfeuchte.....	17
3.3 Fasersättigung.....	17
3.4 relative Luftfeuchte.....	18
3.5 Gleichgewichtsfeuchte.....	19
3.6 Sorption.....	20
3.7 Diffusion.....	23
3.8 Festigkeitseigenschaften.....	27
Spannung.....	27
Dehnung.....	27
Elastizitätsmodul.....	28
Druckfestigkeit.....	31
Zugfestigkeit.....	31
Scherfestigkeit.....	31
Biegefestigkeit.....	32
3.8.1 Abhängigkeiten der Festigkeitseigenschaften.....	33
3.9 Quellen und Schwinden.....	35
lineares Quellmaß.....	35
maximales lineares Quellmaß.....	35
lineares Schwindmaß.....	36
Trocknungs-Schwindmaß.....	36
maximales lineares Schwindmaßes.....	36
Volumenquellmaß.....	36
Volumenschwindmaß.....	36
Quellungs- und Schwindungsfaktoren.....	37
differentielle Quellung.....	37
Quellungskoeffizient.....	37
Schwindungsanisotropie.....	39
Quellungsanisotropie.....	40
freie Quellung und Schwindung.....	41
behinderte Quellung und Schwindung.....	41

3.10 Rheologie des Holzes.....	43
Kriechen.....	43
absolute Kriechverformung.....	44
Kriechzahl.....	44
Kriechfaktor.....	45
zeitabhängiger E-Modul.....	45
mechano-sorptives Kriechen.....	46
Spannungsrelaxation.....	47
Dauerstandfestigkeit.....	47
4 Einflüsse auf die Kenngrößen bei historischen Hölzern.....	48
4.1 Alter.....	48
4.2 Biologische Schädigung.....	49
4.2.1 Fraßinsektenbefall.....	50
4.2.2 Bakterienbefall.....	51
4.2.3 Pilzbefall.....	52
4.3 Salzbehandlung.....	54
4.4 Holzfestigung.....	55
5 Bestimmung der Feuchtereaktion von Kulturgut aus Holz.....	56
5.1 Technologische Untersuchung von Aufbau und Konstruktion.....	59
5.1.1 Holzart.....	60
5.1.2 Anatomische Ausrichtung und strukturelle Besonderheiten.....	60
5.1.3 Veränderungen an historischen Hölzern.....	60
5.2 Definition von Schäden.....	61
5.3 Ermitteln von Kennwerten für Kulturgut aus Holz.....	63
5.3.1 Rohdichte.....	63
5.3.2 Holzfeuchte.....	64
5.3.3 Sorptionsgeschwindigkeit.....	67
5.3.4 Festigkeitswerte.....	72
5.3.5 Quell- und Schwindmaße.....	76
5.3.6 Spannungen im Holz.....	77
5.4 Bewertungsmöglichkeiten.....	80
5.4.1 Methode von Erhardt et al. (1995).....	81
5.4.2 Methode von Dreiner (1997).....	83
6 Zusammenfassung.....	85
7 Ausblick.....	87
8 Literaturverzeichnis.....	88

## Dank

Es ist mir eine „heilige Pflicht“<sup>1</sup>, all jenen meinen aufrichtigen Dank auszusprechen, die mich, genannt oder ungenannt, direkt oder indirekt, im Studium und bei der Erstellung dieser Diplomarbeit bereitwillig unterstützt haben. Folgenden Personen möchte ich ganz besonders herzlich danken:

Dipl. Rest. Univ. Tim BECHTHOLD,

Conservation department, Die Neue Sammlung, Staatliches Museum für angewandte Kunst München

Privatdozent Dr. Andreas BURMESTER,

Landeskonservator und Direktor des Doerner-Instituts der Bayerischen Staatsgemäldesammlungen München

Prof. Dipl. Rest. Erwin EMMERLING,

Ordinarius am Lehrstuhl für Restaurierung, Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaft, Technische Universität München

Volker JUTZI, Münchner Werkstätten für Restaurierung

Dr. Andreas KRATZER, Physik-Department, Technische Universität München

Dipl. Rest. Univ. Sonja KRUG, Berlin

Dipl.-Ing. Lars RAFFELT, Konservator, Doerner-Institut, Bayerische Staatsgemäldesammlungen München

Dr. Peter RÜTH, RÜTH Restaurierungsgeräte Berlin

Prof. Dipl. Rest. Volker SCHAIBLE, Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart

Dr. Stefan SIMON, Senior Scientist, The Getty Conservation Institute Los Angeles

Dr. Achim UNGER, Rathgen-Forschungslabor, Staatliche Museen zu Berlin

Sowie meinen KommilitonInnen und meiner Mutter.

München, März 2004

Roland Ulmer

---

1 KANT, Immanuel: *Die Metaphysik der Sitten*. Tugendlehre. I. Ethische Elementarlehre. 2. Teil. 1. Hauptstück. 1. Abschnitt. B. § 32.  
Vgl. die Dankesrede von Gerhard POLT anlässlich der Verleihung des Bayerischen Literaturpreises (Jean-Paul-Preis) 2001. Nachzulesen in *aviso* (2002), Nr. 1, S. 48-49.  
[http://www.stmwfk.bayern.de/downloads/aviso/2002\\_1\\_aviso\\_48-49.pdf](http://www.stmwfk.bayern.de/downloads/aviso/2002_1_aviso_48-49.pdf)

## Abkürzungsverzeichnis

### Abkürzungen im Text

E-Modul	Elastizitätsmodul
IR	Infrarot
rF	relative Luftfeuchte

Einheit	Bedeutung
%	Prozent
g	Gramm
m	Meter
s	Sekunde
h	Stunde
Pa	Pascal
N	Newton
min	Minute

### Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
$A$	(Querschnitts-)Fläche	[m <sup>2</sup> ], [mm <sup>2</sup> ]
$A_{\beta}$	Schwindungsanisotropie (nach DIN 52 184)	[-]
$A_q$	Quellungsanisotropie (nach DIN 52 184)	[-]
$b$	Breite	[m]; [mm]
$C$	Feuchtekonzentration	[kg/m <sup>3</sup> ]
$D$	Wasserdampf-Diffusionskoeffizient	[m <sup>2</sup> /s]
$E$	Elastizitätsmodul	[N/mm <sup>2</sup> ]; [kg/cm <sup>2</sup> ]
$E_t$	Elastizitätsmodul, zeitabhängig	[N/mm <sup>2</sup> ]
$F$	Kriechfaktor	[-]
$F$	Kraft	[N]
$g$	Feuchtestromdichte	[kg/m <sup>2</sup> s]; [kg/m <sup>2</sup> h]
$h$	Quellungskoeffizient	[%/%]
$h$	Höhe	[m]; [mm]
$K$	Quellungs-, bzw. Schwindungsfaktor	[%/%]
$k'$	Diffusionszahl	[kg/m h %]
$k''$	Diffusionszahl	[m/h]
$l$	Länge	[m]; [mm]
$m$	Masse	[g]
$M_b$	Biegemoment	

Symbol	Bedeutung	Einheit
$P_D$	Dampfdruck	[kg/m <sup>2</sup> ]
$q$	differentielle Quellung	[%/%]
$t$	Zeit	[h]; [s]
$U$	relative Luftfeuchte	[%]
$u$	Holzfeuchtigkeitsgehalt	[%]
$u_{gl}$	Gleichgewichtsfeuchte	[%]
$v$	volumenbezogene Luftfeuchte [kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
$V$	Volumen	[cm <sup>3</sup> ]
$W_b$	Widerstandsmoment	
$\alpha$	lineares Quellmaß	[%]
$\alpha_{max}$	maximales lineares Quellmaß	[%]
$\alpha_V$	Volumenquellmaß	[%]
$\beta$	lineares Schwindmaß	[%]
$\beta_{max}$	maximales lineares Schwindmaß	[%]
$\beta_N$	Trocknungs-Schwindmaß	[%]
$\beta_V$	Volumenschwindmaß	[%]
$\Delta f$	absolute Kriechverformung	[mm]
$\Delta l$	Längenänderung	[m]; [mm]
$\delta_p$	Feuchteleitkoeffizient, bezogen auf den Dampfdruck	[kg/(m · s · Pa)]
$\delta_v$	Feuchteleitkoeffizient, bezogen auf die Luftfeuchte	[m <sup>2</sup> /s]
$\varepsilon$	Dehnung	[mm/mm]
$\mu$	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]
$\rho$	Rohdichte	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Spannung	[N/mm <sup>2</sup> ]; [kg/cm <sup>2</sup> ]
$\sigma'$	Spannung bei der die Proportionalitätsgrenze erreicht wird	[N/mm <sup>2</sup> ]; [kg/cm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{bB}$	Biegefestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]; [kg/cm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{dB}$	Druckfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]; [kg/cm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{max}$	Grenzspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]; [kg/cm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{zB}$	Zugfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]; [kg/cm <sup>2</sup> ]
$\tau$	Scherfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]; [kg/cm <sup>2</sup> ]
$\varphi$	Kriechzahl	[-]
$\varphi_F$	Luftfeuchte im Feuchtklima nach DIN 52 184 (ca. 85%)	[%]
$\varphi_T$	Luftfeuchte im Trockenklima nach DIN 52 184 (ca. 35%)	[%]

## 1 Einleitung

Seit Mitte der 1990er Jahre werden die noch heute in Museen und Archiven gebräuchlichen „Normwerte“<sup>2</sup> für Temperatur und relative Luftfeuchte (rF) kritisiert. Auf eine Darstellung zur geschichtlichen Entwicklung dieser Werte kann hier verzichtet werden, da diese bereits mehrfach, u. a. von MICHALSKI (1993), ERHARDT ET AL. (1995), HOLMBERG (1995), BROWN; ROSE (1997) und BURMESTER (1997) vorliegt. Gegenstand der Kritik war hauptsächlich der fehlende Bezug auf das konkrete feuchtephysikalische Verhalten der Materialien.

Wenn sich die Materialfeuchte hygroscopischer Materialien mit der relativen Luftfeuchte im Gleichgewicht befindet, kommt es zu keinen dadurch bedingten Veränderungen im Material. Diese generelle Feststellung führte zu der Forderung „Temperatur und relative Feuchte so gleichmäßig wie möglich zu halten“ (DIN V 33901, S. 7). Eine absolut gleichmäßige relative Luftfeuchte ist in der Praxis aber meist nicht zu verwirklichen.<sup>3</sup> In der Umsetzung bedeutet „so gleichmäßig wie möglich“ daher häufig das ökonomisch Machbare heutiger Klimatechnik. Die Probleme und Risiken der technischen Klimatisierung, die Abhängigkeit von ihrer Funktionstüchtigkeit und deren enormer energetischer Aufwand sind von BURMESTER (1997) ausführlich beschrieben worden. Für die Suche nach billigeren und gegen Störungen und Ausfall resistenteren Alternativen<sup>4</sup> bedarf es genauer Kenntnisse über tolerierbare Schwankungsbereiche und Änderungsgeschwindigkeiten der relativen Luftfeuchte. Es lassen sich dafür aber keine einheitlichen Idealwerte finden, da Kunstwerke und Kulturgut meist aus einer Kombination unterschiedlichster Materialien bestehen. Zur Ermittlung der Werte, die im Sinne einer Risikoabschätzung die geringste Schädigung erwarten lassen, ist gründliches Wissen über den Einfluß der relativen Luftfeuchte auf die einzelnen Materialien notwendig.

In einer Literaturstudie für das EUROCARE-Forschungsprojekt EU 1383 PREVENT zeigt HOLMBERG (1995, S. 60), daß große Unsicherheit über geeignete Werte der relativen Luftfeuchte für verschiedene Materialien herrscht und die Änderungsgeschwindigkeit der rF kaum Beachtung findet. Auch MÜLLER (2001, S. 76)

---

2 Eine tabellarische Übersicht über verbreitete Werte und ihre Herkunft gibt BURMESTER (1997).

3 Anm.: z. B. schon die vertikale Temperaturschichtung in hohen Räumen bewirkt Differenzen der relativen Luftfeuchte. Siehe ASHLEY-SMITH ET AL. (1994) und BROWN (1994). Lokale Temperaturunterschiede durch Strahlungseintrag verursachen gleichfalls Änderungen der rF. Siehe LEGRUM (1992, S. 66-67).

4 Siehe PADFIELD (1999).

stellt fest: „Welche Frequenz und Amplitude bei den Schwankungen noch zulässig ist, muss noch erforscht werden, genaue Untersuchungen dazu existieren nicht.“ Es gibt zwar zahlreiche Untersuchungen zur Feuchtereaktion von Kunstwerken, diese verwenden aber meist einen eigenen Ansatz und beziehen sich kaum auf vorhandene Arbeiten.

Es ist vor allem den Arbeiten von MICHALSKI und des Conservation Analytical Laboratory (CAL) der Smithsonian Institution (McCORMICK-GOODHART, ERHARDT, MECKLENBURG, TUMOSA) zu verdanken, daß die materialspezifische Betrachtung der Feuchtereaktionen mehr Beachtung fand. Sie führten umfangreiche Untersuchungen zum feuchtphysikalischen Verhalten verschiedener Materialgruppen durch. Die im Einzelnen sehr interessanten und aufschlußreichen Ergebnisse fassen ERHARDT ET AL. (1995) jedoch in der pauschalisierenden Folgerung zusammen, „That most museum objects can tolerate, without mechanical damage, larger fluctuations than previously thought [...]“ (ERHARDT ET AL. 1995). Diese Behauptung stieß auf heftige Kritik.<sup>5</sup> Es ist durchaus eine Option, größere Fluktuationen für übergeordnete Sammlungsbereiche zuzulassen und empfindlichere Gegenstände in Klimavitrinen aufzubewahren. Die Beurteilung, welche Gegenstände nun empfindlicher als „most museum objects“ sind, bleibt aber dem Restaurator überlassen. Die Arbeiten bieten keine Entscheidungshilfe zur Festlegung der zulässigen Schwankungen in den Klimavitrinen. Viele Restauratoren haben durch langjährige Erfahrung eine gute Intuition zur Beantwortung solcher Fragen entwickelt. Doch intuitive Entscheidungsprozesse lassen sich schwer weitervermitteln und stellen eine schlechte Argumentationsgrundlage dar, besonders wenn es um die Anschaffung und Dimensionierung teurer Klimatechnik geht. Wünschenswert wäre ein Vorgehen, mit dem man zu nachvollziehbaren Werten kommt, die sich aus den Materialeigenschaften begründen.

Den Schwerpunkt dieser Arbeit bildet die Betrachtung von Kurzzeitschwankungen der relativen Luftfeuchte. Damit werden, in Abgrenzung zu jahreszeitlichen Schwankungen, Änderungen bezeichnet, die innerhalb von Minuten erfolgen. Dies liegt auch darin begründet, daß die meisten der betrachteten Versuche mit zwei verschiedenen Absolutwerten der relativen Luftfeuchte arbeiten, die abrupt geändert und dann für Zeiträume von 1 bis 14 Tagen oder bis zum

---

5 U. a. APPELBAUM (1996), BERGER; RUSSELL (1996), LULL (1995), McCRADY (1994), REAL (1995), TUMOSA ET AL. (1996), WEINTRAUB (1996).

Erreichen der Materialausgleichsfeuchte aufrechterhalten werden. Es werden ausschließlich die mechanischen Auswirkungen von Luftfeuchteänderungen berücksichtigt. Dabei sind oft isothermale Bedingungen angenommen, um die reine Feuchtereaktion hervorzuheben. Als Material wird nur „trockenes“, als Werkstoff verwendetes Holz betrachtet. Diese Wahl mag zunächst seltsam erscheinen, da Holz im Vergleich zu anderen Materialien, wie z. B. Gelatine<sup>6</sup> relativ träge auf Änderungen der relativen Luftfeuchte reagiert. Holz zeigt aber ein komplexes Verhalten gegenüber Feuchteänderungen. Dadurch wird die Notwendigkeit eines genauen Materialverständnisses ersichtlich. Zudem wies schon HOLMBERG (1995, S. 1) darauf hin, daß es aus der Holzforschung umfangreiche Literatur zum Feuchteeinfluß gibt, die Anwendung dieses Wissens in der präventiven Konservierung aber noch aussteht.

Mit dieser Arbeit wird keine Empfehlung pauschaler, „sicherer“ Werte angestrebt. Anhand einer Literaturrecherche werden Methoden aufgezeigt, die eine individuelle und differenzierte Betrachtung des Luftfeuchteinflusses ermöglichen. Grundvoraussetzung für ein solches Vorgehen ist die Kenntnis der Materialstruktur und deren physikalischen Eigenschaften. Des weiteren benötigt man Größen, mit denen sich die Vorgänge im Material und dessen Reaktionen bei Luftfeuchteänderungen quantifizieren lassen. Die Werte dieser Größen müssen für Kulturgut bei vertretbarem Aufwand mit hinreichender Genauigkeit feststellbar sein.

---

6 Siehe ZUMBÜHL (2003).

## 2 Anatomischer Bau des Holzes

Um die Eigenschaften des Werkstoffes Holz verstehen und erkennen zu können, ist es notwendig, sich mit dem anatomischen Bau des Holzes vertraut zu machen. Anhand der Makrostruktur läßt sich der anisotrope Aufbau des Holzes beschreiben. Damit wird die Zuordnung vieler richtungsabhängiger Holzeigenschaften ermöglicht. Die Mikrostruktur liefert die meisten Unterscheidungsmerkmale für die Holzartenbestimmung. Um den Zusammenhang zwischen makroskopischem und submikroskopischem Aufbau nachvollziehen zu können, werden die wichtigsten mikroskopischen Strukturelemente kurz erwähnt. Die Betrachtung der submikroskopischen Struktur des Holzes ist vor allem zum Verständnis des hygroskopischen Verhaltens und der rheologischen Eigenschaften erforderlich.

### 2.1 Makrostruktur

Als Werkstoff verwendetes Holz ist größtenteils dem entasteten Stamm eines Baumes entnommen, der sich in grober Näherung als Zylinder beschreiben läßt. Durch ihn lassen sich drei aufeinander senkrecht stehende Schnittebenen legen (Abbildung 1), die den drei anatomischen Hauptrichtungen des Holzes (tangential, radial und longitudinal bzw. axial) zugeordnet sind: Der Radialschnitt wird durch die Längsachse und den Durchmesser definiert, der Tangentialschnitt entsprechend durch eine Sehne des Stammkreises. Im Rechten Winkel zur Stammachse verläuft der Quer- oder Hirnschnitt (KOLLMANN 1951, S. 1).

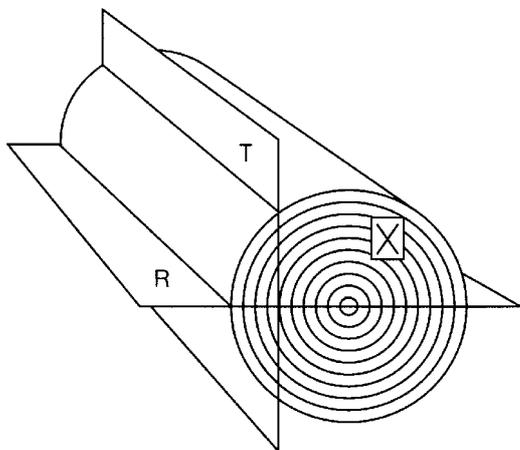


Abbildung 1:  
Die den drei anatomischen Hauptrichtungen zugeordneten Schnittebenen durch einen Holzstamm. Es bedeuten **R**: radial; **T**: tangential; **X**: Querschnitt. Aus HOADLEY (1998, S. 5, Fig. 3).

Das Stammdickenwachstum findet im Kambium, in konzentrisch zur Markröhre angeordneten Ringen statt. In den gemäßigten Klimazonen bilden sich bedingt durch die Unterbrechung der Vegetationszeit sogenannte Jahrringe (siehe Abbildung 2). Im Frühjahr zuerst die großlumigen, dünnwandigen Frühholzzellen, die der Saftleitung dienen. Je nach Holzart gehen diese mehr oder weniger sprunghaft in englumige, dickwandige Spätholzzellen über, die eine größere Dichte und mechanische Widerstandskraft besitzen (KOLLMANN 1967, S. 6-7. HOADLEY 1990, S. 23).

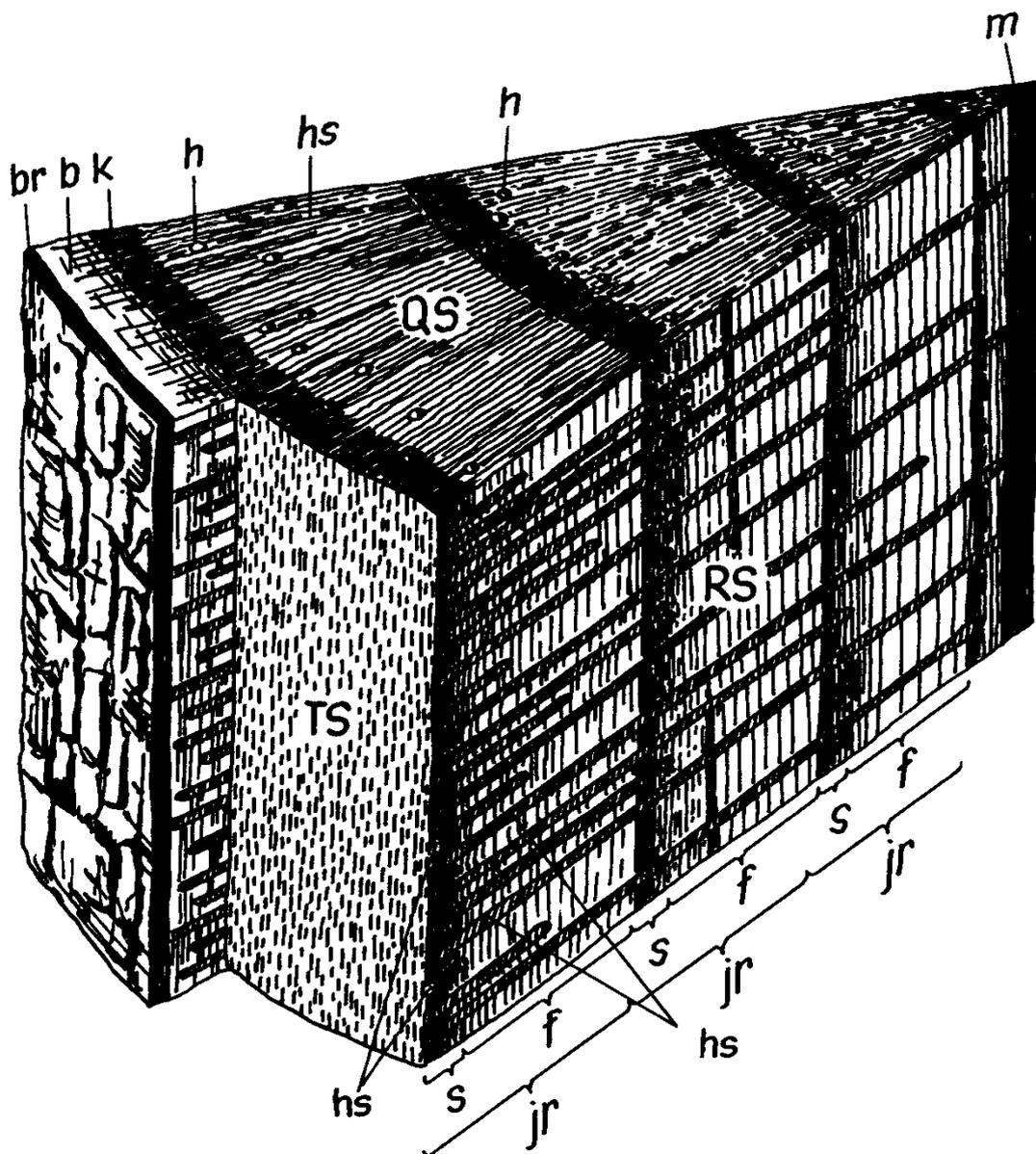


Abbildung 2:  
Schematische Darstellung eines Keilstücks aus einem vierjährigen Nadelholzstamm. Es bedeuten **QS**: Querschnittsfläche oder Hirnschnitt; **RS**: Radialschnittfläche; **TS**: Tangentialschnittfläche; **br**: Borke; **b**: Bast; **k**: Kambium; **h**: Harzkanal; **hs**: Holzstrahl; **m**: Markröhre; **jr**: Jahrring; **f**: Frühholz; **s**: Spätholz. Nach NIEMZ (1993, S. 26, Abb. 3/8).

Im älter werdenden Stamm werden nur die äußeren Jahrringe für die Wasser- und Nährstoffbeförderung verwendet. Bei manchen Holzarten kommt es im Stamminneren zur Ausbildung von Kernholz, wobei die dort gelegenen Holzzellen durch Einlagerung von Kernstoffen „stillgelegt“ werden. Das äußere, leitfähige Holz bezeichnet man als Splint.

Die radial verlaufenden Holzstrahlen dienen der Speicherung von Nährstoffen und bestehen aus Parenchymzellen oder Radial- bzw. Quertracheiden (HOADLEY 1990, S. 23).

## 2.2 Mikrostruktur

Das Holzgewebe ist aus unterschiedlichen Arten von Zellen aufgebaut, die größtenteils langgestreckt in Richtung der Stammachse orientiert sind. Die Laubbäume verfügen über mehr und spezialisiertere Zellarten als die entwicklungsgeschichtlich älteren Nadelbäume (SCHWAB; KLEIN 1998, S. 15-16). Die wichtigsten Zellarten und ihre Funktionen sind in Tabelle 1 zusammengestellt, der unterschiedliche Aufbau von Nadel- und Laubholz ist anhand der Abbildungen 3 und 4 ersichtlich.

Zellart	Aufgabe	Nadelholz	Laubholz
Tracheiden	Festigung Leitung	89-95% des Holzvolumens	vorhanden
Parenchym (Längs- und Quer-)	Speicherung	vorhanden	ca. 10-45% des Holzvolumens
Fasern	Festigung	-	ca. 30-70% des Holzvolumens
Gefäße	Leitung	-	ca. 7-31% des Holzvolumens

Tabelle 1:

Die wichtigsten Zellarten, ihre Funktion und Vorkommen in Laub- bzw. Nadelholz. Bei Laubhölzern schwankt der Anteil der Zellarten auch innerhalb einer Holzart stark.

Nach SCHWAB; KLEIN (1998, S. 16, Tab.1) und TRENDELENBURG (1955, S. 152-153).

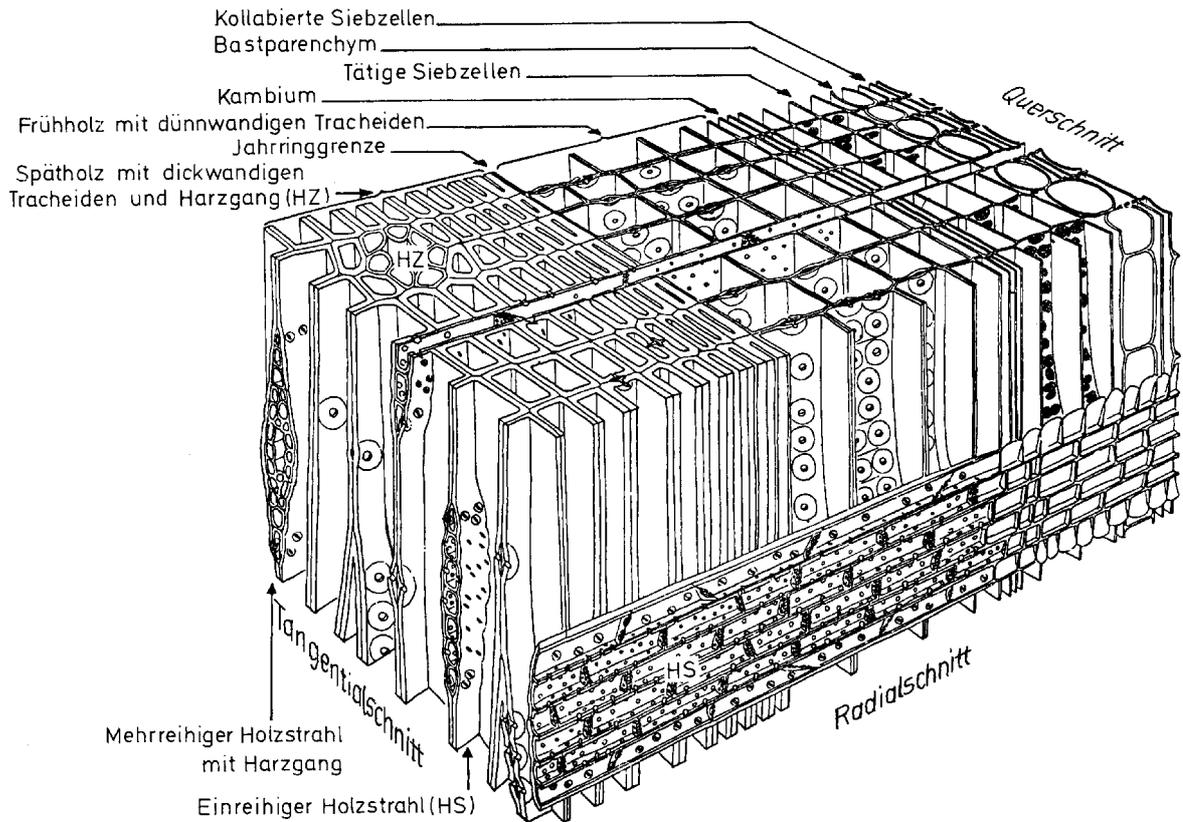


Abbildung 3: Aufbau von Nadelholz. Aus GROSSER (1977, S. 13, Abb. 6).

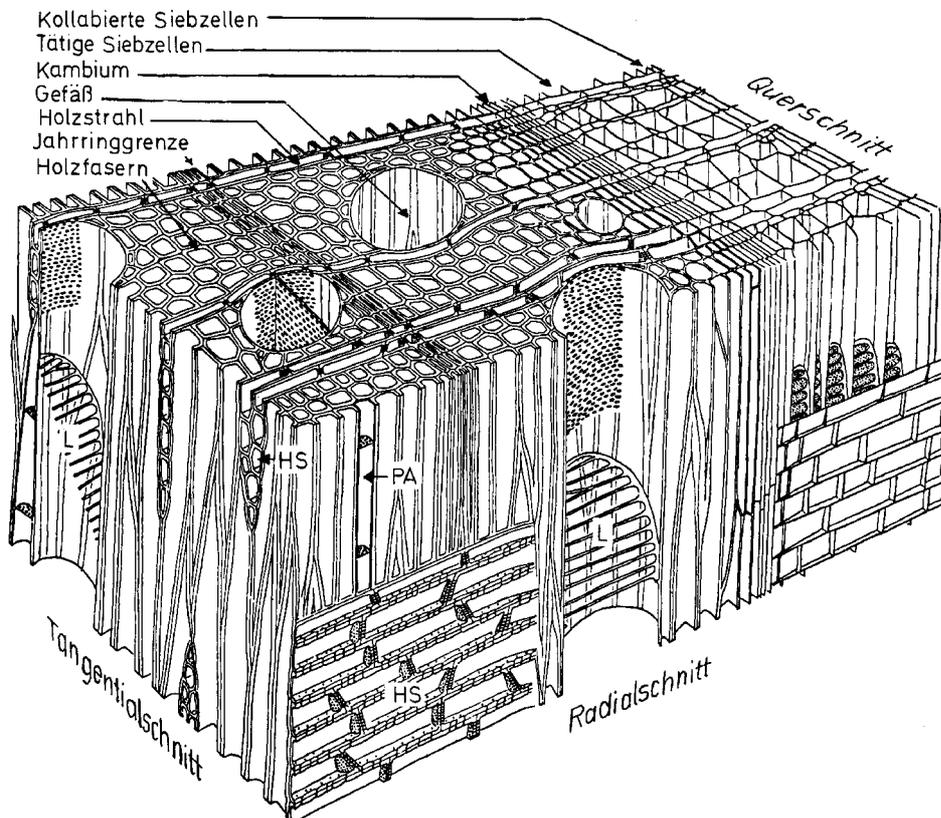


Abbildung 4: Aufbau von Laubholz. Aus GROSSER (1977, S. 28, Abb. 15).

### 2.3 Submikrostruktur

Die einzelnen Zellen sind über Mittellamellen miteinander verbunden. Auf die äußere Schicht der Zelle, die Primärwand, folgen die zwei Schichten  $S_1$  und  $S_2$  der Sekundärwand. Der innere Zellhohlraum, das Lumen wird durch die an die  $S_2$ -Schicht anschließende Tertiärwand begrenzt. Sie wird in einigen Publikationen (z. B. UNGER 1990, HOADLEY 1998) auch als  $S_3$ -Schicht bezeichnet. Diese Schichten bestehen aus Fibrillen, deren bevorzugte Orientierung in Abbildung 5 und 6 schematisch angedeutet ist. Sie beträgt nach KOLLMANN; CÔTÉ (1968, S. 22) durchschnittlich zwischen  $50^\circ$  bis

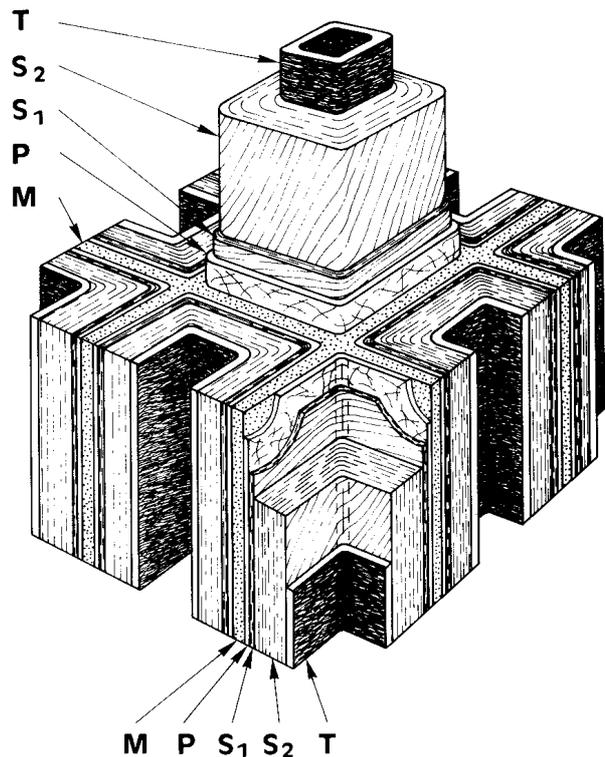


Abbildung 5:  
 Schematischer Aufbau einer verholzten Zellwand. Es bedeuten **M**: Mittellamelle; **P**: Primärwand; **S<sub>1</sub>** und **S<sub>2</sub>**: Sekundärwand; **T**: Tertiärwand (stellenweise auch als  $S_3$  bezeichnet).  
 Aus SCHWAB; KLEIN (1989, S. 18, Abb.4).

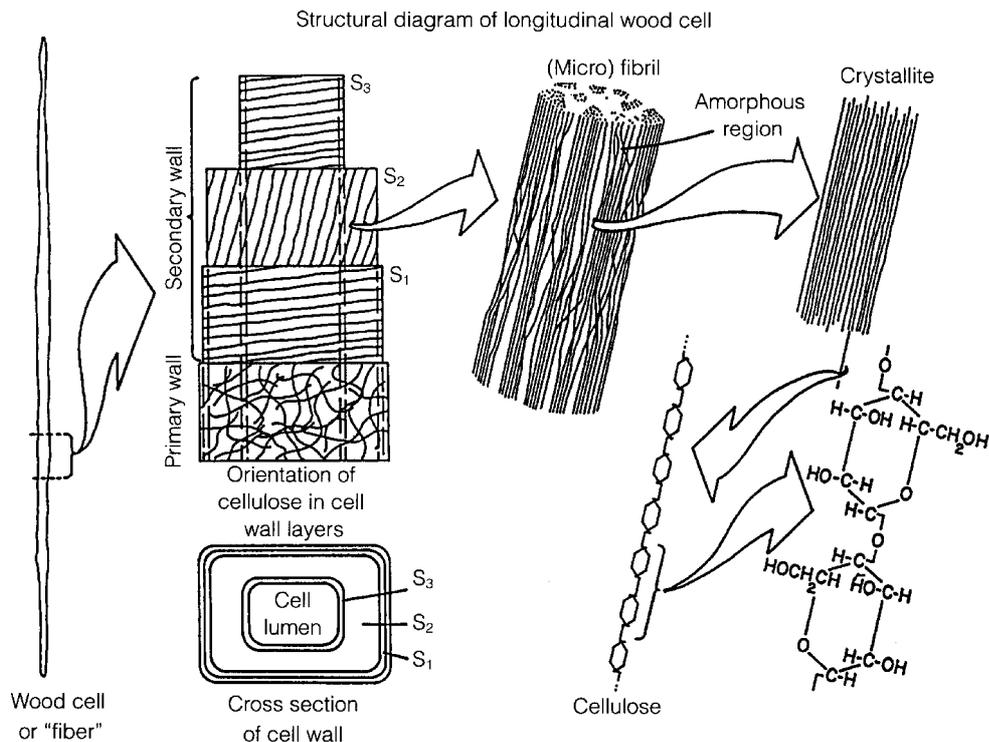


Abbildung 6:  
 Schematischer Aufbau einer typischen longitudinalen Holzzelle, wie beispielsweise einer Nadelholz-Tracheide oder einer Laubholz-Faser. Aus HOADLEY (1998, S. 4, Fig. 1).

70° zur Stammachse in  $S_1$ , zwischen 10° und 30° in  $S_2$  und 60° bis 90° in  $S_3$ . Die Fibrillen wiederum setzen sich aus Bündeln fadenförmiger Cellulose-Makromoleküle mit hohem Orientierungsgrad, den Mikrofibrillen zusammen (Abbildung 6). Deren kristalline Bereiche bezeichnet man als Micellen. Nachdem STAUDINGER und SINGER nachgewiesen hatten, daß die Celluloseketten länger als die mittleren Micell-Längen sind, entwickelte sich die Theorie der Fransenmicelle (KOLLMANN 1967, S. 8). Abbildung 7 zeigt die Entstehung eines solchen, in der Mitte kristallinen und an den Enden amorphen Fransenmicells. Zwei sich nähernde Fadenmoleküle binden sich zuerst an einer Stelle durch van der Waalssche Kräfte (Abbildung 7a). Die beweglichen Molekülteile orientieren ihre Glucosereste aufeinander aus und lagern sich aneinander (Abbildung 7b). In Abbildung 7c wird ein drittes Molekül auf die gleiche Art angelagert und so entsteht allmählich ein kristallgitterartig geordneter Bereich (Abbildung 7d). Über diesen ragen die unterschiedlich langen Enden der sich statistisch findenden Fadenmoleküle als Fransen hinaus. Die Fransen aufeinanderfolgender Micelle können sich wieder durch van der Waalssche Kräfte verbinden (Abbildung 7e) und so zu netzartigen Gebilden verhängen. In diesen folgen amorphe Lockerstellen auf die streng gittermäßig geordneten Bereiche. Ein Kettenmolekül kann sich dabei über mehrere kristalline Bereiche hindurchziehen (KOLLMANN 1951, S. 109-125).

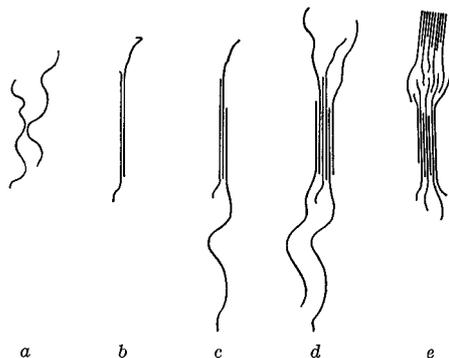


Abbildung 7:  
Aufbau der Fransenmicelle aus einzelnen Cellulose-Fadenmolekülen.  
Aus KOLLMANN (1951, S. 119, Bild 137).

Laut SCHWAB; KLEIN (1989, S. 17) kann man sich den Zellwandaufbau als ein Verbundsystem vorstellen. Die zugfeste Cellulose ist in druckfestes, amorphes Lignin und kurzkettige Polyosen (Hemicellulosen) eingebettet. Die überwiegend kristallin strukturierte Cellulose kann dabei mit der Stahl-Bewehrung in einem Stahl-Beton-Verbund verglichen werden. Ihr prozentualer Anteil, bezogen auf die Trockenmasse, beträgt 42% bis 60%, der des Lignins 20% bis 26% (KOLLMANN 1967, S. 8). Das Vorkommen und der Anteil an weiteren Inhaltsstoffen, zu denen u. a. Harze und Gerbstoffe gehören, variiert stark nach Holzart.

## 3 Physikalische Kenngrößen

Um die Auswirkungen von Feuchtigkeitsänderungen im Holz, wie z. B. Quellen und Schwinden, erfassen zu können, benötigt man Größen zur Beschreibung der Materialeigenschaften. Diese werden im folgenden vorgestellt.

### 3.1 Rohdichte

„Die Rohdichte des Holzes  $\rho$  ist nach DIN 1306 der Quotient aus der Masse  $m$  und dem Volumen  $V$  des makroskopischen Holzes einschließlich des Porenraumes“ (DIN 52182).

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \left[ \frac{g}{cm^3} \right] \quad (1)$$

Da die Rohdichte vom Holzfeuchtigkeitsgehalt  $u$  abhängt, ist dieser mit anzugeben.

### 3.2 Holzfeuchte

Der (durchschnittliche) prozentuale Holzfeuchtigkeitsgehalt  $u$  ist das Verhältnis zwischen der Masse des im Holz enthaltenen Wassers und der Masse des wasserfreien (= darrtrockenen) Holzes (DIN 52183. Vgl. DIN EN 844-4).

$$u = \frac{m_u - m_o}{m_o} \cdot 100 \quad \left[ \frac{\%}{\%} \right] \quad (2)$$

$m_u$  Masse des feuchten Holzes [g]

$m_o$  Masse des wasserfreien Holzes [g]

### 3.3 Fasersättigung

Das Wasser in den Zellwänden bezeichnet man als gebundenes, das in den Zellhohlräumen und Poren als freies Wasser. Laut DIN EN 844-4 ist die Fasersättigung der Zustand eines Holzstückes, bei dem die Zellwände mit Wasser gesättigt sind, jedoch kein Wasser in den Zellhohlräumen vorhanden ist. Nach NIEMZ (1993, S. 50) handelt es sich dabei nicht um einen Punkt, sondern um einen Bereich, der bei heimischen Holzarten zwischen 22 und 35%, im Durchschnitt bei 28% Holzfeuchtigkeit liegt. TRENDELENBURG (1955) gibt mit den in Tabelle 2 wiedergegebenen Werten aber eine größere Spannweite an. Die Fasersättigung ist temperaturabhängig und sinkt bei steigender Temperatur (Abbildung 8).

Holzart	Balsa	Buchs- baum	Pappel	Buche	Fichte	Kiefer	Eiche	Robinie	Pockholz
Fasersättigungs- feuchte [%]	63,7	44	40,4	35,6	34,8	31,3	24,5	19,5	16

Tabelle 2: Fasersättigungsfeuchtigkeit einiger Holzarten. Nach TRENDELENBURG (1955, S. 236, Tab. 43).

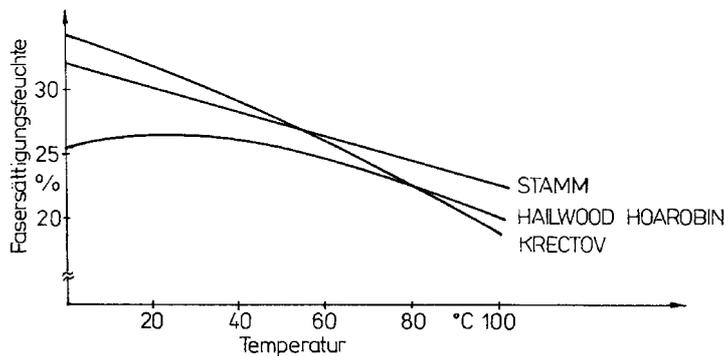


Abbildung 8:  
 Abhängigkeit der Fasersättigungs-  
 feuchte von der Temperatur.  
 Aus NIEMZ (1993, S. 53, Abb. 4/19a).

### 3.4 relative Luftfeuchte

Zur Fasersättigung kommt es, wenn Holz von wasserdampfgesättigter Luft umgeben ist, also bei einer relativen Luftfeuchte (rF) von 100%. Die relative Luftfeuchte  $U$  ist nach DIN 50 010-2 das in Prozent angegebene Partialdruck-Verhältnis zwischen dem herrschenden Wasserdampfdruck  $e$  und dem Wasserdampfsättigungsdruck  $e_w$  in Bezug auf Wasser bei gleichem Luftdruck  $p$  und gleicher Temperatur  $t$ :

$$U = \left( \frac{e}{e_w} \right)_{p,t} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

Eine anschaulichere Definition für die relative Luftfeuchte ist: Der Wassergehalt der Luft in Gramm (absolute Luftfeuchte) prozentual bezogen auf den Sättigungswassergehalt in Gramm bei bestimmter Temperatur und Luftdruck.

### 3.5 Gleichgewichtsfeuchte

Unterhalb der Fasersättigung befindet sich Holz im sogenannten hygroskopischen Bereich, in welchem es Wasserdampf aus der Luft aufnehmen, oder an diese abgeben kann. Als Gleichgewichtsfeuchte  $u_{gl}$  wird in DIN EN 844-4 der Holzfeuchtegehalt bezeichnet, bei dem das Holz weder Feuchtigkeit aus der Umgebung aufnimmt noch an diese abgibt. Diese Definition läßt einen statischen Zustand vermuten. Da es sich aber um ein Gleichgewicht eines thermodynamischen Prozesses handelt, kommt es auf molekularer Ebene zu ständigen Umlagerungen und Austausch von Wassermolekülen im Material und mit der Luft. Die Aufnahme- und Abgabeprozesse befinden sich jedoch (wie der Name korrekt ausdrückt) in einem Gleichgewicht, so daß in der Summe die Menge des im Holz gebundenen Wassers gleich bleibt. Das Holzfeuchtegleichgewicht ist neben der relativen Luftfeuchte auch noch von der Temperatur, dem Luftdruck und dem chemischen und strukturellen Aufbau des Holzes abhängig (NIEMZ 1993, S. 47). Auch innere Spannungen im Holz, hervorgerufen z. B. durch Zug- oder Druckbeanspruchung, haben Einfluß auf die Gleichgewichtsfeuchte, wie aus Abbildung 9 hervorgeht.

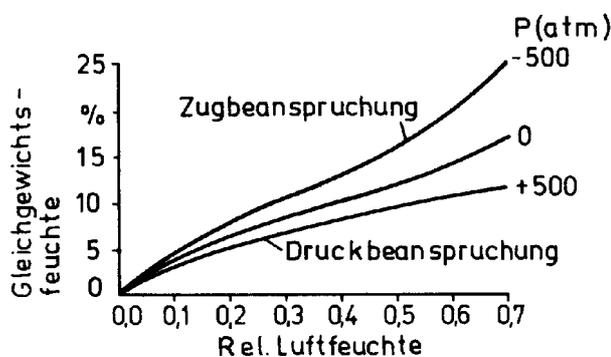


Abbildung 9:  
Einfluß äußerer Zug- und Druckbelastung auf die Gleichgewichtsfeuchte von Sitka-Fichte.  
Aus NIEMZ (1993, S. 49, Abb. 4/14).

Die Untersuchungen von NEGI (1999) ergaben, daß auch kurze Druckbelastungen in Faserrichtung ( $\ll 10$  min) zu signifikanter Erniedrigung der Gleichgewichtsfeuchte führen, die wesentlich länger als die Belastung anhält (einige Tage bei Eukalyptus-Würfeln mit 2 cm Kantenlänge). Die Druckspannungen waren mit  $1/10$ ,  $1/20$  und  $1/40$  der Bruchspannung relativ gering. Die Abnahme der Gleichgewichtsfeuchte wies dabei eine höhere Korrelation mit der relativen Luftfeuchte als mit der Druckbelastung auf. Bei niedriger rF (27%) bewirkte die Druckbelastung eine Absenkung der Gleichgewichtsfeuchte um durchschnittlich 6,2% und war damit etwa 2,6 mal größer als bei hoher rF (93%). Für die Gleichgewichtsfeuchte wird in der Regel ein

Durchschnittswert angegeben, der auf verschiedene Arten, z. B. durch die Darmmethode nach DIN 52183 ermittelt werden kann. Tatsächlich liegen im Holz aber wegen unterschiedlichem Aufbau und wechselnden Umgebungsbedingungen oft Holzfeuchtegradienten vor.

### 3.6 Sorption

Die Darstellung der Abhängigkeit von Holzfeuchte und relativer Luftfeuchte bei konstanter Temperatur (und Luftdruck) bezeichnet man als Sorptionsisotherme. Sie hat für Holz einen typischen S-förmigen Verlauf. Bei der Aufnahme von Wasserdampf (Absorption) stellt sich eine um 1% bis 2% niedrigere Gleichgewichtsfeuchte ein, als bei der Abgabe von Wasserdampf (Desorption). Dieses Verhalten zeigt sich bei richtungsabhängigen Sorptionsisothermen in Form einer Hysteresekurve (Abbildung 10). Sie wird nach KOLLMANN (1951, S. 397) bei oszillierender Sorption enger. Zur Darstellung anderer Abhängigkeiten und Zusammenhänge wird oft, wie in Abbildung 9, nur die gemittelte Sorptionsisotherme verwendet.

Sorption findet im hygroskopischen Bereich, also bis zur Fasersättigung statt. Sie lässt sich abhängig von den Bindungsarten des Wassers in drei Phasen unterteilen: Chemisorption ( $u \approx 0-6\%$ ), Adsorption ( $u \approx 6-15\%$ ) und Kapillarkondensation ( $u \approx 15\%$  bis Fasersättigung).

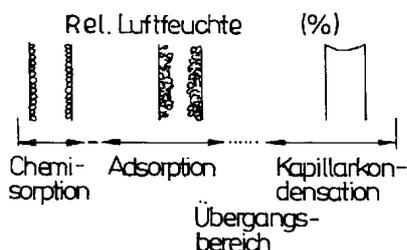
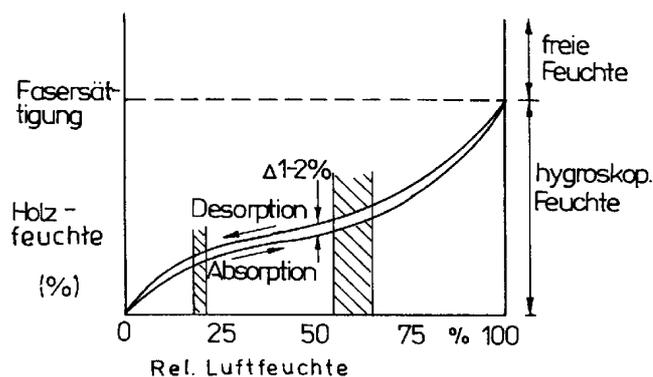


Abbildung 10:  
 Typische Sorptionsisotherme für Holz. Die Schraffuren markieren die Übergangsbereiche der Wasserdampfsorptionsphasen, die darunter abgebildet sind. Die Bindung des molekularen Wassers in einem Hohlraum der Zellwandstruktur ist für die drei Phasen angedeutet.  
 Nach NIEMZ (1993, S. 46, Abb. 4/10).

Bei der Chemisorption, die etwa von 0-20% rF stattfindet, wird Wasser als monomolekulare Schicht an die Cellulosemicellen gebunden. Dabei richten sich die Wasser-Dipole, wie in Abbildung 11 veranschaulicht, an den negativen Polen der freiliegenden Cellulose-OH-Gruppen aus. Sie beanspruchen aufgrund ihrer nun größeren Ordnung ein geringeres Volumen. Diese chemische Reaktion findet nur intermicellar, also an der Oberfläche des Micellgerüsts statt und beginnt an dessen Lockerstellen. Mit der molekularen Sorption ist anfangs, solange kaum kristalline Bereiche verschoben werden, nahezu keine äußere Volumenquellung verbunden.

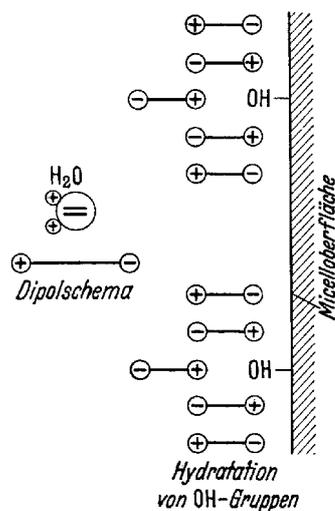


Abbildung 11:  
Schematische Darstellung der chemisorptiven Bindung von Wassermolekülen an die Micelloberfläche.  
Aus KOLLMANN (1951, S. 382, Bild 279).

Die Phase der Adsorption reicht von etwa 20-60% rF. Wassermoleküle bilden nun mehrere Lagen. Ihre Anlagerung geschieht durch elektrostatische und van der Waalssche Anziehungskräfte. Die so ausgebildete polymolekulare Wasserschicht ist allerdings ungleichmäßig verteilt. Während stellenweise schon mehrere Schichten vorliegen, kann andernorts noch nichts adsorbiert sein. Die Struktur der Wassermoleküle hängt mit zunehmender Schichtdicke weniger von der Grenzschicht ab. Sie fangen an, Flüssigkeitscharakter (Oberflächenspannung, Fließfähigkeit) zu zeigen.

Oberhalb von ca. 60% relativer Luftfeuchte kommt es aufgrund des geringeren Dampfsättigungsdrucks in Kapillaren mit Radien von 50 nm bis 1 µm zu Kapillarkondensation. Diese Kondensation findet immer noch in der Zellwandstruktur statt. Es lagert sich zunehmend Wasser in den intermicellaren und interfibrillaren Hohlräumen an. Erst wenn sich die Fibrillen wegen der relativ festen Bindungen der kristallinen Bereiche nicht mehr ausdehnen können, ist die Fasersättigung und damit das Ende des hygrokopischen Bereichs erreicht (KOLLMANN 1951, S. 380-393. NIEMZ 1993, S. 46-50).

Die Sorptions-Phasen überlagern sich und kommen örtlich verteilt vor. Abbildung 12 veranschaulicht exemplarisch die Zusammensetzung einer Sorptionsisotherme aus den drei Phasen. Die einzelnen Sorptionstheorien und deren mathematische Formulierung sind bei SKAAR (1988) und SIAU (1995) ausführlich beschrieben.

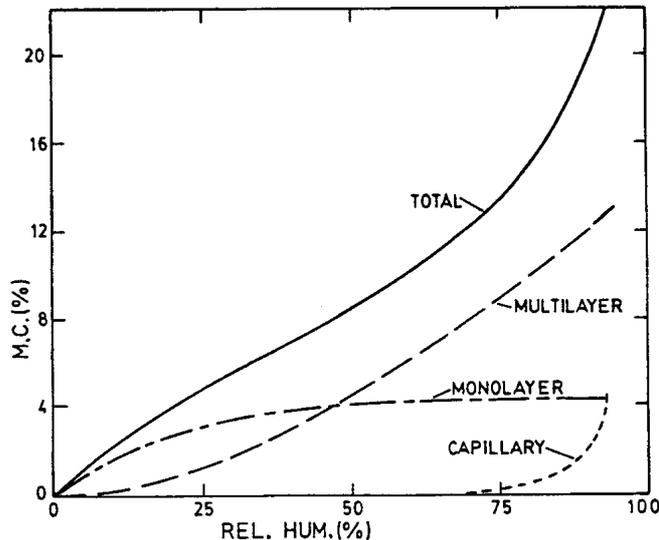


Abbildung 12:  
 Überlagerung der Sorptionsphasen. Es bedeuten: TOTAL die zusammengesetzte Sorptionsisotherme; MULTILAYER die Adsorption; MONOLAYER die Chemisorption und CAPILLARY die Kapillarkondensation. Aus SKAAR (1988, S. 117, Fig. 3.20).

Durch eine Wärmebehandlung über 70°C wird das Sorptionsverhalten beeinflusst. Wie aus Abbildung 13 hervorgeht, nimmt die Gleichgewichtsfeuchte mit zunehmender Behandlungstemperatur ab. Die prozentuale Abnahme ist nach den Untersuchungen von KOLLMANN; SCHNEIDER (1964) von der Holzart relativ unabhängig. Dieses Verhalten wird mit dem Abbau hydrophiler Bestandteile erklärt.

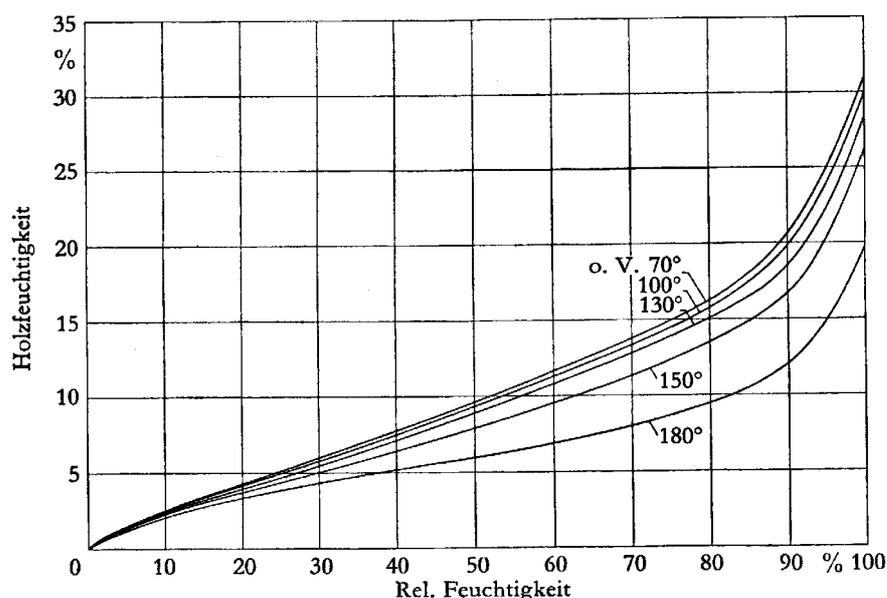


Abbildung 13:  
 Sorptionsisothermen (20°C) für Buchenholz ohne Vorbehandlung (o. V.) und nach 24 Stunden Wärmebehandlung unter Luftzutritt bei den eingetragenen Temperaturen. Aus KOLLMANN; SCHNEIDER (1964, S. 46, Abb. 26).

### 3.7 Diffusion

In vielen Publikationen wird der Feuchtigkeitstransport im Holz unterhalb der Fasersättigung durch Dampfdiffusionsprozesse beschrieben. Nach dem ersten Fick'schen Gesetz versteht man unter der eindimensionalen (Gas-)Diffusion den Stoffmengentransport in Richtung eines Konzentrationsgradienten pro Flächen- und Zeiteinheit. DIN EN ISO 9346 definiert die Wasserdampfstromdichte in Luft folgendermaßen:

$$\vec{g} = -D \operatorname{grad} v \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right] \quad (4)$$

$\vec{g}$  der Vektor der Feuchtestromdichte

$D$  Wasserdampf-Diffusionskoeffizient in Luft [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$v$  die volumenbezogene Luftfeuchte [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Das negative Vorzeichen vor dem Wasserdampf-Diffusionskoeffizienten drückt dabei die Diffusionsrichtung von der hohen zur niedrigen Konzentration aus. Der Diffusionskoeffizient gibt die Wasserdampfmenge in kg an, die pro Stunde bei einem Feuchteunterschied von 1% über eine Weglänge von 1m durch einen Querschnitt von  $1\text{m}^2$  fließt (NIEMZ 1993, S. 44). Ausgehend von dieser Definition, müsste sich die Geschwindigkeit von Holzfeuchteänderungen anhand des Diffusionskoeffizienten ermitteln lassen. Je nach zugrundegelegtem Antriebsmechanismus gibt es unterschiedliche Formulierungen und Einheiten für die Diffusionsgeschwindigkeit. Nach TIME (1998, S. 50) wird in der Holzforschung meist die Feuchtekonzentration  $C$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] als treibende Kraft der Diffusion verwendet. Der zugehörige Diffusionskoeffizient  $D_c$  hat die Einheit [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]. Wird der Holzfeuchtegehalt  $u$  [%] zugrundegelegt, ergibt sich der Diffusionskoeffizient  $D_u$  mit [ $\text{kg}/\text{m s}$ ] als Einheit. Als weitere Antriebskräfte können der Dampfdruck, die relative Luftfeuchte, das chemische Potential und der osmotische Druck verwendet werden.

SIAU (1995, S. 111) definiert den Wasserdampf-Diffusionskoeffizienten  $D$  folgendermaßen:

$$D = \frac{(w/t) A}{\Delta C / L} \left[ \frac{m^2_w}{s} \right] \quad (5)$$

$w/t$  pro Zeit transportierte Wasserdampfmenge [kg/s]

$A$  Querschnittsfläche senkrecht zur Flußrichtung [m<sup>2</sup>]

$\Delta C$  Holzfeuchtekonzentrationsgradient [kg/m<sup>3</sup><sub>w</sub>]

$L$  Länge in Flußrichtung [m]

KOLLMANN (1951, S. 451) unterscheidet zwei Arten von Diffusionszahlen (= Diffusionskoeffizienten)  $k'$  und  $k''$ :

$$g_d = -k' \frac{du}{dx} \left[ \frac{kg}{m^2 h} \right] \quad (6)$$

$g_d$  die stündlich durch einen Querschnitt von einem m<sup>2</sup> bewegte Feuchtigkeitsmenge

$k'$  die Diffusionszahl [kg/m h %]

$u$  Holzfeuchtegehalt [%] an der Stelle  $x$  [m]

$du/dx$  das Feuchtigkeitsgefälle im Holz in Richtung der Diffusion [%/m]

$$g_d = -k'' \frac{dP_D}{dx} \left[ \frac{kg}{m^2 h} \right] \quad (7)$$

$k''$  die Diffusionszahl [m/h]

$P_D$  Dampfdruck [kg/m<sup>2</sup>] an der Stelle  $x$  [m]

$dP_D/dx$  Dampfdruckgefälle [kg/m<sup>3</sup>]

Bei porösen Stoffen sollte man nach DIN EN ISO 9346 nicht von Diffusion sprechen, da hier ein Teil des Feuchteflusses in flüssiger Phase vorliegt. Stattdessen wird der Feuchteleitkoeffizient  $\delta$  verwendet. Bezogen auf den Dampfdruck gilt:

$$\vec{g} = \delta_p \text{ grad } p_v \left[ \frac{kg}{m^2 \cdot s} \right] \quad (8)$$

$\delta_p$  auf den Dampfdruck bezogener Feuchteleitkoeffizient [kg/(m · s · Pa)]

$p_v$  Dampfdruck in den Poren [Pa]

Bezogen auf die volumenbezogene Luftfeuchte gilt:

$$\vec{g} = -\delta_v \operatorname{grad} v \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right] \quad (9)$$

$\delta_v$  auf die volumenbezogene Luftfeuchte bezogener Feuchteleitkoeffizient [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$v$  die volumenbezogene Luftfeuchte in den Poren [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Häufig wird auch die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  angegeben. Sie gibt den Faktor an, um den der Widerstand des Stoffes größer ist als der Widerstand einer Luftschicht gleicher Dicke. Sie ist somit dimensionslos:

$$\mu = \frac{D}{\delta_v} \quad (10)$$

Wasserdampf-Diffusionsgeschwindigkeit bzw. -widerstand werden experimentell bestimmt. Ein genormtes Verfahren findet sich in DIN EN ISO 12572. Man unterscheidet dabei das Trockenbereichverfahren (Dry-cup) und das Feuchtebereichverfahren (Wet-cup). In Tabelle 3 sind Diffusionswiderstandszahlen nach beiden Verfahren für drei Holzarten aufgeführt.

Holzart	Anatomische Richtung	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl $\mu$ und zugeordneter Holzfeuchtegehalt $\bar{u}$			
		Dry-cup		Wet-cup	
		$\mu$ [-]	$\bar{u}$ [M-%]	$\mu$ [-]	$\bar{u}$ [M-%]
Fichte	radial	180	6,7	21	19,8
	tangential	180	6,3	18	19
	axial	164	-	3	-
Eiche	radial	215	6,5	43	19,3
	tangential	460	7,5	81	20,3
	axial	8	-	5	-
Buche	radial	120	7,2	21	18,9
	tangential	100	5,8	20	18,3
	axial	-	-	-	-

Tabelle 3: Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahlen nach dem Trockenbereichverfahren (**Dry-cup**) und dem Feuchtebereichverfahren (**Wet-cup**). Nach: KIESSL; MÖLLER (1989, S. 319, Tabelle 1).

Den Widerstandszahlen ist der sich jeweils einstellende durchschnittliche Holzfeuchtegehalt zugeordnet. Die je nach angewandtem Verfahren sehr unterschiedlichen Werte erklären sich aus der starken Abhängigkeit des Diffusionswiderstandes und damit der Diffusionsgeschwindigkeit von der Holzfeuchte. Weiterhin bestehen Abhängigkeiten von der Temperatur, der Rohdichte und der Schnittrichtung.

Abbildung 14 verdeutlicht, daß der Diffusionswiderstand umso größer wird, je geringer die Holzfeuchte ist. Da bei Wasserdampfdiffusionsprozessen im Holz immer Feuchtegradienten auftreten, läßt sich die Geschwindigkeit des Feuchtetransportes durch eindimensionale Diffusionsmodelle nur über Mittelwerte beschreiben. Mehrdimensionale Modelle, wie sie u. a. bei SIAU (1995) beschrieben werden, sind aufwendiger in der Handhabung und führen laut FORTUIN (2003, S. 199) zu einer geringeren Übereinstimmung mit experimentell ermittelten Daten. Die Vorgänge im Holz bei Absinken der relativen Luftfeuchte lassen sich mit der letzten Phase der konvektiven Holz Trocknung vergleichen. Nach einem Vergleich zahlreicher Arbeiten zu diesem Thema kommt FORTUIN (2003, S. 199) zu dem Ergebnis: „Die heutigen Kenntnisse zur Beschreibung der Wasserdampfdiffusion in Holz reichen immer noch nicht aus, um das Trocknungsverhalten mit einem Diffusionsansatz hinreichend genau zu beschreiben.“ Obwohl zahlreiche Kennwerte zu Diffusionseigenschaften verschiedener Holzarten vorliegen, scheint diese Größe zur Beurteilung zulässiger Schwankungsbreiten der rF ungeeignet. Im folgenden wird daher nicht weiter auf die Diffusion eingegangen. Statt dessen wird in Abschnitt 5.3.3 versucht, die Geschwindigkeit des Feuchtetransportes im Holz über die Sorptionsgeschwindigkeit zu ermitteln.

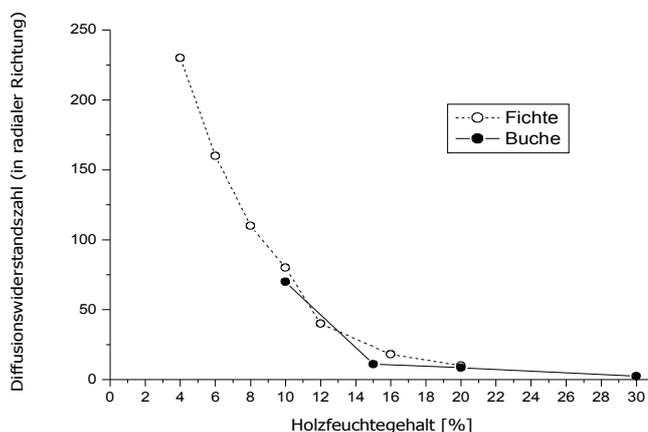


Abbildung 14:  
Abhängigkeit der Diffusionswiderstandszahlen in radialer Richtung von der Holzfeuchte.  
Nach NIEMZ (1993, S. 45, Tabelle 4/5).

### 3.8 Festigkeitseigenschaften

Zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften und Festigkeit von Hölzern lassen sich verschiedene in der Materialforschung übliche Größen heranziehen. Um der Anisotropie Rechnung zu tragen, müssen dabei meist drei, auf die anatomischen Hauptrichtungen bezogene Werte berücksichtigt werden. Der Inhomogenität kann man mit statistischen Methoden, Heranziehung weiterer Kennwerte oder der Betrachtung relativ homogener Abschnitte gerecht werden.

Die Beschreibung von Festigkeitseigenschaften basiert auf durch Kraffteinwirkung hervorgerufenen Längenänderungen. Sie werden durch die Größen Spannung und Dehnung ausgedrückt. Unter der Spannung  $\sigma$  versteht man den Betrag einer Kraft  $F$ , der auf eine Fläche  $A$  wirkt (HOADLEY 1990, S. 124).

$$\sigma = \frac{F}{A} \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (11)$$

Als Dehnung  $\varepsilon$  bezeichnet man das Verhältnis der Längenänderung  $\Delta l$  zur ursprünglichen Länge  $l$  (NIEMZ 1993, S. 146).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \left[ \frac{mm}{mm} \right] \quad (12)$$

Die sich mathematisch aufhebende Einheit [mm/mm] wird mit angegeben.

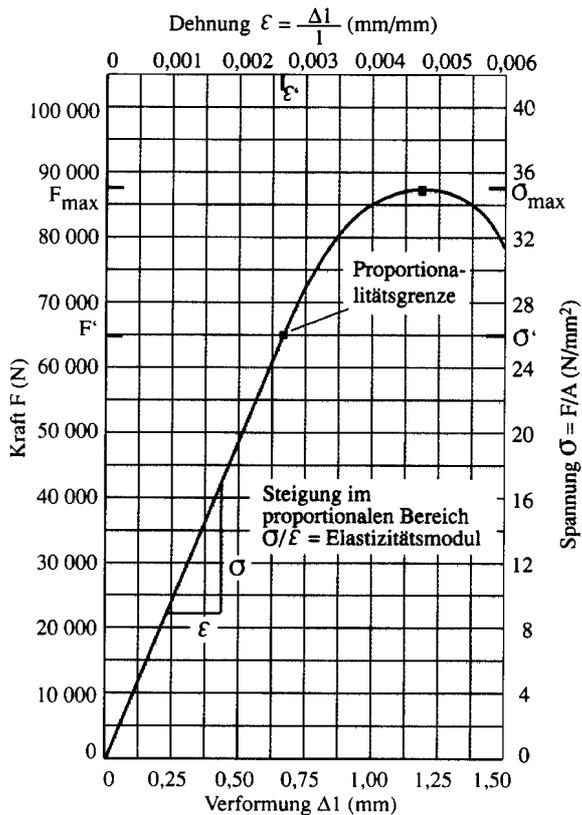


Abbildung 15:  
 Ein typisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Holz bei Druckbelastung. Die bei einem zerstörenden Druckfestigkeitsversuch aufgenommenen Wertepaare für die Kraft  $F$  und die Verformung  $\Delta l$  werden gegeneinander aufgetragen. Es lassen sich die maximale Druckfestigkeit  $\sigma_{max}$ , die Proportionalitätsgrenze bei  $\sigma'$  und der E-Modul entnehmen.  
 Aus HOADLEY (1990, S. 125, Bild 6-3).

Trägt man Spannung und Dehnung wie in Abbildung 15 gegeneinander in einem Koordinatensystem auf, erhält man ein sogenanntes Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Der lineare Abschnitt der Kurve drückt den proportionalen Zusammenhang von Spannung und Dehnung im elastischen Bereich aus. Berechnet man dessen Steigung erhält man ein Maß für die Steifigkeit: Die Proportionalitätskonstante des Hooke'schen Gesetzes, den Elastizitätsmodul (E-Modul)  $E$ .

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (13)$$

Es mag zunächst verwirrend erscheinen, daß der E-Modul über die gleiche Einheit wie die Spannung verfügt. Aber man kann darunter die Spannung verstehen, die zur Verdopplung der Ausgangslänge bei einem Stab mit  $1 \text{ cm}^2$  Querschnittsfläche benötigt wird. Manchmal wird auch der Kehrwert von  $E$ , die Dehnungszahl  $\alpha$  angegeben. Sie ist anschaulicher, da sie die Änderung der Längeneinheit je Spannungseinheit ausdrückt (KOLLMANN 1951, S. 575). Sie ist für Berechnungen aber weniger geeignet und es besteht außerdem Verwechslungsgefahr mit dem linearen Quellmaß  $\alpha$ .

Der elastische Bereich, und damit die Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes, endet an der Proportionalitätsgrenze bei der Spannung  $\sigma'$ . Zum makroskopischen Bruch kommt es beim Erreichen der Grenzspannung  $\sigma_{max}$ , die auch als Bruchspannung oder Festigkeit  $\beta$  bezeichnet wird. Dazwischen kommt es zu plastischen Verformungen, die nach Entlastung nicht mehr zurückgehen und daher auch als bleibend oder irreversibel bezeichnet werden. Dies veranschaulicht Abbildung 16. Auf der linken Seite wird ein Holzstück innerhalb des elastischen Bereiches belastet. Nach Entlastung geht die Dehnung  $\varepsilon$  wieder auf ihren Ausgangswert zurück. Im rechten Diagramm liegt die Spannung  $\sigma$  jedoch über der Proportionalitätsgrenze  $\sigma'$ , wodurch nach der Entlastung ein Teil der Dehnung  $\varepsilon$  bestehen bleibt. (HOADLEY 1990, S. 124-127. NIEMZ 1993, S. 147)

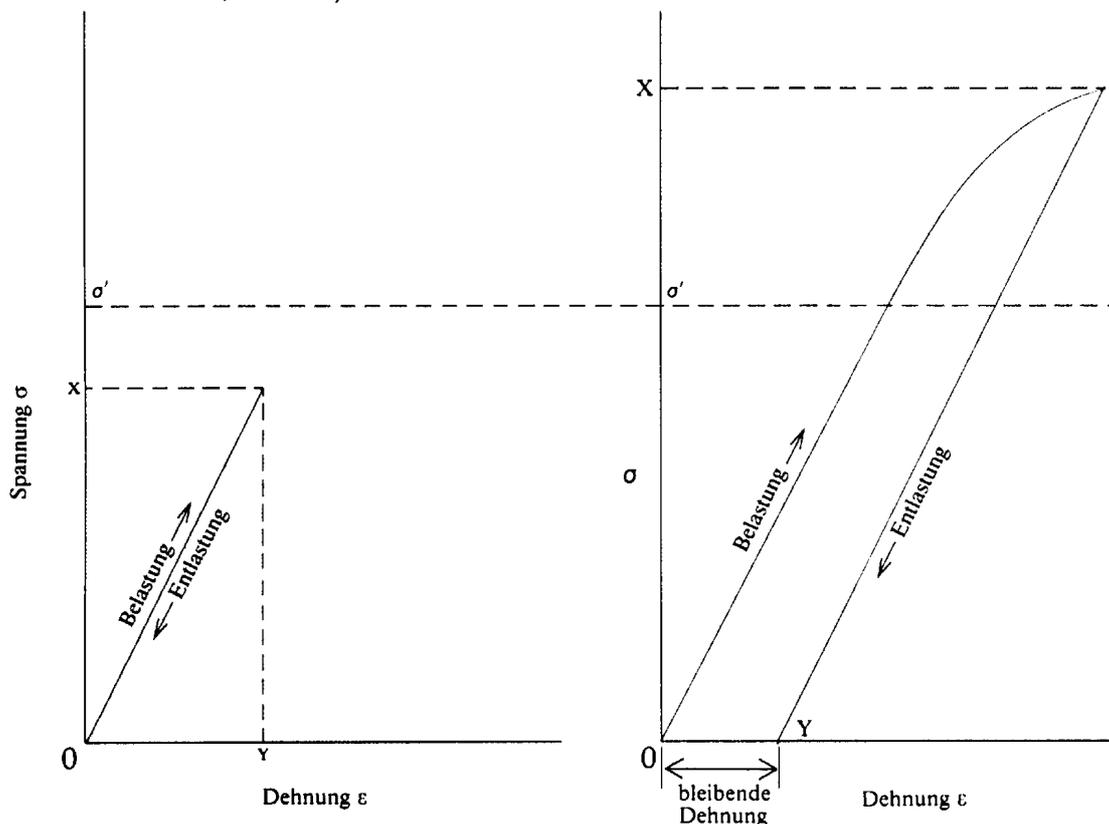


Abbildung 16:  
Beispiel für eine elastische (links) und plastische Dehnung (rechts). AUS HOADLEY (1990, S. 126, Bild 6-5).

Je nach Art und Richtung der Krafteinwirkung unterscheidet man Druckspannung, Zugspannung, Scherspannung und Biegespannung. Abbildung 17 veranschaulicht die Belastungsarten. Es wird außerdem deutlich, daß die bei der Biegebeanspruchung auftretenden Spannungen sich aus den Hauptspannungsarten Zug, Druck und Abscheren zusammensetzen. Es ist jeweils die anatomische

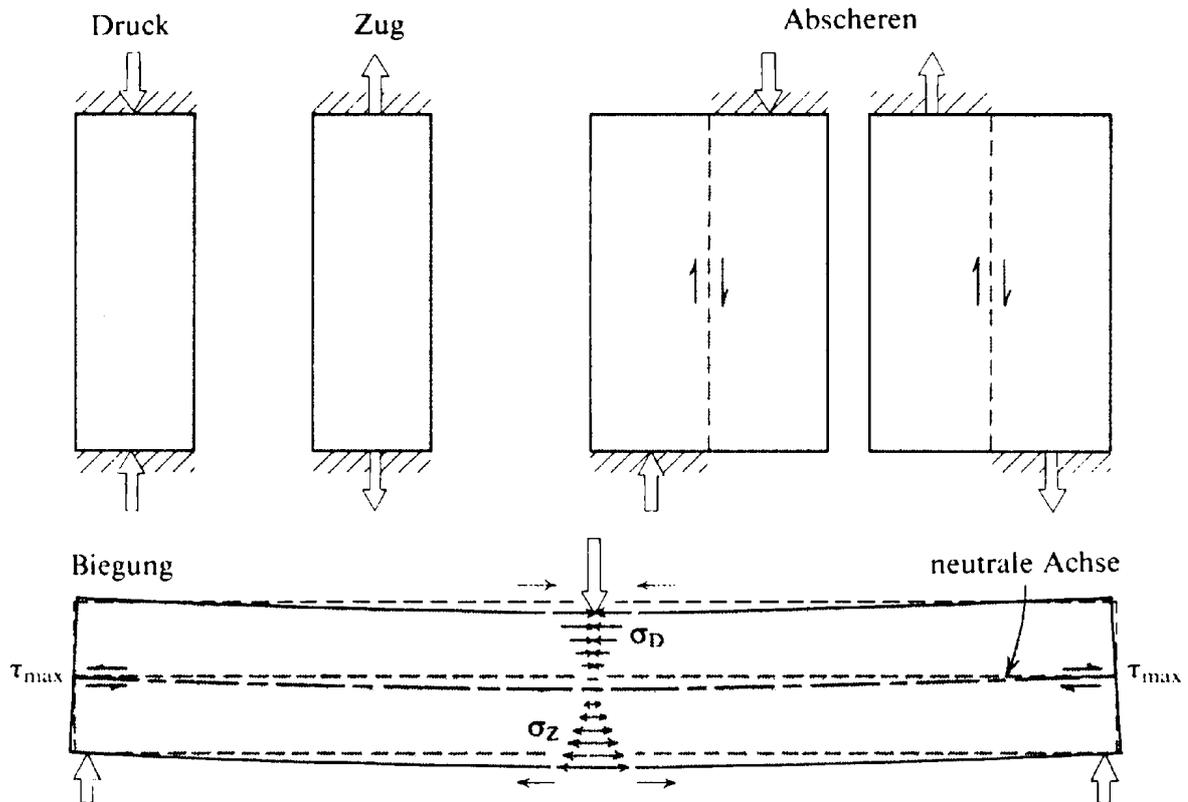


Abbildung 17: Druck, Zug und Abscheren sind die Hauptspannungsarten, und alle drei Arten treten in einem biegebeanspruchten Balken auf: Druck ( $\sigma_D$ ) entlang der oberen Balkenhälfte, Zug ( $\sigma_Z$ ) entlang der unteren Hälfte und Scherbeanspruchung ( $\tau_{max}$ ) in der neutralen Achse.  
 AUS HOADLEY (1990, S. 127, Bild 6-6).

Richtung (Indizes  $t$ ,  $r$ ,  $a$  oder  $\parallel$  für parallel bzw.  $\perp$  senkrecht zur Faser) der Krafteinwirkung mit anzugeben und ob es sich um die Spannung an der Proportionalitätsgrenze (Index  $P$ ) oder die Bruchspannung (Index  $B$  oder  $max$ ) handelt. Letztere wird von HOADLEY (1990) als Festigkeit  $\beta$  bezeichnet. Um eine Verwechslung mit dem im folgenden Abschnitt eingeführten Schwindmaß  $\beta$  zu vermeiden, ist es ratsam  $\sigma_B$ , bzw.  $\sigma_{max}$  zu verwenden. Auf Schub-, Spalt- und Torsionsfestigkeit wird hier nicht näher eingegangen, da sie zur Beschreibung der durch Luftfeuchteschwankungen hervorgerufenen inneren Spannungen weniger geeignet sind.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Die Spaltfestigkeit beschreibt zwar ähnlich wie die Querkzugfestigkeit den Widerstand gegenüber einer Auftrennung in zwei Teile senkrecht zur Längsachse. Allerdings vergrößert sie sich durch Verwachsungen und Äste, welche die Querkzugfestigkeit vermindern. Die Torsion spielt bei drehwüchsigem und wechsellrehwüchsigem Holz durchaus eine Rolle. Stark drehwüchsiges Holz wurde aber kaum als Werkstoff verwendet (KOLLMANN 1951, S. 28). Und „bei wechsellrehwüchsigen Holzarten ist eine genaue Messung und Erfassung des Faserverlaufes nicht möglich“ (DIN 52181, S. 3).

Zur Ermittlung der Festigkeits-Kennwerte dienen genormte Verfahren, von denen einige in Tabelle 4 zusammengestellt sind.

	Zug	Druck	Abscheren	Biegung
Parallel zur Faser	DIN 52188	DIN 52185	DIN 52187 DIN EN 1193	
Senkrecht zur Faser	DIN EN 1193	DIN EN 1193 DIN 52192		DIN EN 1193 DIN 52186

Tabelle 4: In Deutschland geltende Normen zum Ermitteln der Festigkeitseigenschaften.

NIEMZ (1993) gibt die folgenden Definitionen:

Die Druckfestigkeit  $\sigma_{dB}$  ist der Widerstand bei Druckbeanspruchung (Index  $d$ ) gegen Bruch (Index  $B$ ).

$$\sigma_{dB} = \frac{F}{A} \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (14)$$

$F$  Bruchkraft bzw. (bei Belastungen senkrecht zur Faser) Quetschgrenze [N]

$A$  Querschnittsfläche vor Beginn des Versuchs [mm<sup>2</sup>]

Die Zugfestigkeit  $\sigma_{zB}$  ist der Widerstand bei Zugbeanspruchung (Index  $z$ ) gegen Bruch (Index  $B$ ).

$$\sigma_{zB} = \frac{F}{A} \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (15)$$

Die Scherfestigkeit  $\tau$  ist der Widerstand, den ein Körper der Verschiebung zweier aneinanderliegender (Scher-)Flächen  $A$  entgegensetzt.

$$\tau = \frac{F}{A} \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (16)$$

Die Biegefestigkeit  $\sigma_{bB}$  ist der Widerstand bei Biegebeanspruchung (Index  $b$ ) gegen Bruch (Index  $B$ ).

$$\sigma_{bB} = \frac{M_b}{W_b} \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (17)$$

$M_b$  Biegemoment

$W_b$  Widerstandsmoment

Nach DIN 52 186 (Abbildung 18) ist die Biegefestigkeit  $\sigma_{bB}$  für einen rechteckigen Probenquerschnitt und mittigem Kraftangriff  $F$

$$\sigma_{bB} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (18)$$

$l$  Stützweite [mm]

$h$  Probenhöhe [mm]

$b$  Probenbreite [mm]

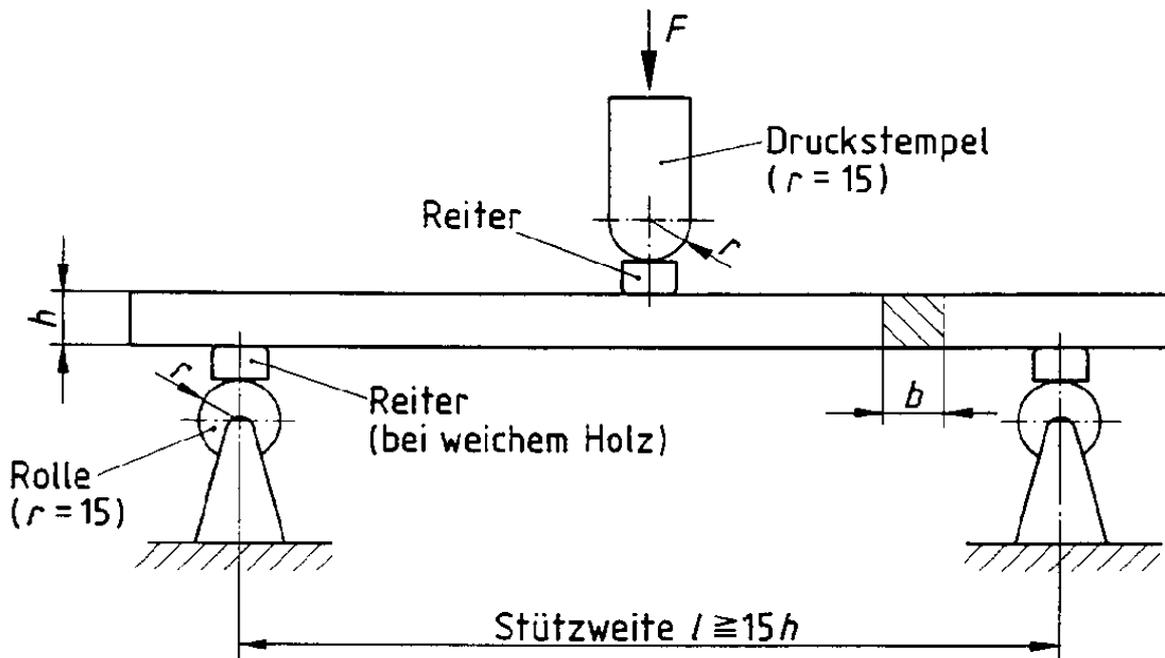


Abbildung 18:  
 Versuchsanordnung für die Biegeprüfung bei mittigem Kraftangriff nach DIN 52 186.  
 Aus DIN 52 186 (S. 1, Bild 1).

### 3.8.1 Abhängigkeiten der Festigkeitseigenschaften

Alle genannten Festigkeitseigenschaften hängen von Einflußfaktoren ab, die sich wie in Tabelle 5 aufgeführt einteilen lassen. Belastungszeit, Umgebungsklima und anatomisch bedingte Parameter des Holzes müssen mit berücksichtigt werden, um möglichst genaue Festigkeitskennwerte für Kulturgut zu erhalten. Diese Werte sind die Voraussetzung, um die Empfindlichkeit des Materials, bzw. dessen Schädigung durch äußere Einflüsse abschätzen zu können.

Zeit	Belastungsdauer: statisch oder dynamisch		
Umgebungsbedingungen	Temperatur	Feuchtigkeitsgehalt, bzw. Feuchtegradient	
materialbedingt	Holzart (Dichte)	Anatomie (Faserverlauf)	„Holzfehler“ (Wuchsanomalien, Äste, etc.)

Tabelle 5: Einteilung der Einflußfaktoren auf die Festigkeitseigenschaften der Hölzer.

Die Abhängigkeiten von diesen Einflußfaktoren sind größtenteils erforscht und können daher berücksichtigt werden. Die in den Abbildungen 19 und 20 idealisiert dargestellte Feuchte- bzw. Temperaturabhängigkeit einiger Festigkeitseigenschaften veranschaulichen beispielhaft solche Zusammenhänge.

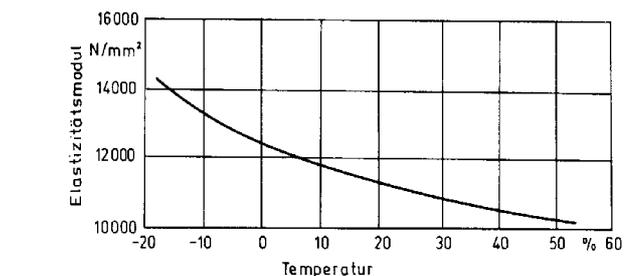
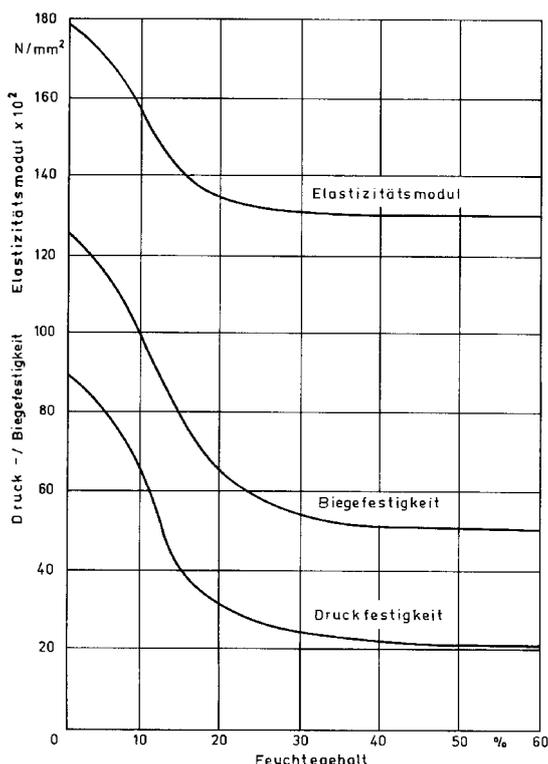


Abbildung 19:  
 Einfluß der Temperatur auf den E-Modul von Kiefernholz.  
 Aus NIEMZ (1993, S. 143, Abb. 12/15).

Abbildung 20:  
 Einfluß der Holzfeuchte auf E-Modul, Biege- und Druckfestigkeit.  
 Aus NIEMZ (1993, S. 143, Abb. 12/13).

Abbildung 21 zeigt die nach Holzarten differenzierte Abhängigkeit der Druckfestigkeit (in Faserrichtung) von der Holzfeuchte. Die Schwankungsbreiten von Festigkeitseigenschaften innerhalb einer Holzart, wie in Abbildung 22 dargestellt, sind hauptsächlich mit der Rohdichte korreliert. Sie lassen sich somit durch eine Dichtebestimmung eingrenzen. Für Faserverläufe, die sich aus Komponenten der drei anatomischen Hauptrichtungen zusammensetzen gibt es z. B. bei KOLLMANN (1951) Umrechnungsformeln. Die von den Unterschieden in der Zellstruktur hervorgerufenen Abweichungen lassen sich in der Praxis nicht vorhersagen (HOADLEY 1990, S. 149). Man greift daher bei statisch belasteten Holzbauteilen auf Sicherheitsfaktoren zurück (NIEMZ 1993, S. 156).

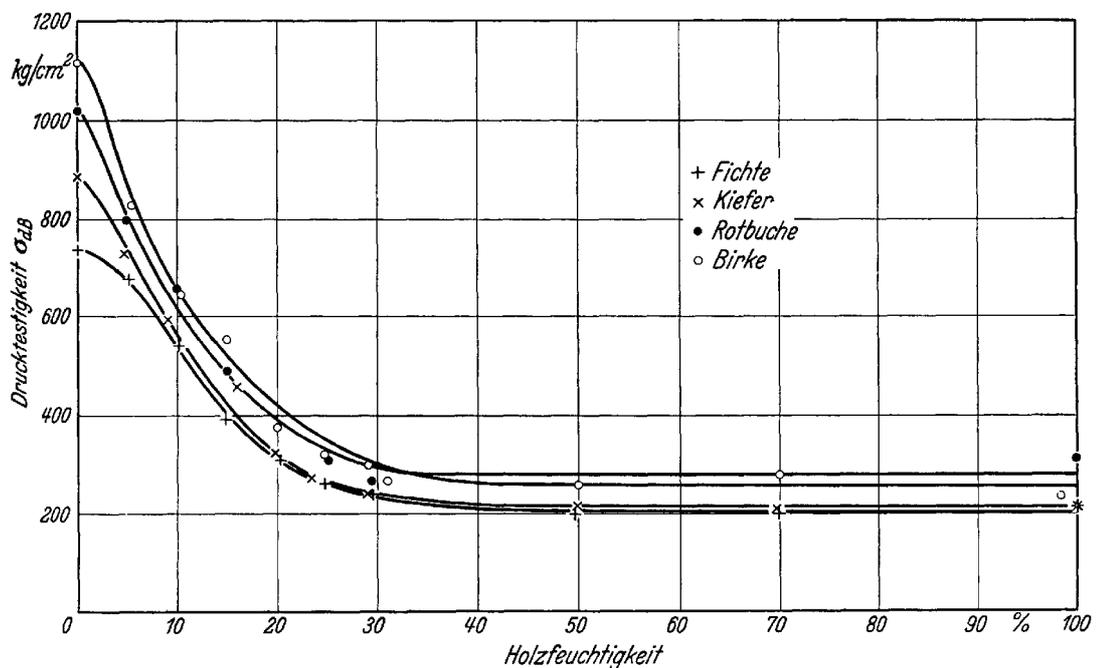


Abbildung 21: Abhängigkeit der Druckfestigkeit verschiedener Hölzer von der Holzfeuchtigkeit. Aus KOLLMANN (1951, S. 737, Bild 652).

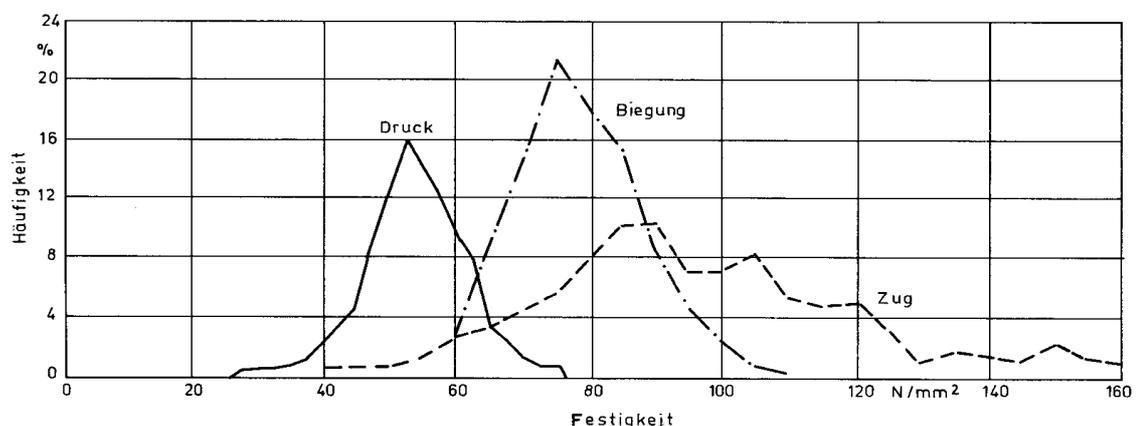


Abbildung 22: Häufigkeitsverteilung der Druck-, Zug- (in Faserrichtung) und Biegefestigkeit von Fichte. Aus NIEMZ (1993, S. 142, Abb. 12/12).

### 3.9 Quellen und Schwinden

Das in den Zellwänden sorbierte Wasser beeinflusst den Abstand der Mikrofibrillen in den amorphen Bereichen. Veränderungen der Holzfeuchte unterhalb der Fasersättigung bewirken daher auch eine Volumenänderung. Diese hygrische Dilatation bzw. Kontraktion wird je nach Sorptionsrichtung durch Quell- oder Schwindmaße ausgedrückt. Durch ihren Bezug auf das darrtrockene Volumen sind die Quellmaße immer etwas höher als die entsprechenden Schwindmaße, die sich auf das Volumen im maximal gequollenen Zustand beziehen. Wegen der Anisotropie des Holzes unterscheiden sich die linearen Quell- und Schwindmaße in den drei anatomischen Hauptrichtungen. Zur genauen Charakterisierung benötigt man daher die Maße in tangentialer, radialer und longitudinaler Richtung, aus denen sich das weniger aussagekräftige Volumenquellmaß bzw. Volumenschwindmaß berechnen läßt. Im folgenden werden die Definitionen nach DIN 52 184 für Quell- und Schwindmaße angegeben.

Unter dem linearen Quellmaß  $\alpha$  in einer bestimmten holzanatomischen Richtung versteht man die Maßänderung bei einer Zunahme des Holzfeuchtigkeitsgehaltes von  $u_1$  auf  $u_2$ , bezogen auf das Maß  $l_0$  im darrtrockenen Zustand ( $u_0 = 0\%$ ):

$$\alpha = \frac{l_2 - l_1}{l_0} \cdot 100 \quad \left[ \frac{\%}{\%} \right] \quad (19)$$

Hierin bedeuten  $l_0, l_1, l_2$  die Maße des Holzes in einer bestimmten Richtung bei den Holzfeuchtigkeitsgehalten  $u_0, u_1$  und  $u_2$ . Ein Sonderfall des linearen Quellmaßes  $\alpha$  ist das maximale lineare Quellmaß  $\alpha_{max}$ , das sich bei der Quellung des Holzes vom darrtrockenen Zustand auf den nassen, maximal gequollenen Zustand (Feuchtigkeitsgehalt über der Fasersättigungsfeuchte) ergibt. Demnach ist das maximale lineare Quellmaß definiert als:

$$\alpha_{max} = \frac{l_w - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad \left[ \frac{\%}{\%} \right] \quad (20)$$

Hierin bedeutet  $l_w$  das Maß des nassen Holzes in einer bestimmten anatomischen Richtung.

Analog zu dem linearen Quellmaß  $\alpha$  versteht man unter dem linearen Schwindmaß  $\beta$  die Maßänderung in einer bestimmten holzanatomischen Richtung bei einer Abnahme des Holzfeuchtigkeitsgehaltes von  $u_2$  auf  $u_1$ , bezogen auf das Maß  $l_W$  des nassen („grünen“) Holzes:

$$\beta = \frac{l_2 - l_1}{l_W} \cdot 100 \quad [\%] \quad (21)$$

Ein Sonderfall des linearen Schwindmaßes  $\beta$  ist das Trocknungs-Schwindmaß  $\beta_N$ , das sich bei der Trocknung vom nassen Zustand des Holzes auf den normalklimatisierten Zustand bei  $20^\circ\text{C} \pm 1$  Lufttemperatur und  $65\% \pm 3$  rF ergibt. Demnach ist das Trocknungs-Schwindmaß definiert als

$$\beta_N = \frac{l_W - l_N}{l_W} \cdot 100 \quad [\%] \quad (22)$$

Hierin bedeutet  $l_N$  das Maß des Holzes in einer bestimmten Richtung nach der Lagerung im Normklima DIN 50 014 – 20/65 – 1 (Luftdruck 860 bis 1060 hPa; Luftgeschwindigkeit  $\leq 1$  m/s).

Das maximale lineare Schwindmaß  $\beta_{max}$  ist ein Sonderfall der Gleichung (21):

$$\beta_{max} = \frac{l_W - l_0}{l_W} \cdot 100 \quad [\%] \quad (23)$$

Das Volumenquellmaß  $\alpha_V$  ergibt sich aus den linearen Quellmaßen der drei anatomischen Hauptrichtungen, die mit den Indizes  $r$  (radial),  $t$  (tangential) und  $l$  (longitudinal) bezeichnet werden:

$$\alpha_V = \frac{(100 + \alpha_r)(100 + \alpha_t)(100 + \alpha_l)}{10000} - 100 \quad [\%] \quad (24)$$

Für das Volumenschwindmaß  $\beta_V$  ergibt sich analog:

$$\beta_V = 100 - \frac{(100 - \beta_r)(100 - \beta_t)(100 - \beta_l)}{10000} \quad [\%] \quad (25)$$

Quellungs- und Schwindungsfaktoren  $K$  (auch als differentielle Quellung bzw. Schwindung bezeichnet) stellen eine weitere Möglichkeit dar, die Maßänderungen auszudrücken. Und zwar in den einzelnen Schnittrichtungen in Prozent je 1% Holzfeuchtegehaltsänderung. DIN 52 184 definiert die differentielle Quellung  $q$  als das prozentuale Quellmaß des Holzes je 1% Holzfeuchtigkeitsänderung in dem Luftfeuchtebereich<sup>8</sup> von etwa  $\varphi_T \approx 35\%$  bis  $\varphi_F \approx 85\%$ . Demnach gilt:

$$q = \frac{l_F - l_T}{l_0(u_F - u_T)} \cdot 100 \quad \left[ \begin{array}{c} \% \\ 0 \\ \% \end{array} \right] \quad (26)$$

$l_F$  das Maß des Holzes im Feuchtklima nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes [mm]

$l_T$  das Maß des Holzes im Trockenklima nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes [mm]

$u_F$  der Feuchtigkeitsgehalt des Holzes im Feuchtklima nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes [%]

$u_T$  der Feuchtigkeitsgehalt des Holzes im Trockenklima nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes [%]

Hierbei stehen die Indizes  $F$  (feucht) und  $T$  (trocken) für die innerhalb der angegebenen Grenzen wählbare Einstellung des Feuchtklimas bei  $20^\circ\text{C}$  und  $80\% \leq \varphi_F \leq 90\%$  bzw. des Trockenklimas bei  $20^\circ\text{C}$  und  $30\% \leq \varphi_T \leq 40\%$ .

Der Quellungs- bzw. Schwindungskoeffizient ist analog auf Änderungen der relativen Luftfeuchte bezogen. Unter dem Quellungskoeffizient  $h$  versteht man das prozentuale Quellmaß in einer bestimmten anatomischen Richtung je 1% relative Luftfeuchteänderung im Bereich von etwa  $\varphi_T \approx 35\%$  bis  $\varphi_F \approx 85\%$ . Demnach gilt:

$$h = \frac{l_F - l_T}{l_0(\varphi_F - \varphi_T)} \cdot 100 \quad \left[ \begin{array}{c} \% \\ 0 \\ \% \end{array} \right] \quad (27)$$

$l_F$  das Maß des Holzes im Feuchtklima nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes

$l_T$  das Maß des Holzes im Trockenklima nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes

$\varphi_F$  das Feuchtklima  $\geq 80\% \leq 90\%$  bei  $20^\circ\text{C}$

$\varphi_T$  das Trockenklima  $\geq 30\% \leq 40\%$  bei  $20^\circ\text{C}$

Die Einschränkung des zulässigen rF-Bereiches ist bei diesen Koeffizienten erforderlich, da sie sich auf die relative Luftfeuchte statt der Holzfeuchte beziehen. Deren Abhängigkeit wird durch die Sorptionsisotherme (Abbildung 23, links) ausgedrückt, die nur in dem genannten Bereich als ungefähr linear angesehen werden kann. Auch verlaufen die Quellungs- bzw. Schwindungskurven bei Annäherung an die Fasersättigung nicht mehr linear. Abbildung 24 und 25

<sup>8</sup> DIN 52 184 verwendet  $\varphi$  als Symbol für die rF, statt  $U$  wie die in Abschnitt 3.4 genannte DIN 50 010-2.

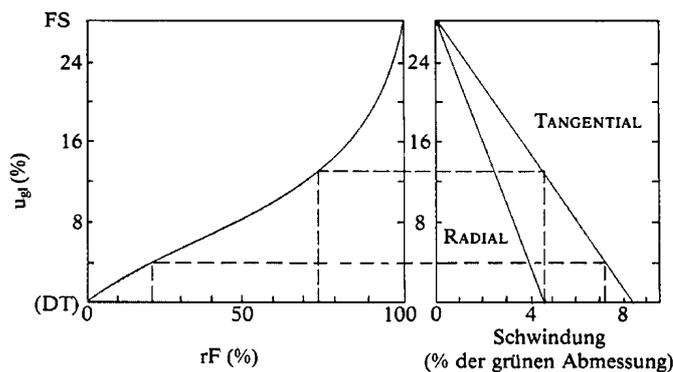


Abbildung 23: Dieses Doppel-Diagramm zeigt für die Holzart Roteiche den Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchte  $rF$  und Holzfeuchtegehalt  $u_{gl}$  einerseits sowie zwischen Holzfeuchte und tangentialer bzw. radialer Schwindung andererseits. Bei einer Trocknung von der Fasersättigung  $FS$  bei 100%  $rF$  auf 75% schwindet das Holz in tangentialer Richtung z. B. um 4,6%. Sinkt die  $rF$  auf 20%, beträgt die tangentielle Schwindung 7,2%. Nach HOADLEY (1990, S. 87, Bild 4-9).

veranschaulichen dies. In Abbildung 24 sind die Quellungskurven für Rotbuchenholz in tangentialer, radialer und longitudinaler Richtung, sowie die Volumenquellung aufgetragen. Den Unterschied in der Darstellung und der Werte (durch den Bezug auf das maximal gequollene Holzvolumen) bei der Schwindung zeigt Abbildung 25.

Die longitudinale Schwindung wird meist als vernachlässigbar angesehen, kann aber bei Mikrofibrillenwinkeln in der  $S_2$ -Schicht über  $30^\circ$ , wie sie z. B. bei Reaktionsholz auftreten, durchaus bedeutsam werden und Werte bis 2% annehmen

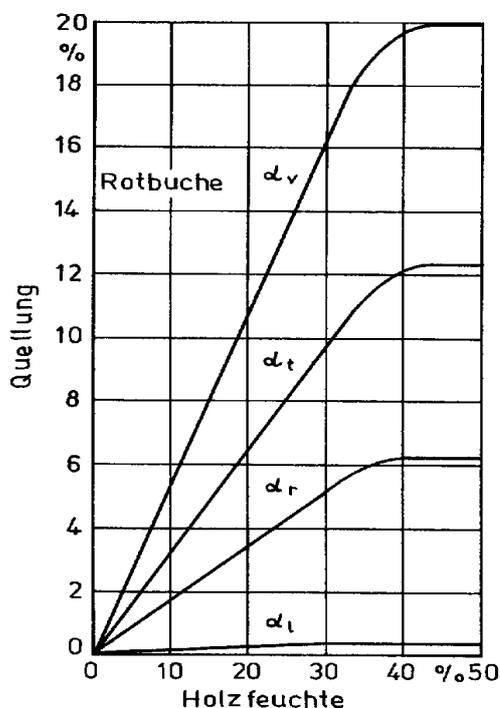


Abbildung 24: Quellungskurven für Rotbuchenholz, die das Volumenquellmaß  $\alpha_v$  und die linearen Quellmaße  $\alpha_t$  in tangentialer,  $\alpha_r$  in radialer, sowie  $\alpha_l$  in longitudinaler Richtung bezogen auf das Darrvolumen und abhängig von der Holzfeuchte angeben.

Aus NIEMZ (1993, S. 54, Abb. 4/23a).

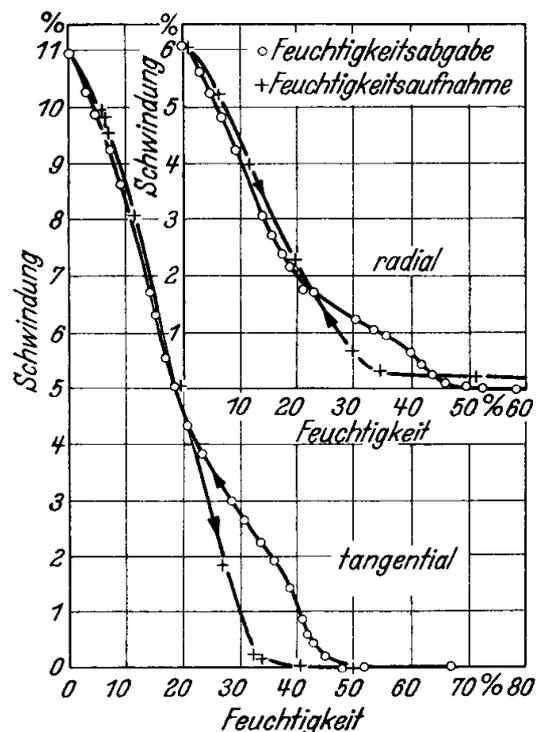
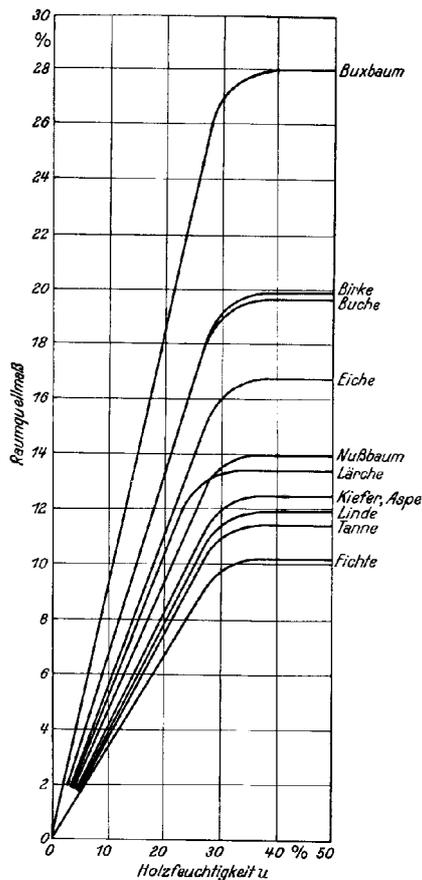


Abbildung 25: Schwindungs- bzw. Quellungskurven für Rotbuchenholz. Die prozentualen Maßänderungen sind auf das Volumen des maximal gequollenen Holzes bezogen und weisen daher gegenüber den Quellmaßen geringere Werte auf.

Aus KOLLMANN (1951, S. 417, Bild 310).



Holzart	$\beta_{max}$ tangential	$\beta_{max}$ radial	$\beta_t / \beta_r$
Teak	4,9	2,6	1,9
Nußbaum, europ.	6,4	4,3	1,5
Rotkiefer	7,2	3,8	1,9
Rotfichte	7,8	3,8	2,1
Linde, am.	9,3	6,6	1,4
Rotbuche, am.	11,9	5,5	2,2
Weißeweiche	12,7	5,3	2,4

Tabelle 6:  
 Näherungswerte für die maximale Schwindung  $\beta_{max}$  vom maximal gequollenen („grünen“) auf den darrtrockenen Zustand, bezogen auf den grünen Ausgangszustand, sowie die Schwindungsanisotropie  $\beta_t / \beta_r$ .  
 Nach HOADLEY (1990, S. 84-85, Tabelle 4-3).

Abbildung 26:  
 Quellungskurven für das Raumquellmaß einiger Holzarten. Die Kurven flachen beim Annähern an die Fasersättigung ab und verlaufen oberhalb parallel, d. h. es findet keine Quellung mehr statt. Aus KOLLMANN (1951, S. 334, Bild 235).

(BARBER; MEYLAN 1964. HARRIS; MEYLAN 1965. MÄRTENSSON 1992, S. 19). Die oft als Faustregel genannten maximalen Schwindmaße von tangential 8%, radial 4% und longitudinal 0,1% eignen sich nur zur groben Anschauung der Größenordnungen. Abbildung 26 zeigt die Raumquellmaße einiger Holzarten. In Tabelle 6 sind nach Holzarten differenzierte Durchschnittswerte für die maximalen Schwindmaße in tangentialer und radialer Richtung aufgeführt. Die maximale tangentielle Schwindung reicht bei den gegebenen Beispielen von 4,9% für Teak- bis zu 12,7% für Weißweichenholz. In radialer Richtung weist ebenfalls Teakholz mit 2,6% die geringste maximale Schwindung auf, die größte hat Lindenholz mit 6,6%.

In der letzten Spalte von Tabelle 6 ist der Quotient von  $\beta_t$  und  $\beta_r$  angegeben, der als Schwindungsanisotropie  $A_\beta$  bezeichnet wird. In DIN 52 184 wird die Schwindungsanisotropie  $A_\beta$  auf die Trocknungs-Schwindmaße  $\beta_N$  bezogen:

$$A_\beta = \frac{\beta_{N,t}}{\beta_{N,r}} \quad (28)$$

$A_\beta$  Schwindungsanisotropie

$\beta_{N,t}$  Trocknungs-Schwindmaß in tangentialer Richtung

$\beta_{N,r}$  Trocknungs-Schwindmaß in radialer Richtung



Die bisher genannten Maße und Koeffizienten gelten nur für die sogenannte freie Quellung und Schwindung. Dabei wird angenommen, daß sich das Holz in alle Richtungen ungehindert bewegen kann. Laut KEYLWERTH (1962a) kann man, selbst wenn Holz ohne äußere mechanische Behinderung und ohne nennenswertes inneres Feuchtegefälle quillt, nur eingeschränkt von freier Quellung bzw. Schwindung sprechen. Denn die unterschiedliche Molekülorientierung der Zellwandschichten erzeugt Spannungen auf submikroskopischer Ebene. In mikroskopischen Dimensionen trägt die inhomogene Morphologie der Holzzellwand ebenfalls zur Behinderung bei. Auch durch die makroskopischen Dichteunterschiede und die geometrische Anordnung der Jahrringe, sowie die Anisotropie treten im Holz Spannungen auf. Sie wirken der äußeren Verformung entgegen und können deren Ausmaß mindern. Allerdings spricht man hauptsächlich von behinderter Quellung oder Schwindung, wenn die Dimensionsänderung durch äußere Kräfteeinwirkungen unterbunden wird. Die weitere Erläuterung erfolgt am Beispiel der behinderten Quellung. Sie wirkt ähnlich, wie wenn man ein gequollenes Holzstück wieder auf sein Ausgangsmaß zusammendrücken würde. Allerdings bewies KEYLWERTH (1962b), daß die „freien“ Quellmaße ein sehr unzureichendes Kriterium zur Beurteilung des Verhaltens bei behinderter Quellung sind. Denn die „freien“ Quellungsformänderungen äußern sich bei Behinderung hauptsächlich in plastischer Verformung. Bei Quellungsbehinderung verursacht eine angestrebte Längenänderung von weniger als 1% schon eine Querdruckbelastung, die über der Proportionalitätsgrenze liegt (siehe Abbildung 28). Dies hat eine bleibende

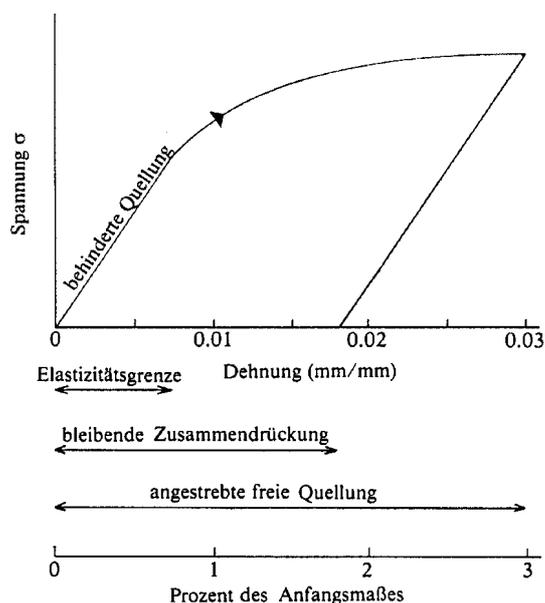


Abbildung 28:

Darstellung der behinderten Quellung in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Bei einer angestrebten Quellung um 3% quer zur Faser wird schon ab etwa 1% die Proportionalitätsgrenze für die Querdruckbeanspruchung überschritten. Das Maß der angestrebten freien Quellung abzüglich des elastischen Bereiches ergibt die bleibende Zusammendrückung.

Aus HOADLEY (1990, S. 132, Bild 6-13).

Druckstauchung zur Folge. Ein anschauliches Beispiel für diese Auswirkung der behinderten Quellung ist der Holzstiel in einem Hammerkopf, der sich bei Klimaschwankungen lockert (HOADLEY 1990, S. 131-134).

Wird nur die radiale Quellung unterdrückt, so bewirkt dies bei Kiefernspiltholz eine Steigerung der tangentialen Quellung um 5%. Wird dagegen die tangentiale Quellung behindert, hat dies eine Zunahme der unbehinderten radialen Quellung um 88% zur Folge. Die Längsquellung bleibt dagegen beinahe unbeeinflusst. Anhand von Abbildung 29 läßt sich dies verdeutlichen: Die rechts in der Mitte dargestellte Quellungsexpansion bei nicht eingeklemmtem Holz verläuft radial und tangential parallel und nahezu reversibel. Bei behinderter Quellung behält das Holz in der eingeklemmten Richtung seine Abmessung und dehnt sich nur in der unbehinderten Richtung aus. Bei der ungehinderten Zurücktrochnung schwindet das Holz in der eingeklemmten Richtung dann unter sein Ausgangsmaß. Mit steigender Zahl der Be- und Entfeuchtungszyklen kommt es zu einer zunehmenden, dauerhaften Schrumpfung, wobei die Ausdehnung in der freien Richtung zunimmt. In der von KOLLMANN (1951, S. 424) zitierten Untersuchung betrug diese Schrumpfung nach Wiederbefeuchten der Kiefernspiltholzproben 12,9% in tangentialer und 24,1% radialer in Richtung.

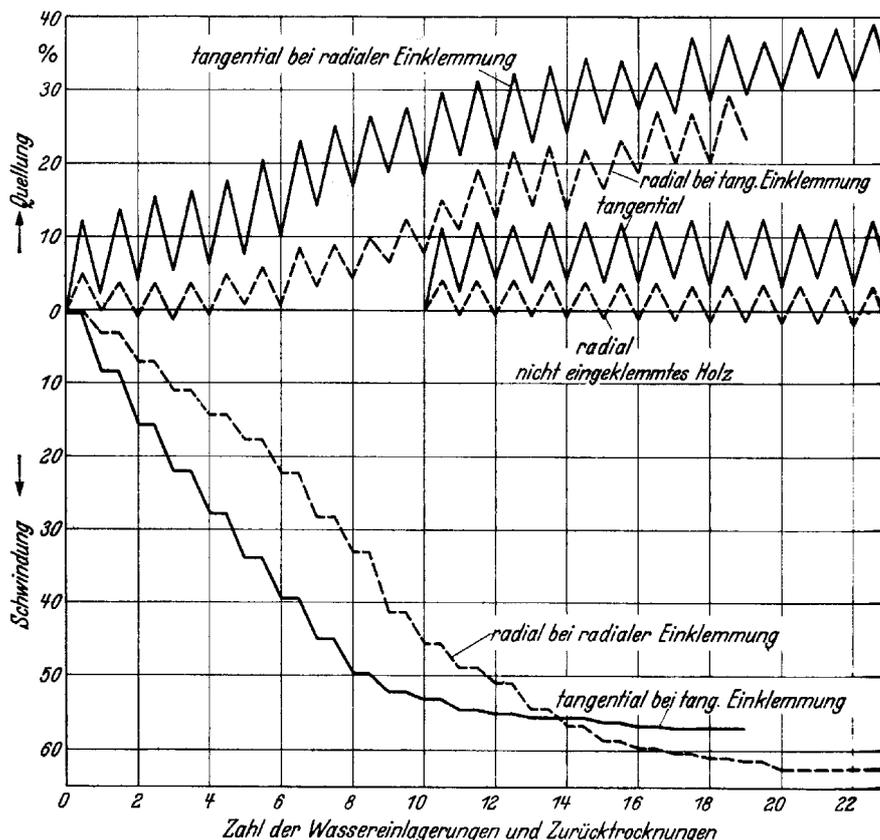


Abbildung 29:  
Quellung und Schwindung eingeklemmten und nicht eingeklemmten Holzes bei wiederholter Befeuchtung und Zurücktrochnung. Aus KOLLMANN (1951, S. 424, Bild 320).

### 3.10 Rheologie des Holzes

Bei der Beschreibung der mechanischen Eigenschaften wird Holz oft als viskoelastischer Festkörper bezeichnet. Das heißt, daß es neben seinem elastischen Verhalten auch viskose Eigenschaften besitzt. Es mag zunächst befremdlich erscheinen, Holz eine Fließfähigkeit zuzuschreiben. Die Definition und Betrachtung des Holzes als Gel, die BARKAS (1949) vornahm, eignet sich jedoch sehr gut, um zeitabhängige Spannungs- und Formänderungen verstehen und beschreiben zu können. Am anschaulichsten zeigt sich diese Holzeigenschaft bei der Herstellung von Bugholzmöbeln. Dabei werden mittels Dampf plastifizierte Holzteile in eine neue Form gebogen, welche nach Erreichen des Holzfeuchtegleichgewichts weitgehend erhalten bleibt. Die wichtigsten rheologischen Eigenschaften des Holzes sind nach NIEMZ (1993, S. 172) das Kriechen, die Spannungsrelaxation und die Dauerstandfestigkeit.

Ein mit konstanter Kraft belastetes Holzteil verformt sich. Die Zunahme dieser Verformung bei wachsender Belastungsdauer wird als Kriechen bezeichnet. Anhand von Abbildung 30 läßt sich dieser Vorgang verdeutlichen. Bei einer sogenannten Kriechkurve wird die Verformung  $\epsilon$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  aufgetragen. Mit Beginn der Belastung bildet sich unmittelbar eine quasi-elastische Verformung  $\epsilon_{el}$  aus. Diese vergrößert sich mit der Zeit um die verzögerte elastische Verformung  $\epsilon_{en}$ . Oberhalb einer bestimmten Last wird sie dann von der plastischen Verformung  $\epsilon_{pl}$  überlagert. Nach Entlastung geht die quasi-elastische Verformung wieder unmittelbar zurück. Auch die verzögerte elastische Verformung ist bei ausreichend langer Entlastungszeit reversibel. Die plastische Verformung bleibt jedoch als Differenz zur Ausgangsform erhalten, sofern ihr nicht aktiv, z. B. durch Dämpfen und umgekehrte Belastung entgegengewirkt wird.

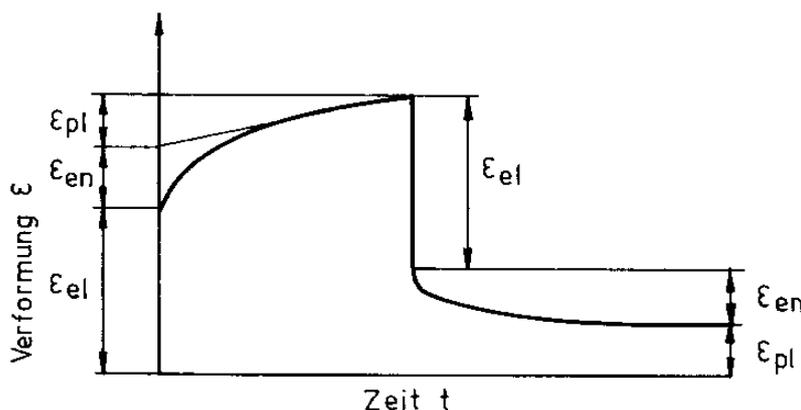


Abbildung 30:  
Zeitabhängiger Verlauf der Verformung bei Belastung und anschließender Entlastung. Es bedeuten  $\epsilon_{el}$  quasi elastische Verformung,  $\epsilon_{en}$  verzögerte elastische Verformung und  $\epsilon_{pl}$  plastische Verformung. Aus NIEMZ (1993, S. 173, Abb. 12/57).

Der Kriechvorgang läßt sich in drei Abschnitte einteilen, was in Abbildung 31 dargestellt ist. In der ersten werden die Moleküle durch die Belastung stärker ausgerichtet. Diese Verstreckung wird mit zunehmender Dehnung und Ausrichtung behindert, weshalb das Primärkriechen degressiv abnimmt. Das Sekundärkriechen beginnt ab einer bestimmten Spannung, bei der die ersten molekularen Bindungen brechen. Diese Risse schließen sich aber wieder. Bei weiter zunehmender Spannung setzt das Tertiärkriechen ein. Es werden nun mehr Bindungen zerstört als neue gebildet, wodurch die Verformung progressiv ansteigt. Schließlich kommt es zum Kriechbruch. Der Anteil dieser drei Abschnitte ist neben den klimatischen Bedingungen sehr stark von der Belastung abhängig, was aus Abbildung 32 hervorgeht.

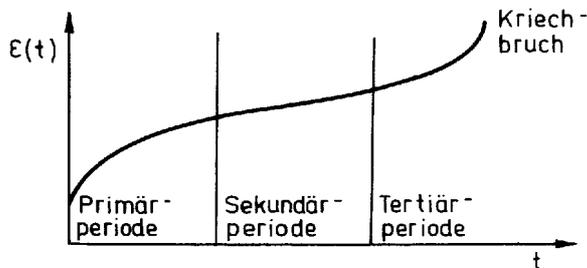


Abbildung 31:  
 In Abschnitte aufgeteilte idealisierte Kriechkurve.  
 Aus NIEMZ (1993, S. 172, Abb. 12/56a).

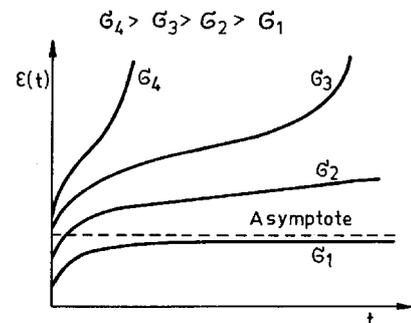


Abbildung 32: Kriechkurven bei unterschiedlichen Belastungsgraden.  
 Aus NIEMZ (1993, S. 172, Abb. 12/56b).

Zur Beurteilung des Kriechverhaltens werden nach NIEMZ (1993, S. 173-174) die folgenden Kenngrößen verwendet:

Als absolute Kriechverformung  $\Delta f$  bezeichnet man die Gesamtverformung  $f_t$  nach der Belastungsdauer  $t$  abzüglich der elastischen Verformung  $f_0$

$$\Delta f = f_t - f_0 \quad [mm] \quad (30)$$

Die Kriechzahl  $\varphi$  ist das Verhältnis der absoluten Kriechverformung  $\Delta f$  zur elastischen Verformung  $f_0$  und somit dimensionslos.

$$\varphi = \frac{f_t - f_0}{f_0} \quad (31)$$

Die Kriechzahl  $\varphi = 1$  besagt demnach, daß die Gesamtverformung den doppelten Wert der elastischen Verformung annimmt.

Der Kriechfaktor  $F$  ist das Verhältnis der Gesamtverformung  $f_t$  nach der Belastungsdauer  $t$  zur elastischen Verformung  $f_0$  und somit ebenfalls dimensionslos.

$$F = \frac{f_t}{f_0} \quad (32)$$

Ein Kriechfaktor  $F = 1$  bedeutet also keine Kriechverformung, während bei  $F = 2$  die Kriechverformung gleich der elastischen Verformung ist, was der Kriechzahl  $\varphi = 1$  entspricht.

Mit dem Kriechfaktor  $F$  läßt sich aus dem E-Modul  $E_0$  bei Kurzzeitbelastung ein zeitabhängiger E-Modul  $E_t$  berechnen, der sowohl als Materialkennwert als auch zu statischen Berechnungen herangezogen wird.

$$E_t = \frac{E_0}{F} \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (33)$$

Laut NIEMZ (1993, S. 174) gibt es noch keine genormten Prüfverfahren zur Bestimmung der Kriechverformung. Sie kann aber grundsätzlich für alle Belastungsarten (Zug, Druck, Biegung, Torsion) ermittelt werden, wobei die Belastung durch Biegung am häufigsten verwendet wird. In Abbildung 33 sind Kriechfaktoren nach Belastungsart differenziert aufgetragen. Laut GRESSEL (1984) liegt das relative Kriechen unter Biegebeanspruchung bei einem Belastungsgrad von 20-30% in der gleichen Größenordnung wie bei Druckbeanspruchung parallel zur Faser. Quer zur Faser sind sowohl Druck- als auch Zug-Kriechen wesentlich stärker.

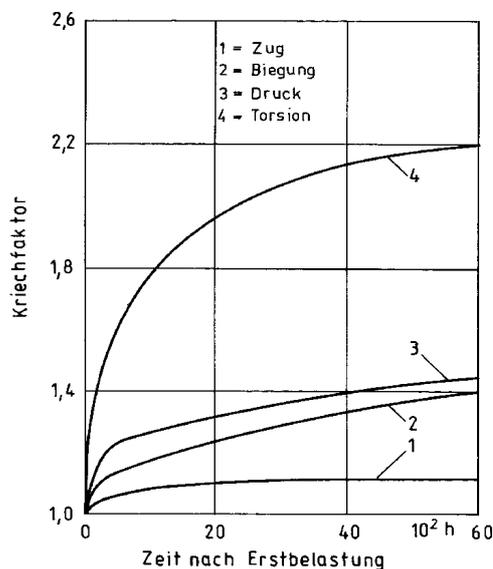


Abbildung 33:  
 Einfluß der Belastungsart auf den Kriechfaktor von Fichte.  
 Aus NIEMZ (1993, S. 178, Abb. 12/65).

Die Kriechzahl beträgt für Holz im Normalklima (20/50) parallel zur Faserrichtung etwa 0,1 bis 0,3. Senkrecht zur Faserrichtung dagegen 0,8 bis 1,6 (NIEMZ 1993, S. 178), wobei sie in tangentialer Richtung größer ist als in radialer. Da das Kriechen bei größerer relativer Luftfeuchte zunimmt, gibt es Kriechzahl-Korrekturfaktoren für den Feuchteeinfluß im Konstantklima (siehe Tabelle 7). Die Kriechverformung kann demnach ein mehrfaches der ursprünglichen elastischen Verformung betragen (GRESSEL 1984).

rF	50%	60%	70%	80%
Korrekturfaktor $K$	1	1,2 ... 1,3	1,4 ... 1,5	1,8 ... 2,0

Tabelle 7:  
 Kriechzahl-Korrekturfaktoren  $K$  für den Feuchteeinfluß. Nach NIEMZ (1993, S. 178, Tabelle 12/19).

Bei (zyklischen) Luftfeuchteschwankungen nimmt die Kriechverformung zu. Diese Eigenschaft bezeichnet man als mechano-sorptives Kriechen. Die Belastungsdauer und die (visko-elastische) Kriechzahl haben dabei nach NAVI ET AL. (2002) keinen Einfluß. Das Ausmaß des mechano-sorptiven Kriechens hängt hauptsächlich von der Luftfeuchtedifferenz ab. Die Höhe der Feuchte hat dagegen kaum und ihre Änderungsgeschwindigkeit keinen Einfluß (ARMSTRONG; CHRISTENSEN 1961. TORATTI; SVENSSON 2000). In seinen Kurzzeitversuchen konnte BENGTTSSON (2001a. 2001b) nur eine schwache Korrelation zu Materialeigenschaften feststellen. Am besten war dabei die Korrelation mit dem E-Modul. Während MOHAGER; TORATTI (1993) trotz vieler Luftfeuchtezyklen keine Grenze für das mechano-sorptive Kriechen feststellen konnten, zeigten die Versuche von NAVI ET AL. (2002) eine asymptotische Abnahme der Kriechverformung. WELLING ET AL. (2003, S. 30) erklären das mechano-sorptive Kriechen mit dem deutlich verschiedenen Quell- und Schwindverhalten der unterschiedlich ausgerichteten  $S_1$ - und  $S_2$ -Schicht in den Zellwänden. Bei Feuchteschwankungen kommt es daher zwischen diesen Schichten verstärkt zu Brüchen. Mit zunehmendem mechano-sorptiven Kriechen steigen deshalb die irreparablen Deformationen. Bei der Untersuchung druckbelasteter Prüfkörper aus Kiefernspiltholz stellte PERKITNY (1965) fest, daß selbst kleine Änderungen des Holzfeuchtegehaltes von  $u \pm 1\%$  die Kriecherscheinungen sehr deutlich beeinflussen. Wie aus Abbildung 46 zu entnehmen ist, bewirkt bei 20°C und 60% relativer Luftfeuchte eine Änderung der rF um 5% einen Holzfeuchteunterschied von  $u = 1\%$  (für Sitka-Fichte und bei genügend langer Angleichzeit).

Für die Spannungsrelaxation sind die gleichen Vorgänge wie beim Kriechen verantwortlich. Nur bewirken die Platzwechselfvorgänge der Moleküle dabei keine makroskopische Verformung sondern bauen innere Spannungen ab. In Abbildung 34 sind Spannung und Verformung für die rheologischen Eigenschaften abhängig von der Zeit aufgetragen. Dies verdeutlicht, daß beim Kriechen die Verformung bei konstanter Spannung zunimmt, während bei der Spannungsrelaxation keine äußere Verformung stattfindet sondern die innere Spannung abnimmt.

Unter der Dauerstandfestigkeit versteht man die Spannung  $\sigma_r$ , der das Werkstück in der angegebenen Zeit gerade noch standhält ohne zu brechen.

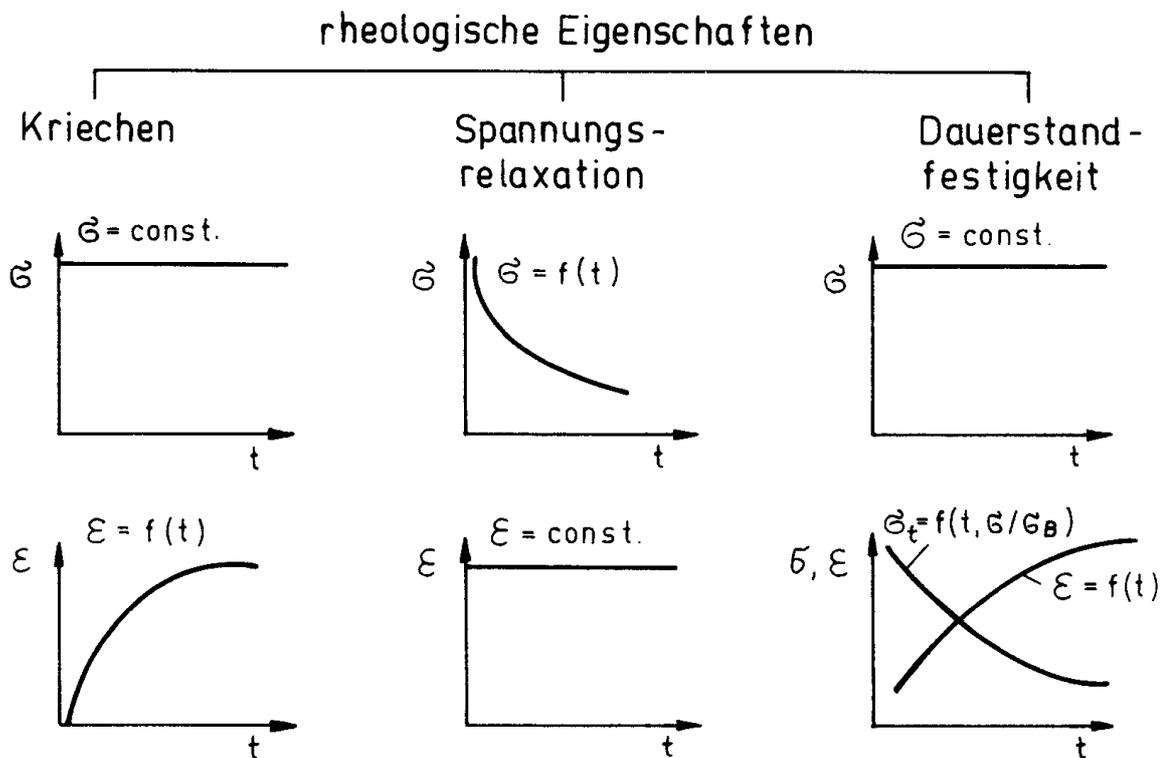


Abbildung 34:  
 Systematik der rheologischen Eigenschaften von Holz. Aus NIEMZ (1993, S. 172, Abb. 12/55).

## 4 Einflüsse auf die Kenngrößen bei historischen Hölzern

Da die bisher vorgestellten Kenngrößen vornehmlich zur Charakterisierung neuer Hölzer dienen, müssen für historisches Holz die verändernden Einflüsse berücksichtigt werden. Zuerst stellt sich die Frage, ob die Holzeigenschaften einer Alterung unterliegen. Im Lauf seiner Geschichte kann in Kulturgut verwendetes Holz zudem unterschiedlichsten Einflüssen ausgesetzt sein. Neben möglicher biologischer Schädigung können vor allem konservierende Eingriffe die Holzeigenschaften verändern.

### 4.1 Alter

Obwohl UNGER ET AL. (2001, S. 30) feststellen: „Whereas comprehensive overviews of changes in the physical and mechanical properties of dry historic wood, either sound or biologically degraded, are not available [...]“, liegen dennoch einige brauchbare Erkenntnisse zur Veränderung von Materialeigenschaften bei gealtertem Holz vor.

Schon BUCK (1952) wies darauf hin, daß sich das hygroskopische Verhalten von Holz nicht durch seine Alterung verändert. SCHULZ ET AL. (1984) untersuchten bei über 300 Jahre altem Fichtenholz die Quellung, Druck-, Zug- und Biegefestigkeit. Keines der Ergebnisse läßt eine grundsätzliche Verschlechterung durch die Alterung erkennen. Auch RUG; SEEMANN (1989) fanden bei Versuchen an Altholz aus dem 18., 19. und 20. Jahrhundert ein neuem Holz entsprechendes Festigkeitsverhalten. Für die über 500 Jahre alten Eichen- und Kiefernholzbalken der Spandauer St. Nikolai-Kirche stellen DEPPE; RÜHL (1993) die Tendenz zu geringerer Korrelation von Rohdichte/Druckfestigkeitskollektiven fest. Die Druckfestigkeitswerte weisen zwar eine mit Harzbildung, Gefügeveränderungen und Substanzverlusten erklärte größere Streuweite auf, haben aber im Mittel die Größenordnung von neuem Holz. Für die Quell- und Schwindmaße fand HOLZ (1981) im Durchschnitt keine Änderung durch Alterung. Die ebenfalls größere Streuung sieht er als Beweis für innere Spannungen. ERHARDT ET AL. (1996) verglichen die hygrischen Dimensionsänderungen und das Spannungs-Dehnungsverhalten von neuem Kiefernholz mit über 300 Jahre altem. Die Abweichungen bei den in Abbildung 35 und 36 wiedergegebenen Ergebnissen liegen innerhalb der Streuweite von neuem Holz.

Alle diese Untersuchungen konnten bei ungeschädigtem Holz keine signifikanten Änderungen der physikalischen Eigenschaften durch die Alterung feststellen.

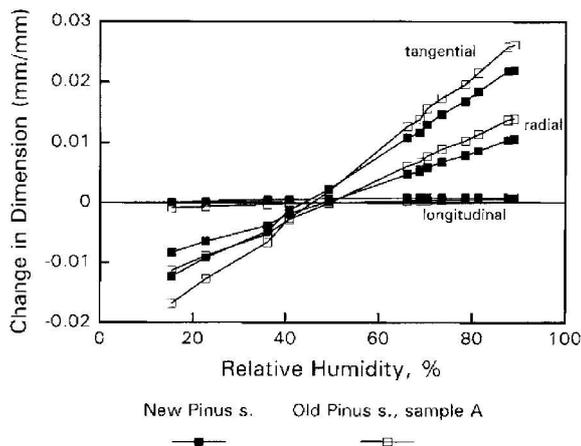


Abbildung 35: Änderung der Abmessungen in tangentialer, radialer und longitudinaler Richtung, abhängig von der rF für neues (**New Pinus s.**) und altes (**Old Pinus s.**) Kiefernholz.  
 Aus ERHARDT ET AL. (1996, S. 904, Figure 1).

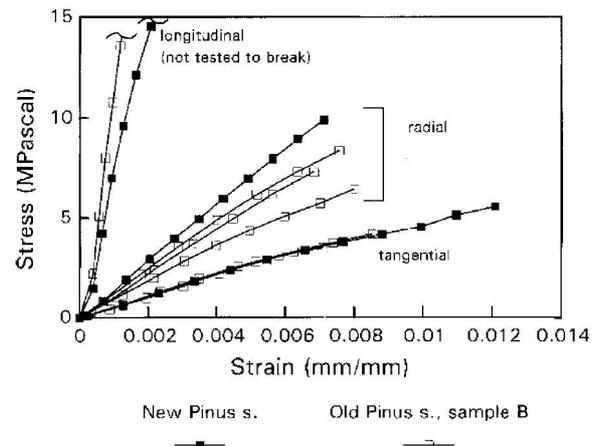


Abbildung 36: Spannungs-Dehnungs-Kurven in tangentialer, radialer und longitudinaler Richtung für neues (**New Pinus s.**) und altes (**Old Pinus s.**) Kiefernholz.  
 Aus ERHARDT ET AL. (1996, S. 904, Figure 2).

Lediglich UNGER ET AL. (2001, S. 29) erwähnen eine Abnahme der Gleichgewichtsfeuchte und eine geringere tangentiale Schwindung bei 1300 Jahre altem Hinoki-Holz (*Chamaecyparis obtusa*). Die an neuem Holz ermittelten Festigkeitswerte sind demnach auch für wenige hundert Jahre altes Holz gültig und anwendbar.

## 4.2 Biologische Schädigung

Die Festigung von durch holzerstörende Insekten, Pilze und Bakterien geschädigtem Holz stellt eine typische Arbeit für Restauratoren dar. Dennoch scheinen keine systematischen Kriterien zur Beurteilung des Schädigungsgrades bzw. der Festigkeit vorzuliegen, um die Notwendigkeit einer Festigung oder deren Ausmaß festlegen zu können. Die direkte Bestimmung von Festigkeitskennwerten ist bei geschädigtem Holz bisher nur mit zerstörenden Messungen möglich. Durch eine Quantifizierung der Schädigung über zerstörungsfrei meßbare Größen lassen sich dennoch Festigkeitswerte ermitteln, wenn deren Korrelation bekannt ist. Die von GÖRLACHER (1991) verwendete Methode zur Bestimmung des E-Moduls mittels Laufzeitmessung von Schallwellen liefert bei geschädigtem Holz aber zu hohe Werte. Dies liegt daran, daß die Laufzeit bei Hölzern mit uneinheitlichem E-Modul über den Querschnitt im wesentlichen durch die Bereiche mit hohen Werten beeinflusst wird. Für die Holzfestigung differenziert SCHIESSL (1995) die Schäden durch biologischen Befall nach pilz- oder insektengeschwächtem Holz.

#### 4.2.1 Fraßinsektenbefall

Wie eine Schädigung durch Fraßinsekten quantifiziert und in Beziehung zu den Festigkeitseigenschaften gebracht werden kann, zeigen beispielhaft die Arbeiten von GLOS (1989a, 1989b). Allerdings befallen die von ihm berücksichtigten drei Fraßinsekten-Arten (*Xyloterus lineatus*, Holzwespe und Fichtenbock) meist nur Holz mit sehr hohem Feuchtegehalt (über Fasersättigung). Zuerst wird die Befallsart anhand des arttypischen Fraßbildes festgestellt. Runde, schwarz gefärbte Fraßgänge mit einem Durchmesser von etwa 1,5 mm sind typisch für einen *Xyloterus lineatus*-Befall. Dagegen sind die mit hellfarbigem, bzw. bräunlichem Fraßmehl gefüllten Fraßgänge bei Holzwespen- und Fichtenbockbefall im Durchschnitt größer, mit Durchmessern von 1 bis 8 mm (im Mittel 4 mm). Anhand der Lochgröße, der Lochhäufigkeit und der Lochtiefe läßt sich der Befall quantifizieren. Die Lochhäufigkeit wird durch zählen der Fraßgänge innerhalb einer definierten Bezugsfläche um den Probenumfang bestimmt. Um den Einfluß der Probengröße zu eliminieren wird die Lochhäufigkeit mittels der Lochdichte normiert. GLOS (1989b, S. 367) definiert die Lochdichte als Division der Lochhäufigkeit durch den halben Prüfkörperumfang.

$$\text{Lochdichte} = \frac{\text{Lochhäufigkeit}}{b + d} \quad (34)$$

*b* Breite des Prüfkörpers [cm]

*d* Dicke des Prüfkörpers [cm]

Für die Lochtiefe konnte wegen des Abknickens der Fraßgänge und deren Verfüllung mit Bohrmehl oder Pilzhyphen keine befriedigende Meßmethode gefunden werden. Zur Korrelation mit der Druck- und Zugfestigkeit wurde daher nur die Lochdichte herangezogen. Abbildung 37 zeigt eine große Streuung der Zugfestigkeitswerte bei geringer Lochdichte. Die Werte bei großer Lochdichte liegen jedoch alle im unteren Bereich der Streuweite. Unter Berücksichtigung von Rohdichte und Ästigkeit, als auch der Kombination mit Pilzbefall kommt GLOS (1989b) zusammenfassend zu dem Ergebnis, daß sich die Druck- und Zugfestigkeit von Fichtenholz bei Holzwespen- und Fichtenbockbefall abhängig von dessen Ausmaß, jedoch unabhängig von der Holzqualität um über 10% vermindert. Die Biegefestigkeit kann sich sogar um bis zu 20% vermindern (GLOS 1989a). Die von NIEMZ (1993, S. 143-144) genannten Werte beziehen sich vermutlich auf GLOS (1989a, 1989b), da sie einander entsprechen.

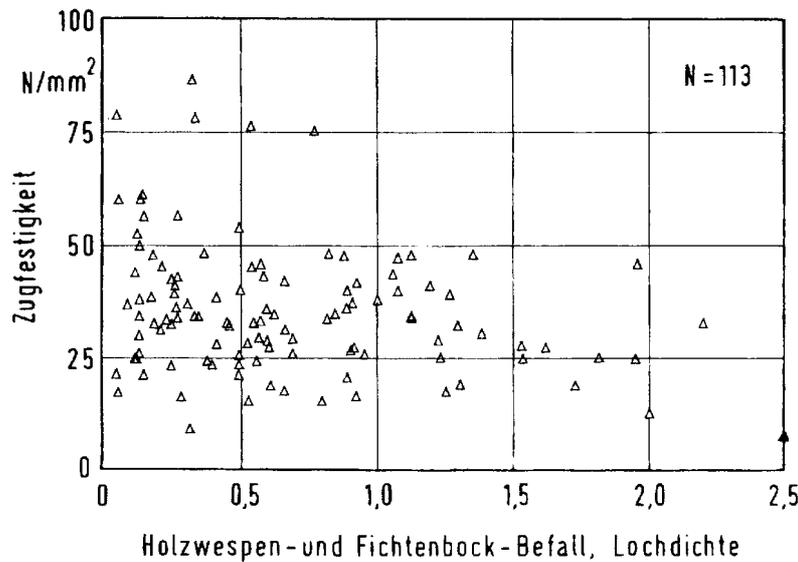


Abbildung 37:  
Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Lochdichte bei Holzwespen- und Fichtenbockbefall.  
Aus GLOS (1989b, S. 367, Bild 2).

Bei fraßgeschädigtem Holz an Kulturgut sind überwiegend Ausfluglöcher der Fraßinsekten sichtbar. Deren Anzahl läßt aber nur eingeschränkt Rückschlüsse auf das geschädigte Holzvolumen zu. Bei kleineren, transportablen Holzgegenständen, wie z. B. Skulpturen, müßte theoretisch durch computertomographische Verfahren eine genaue Berechnung des fraßgeschädigten Holzvolumens möglich sein. Eine praktische Umsetzung dieses Ansatzes ist aber nicht bekannt.

#### 4.2.2 Bakterienbefall

Über den Einfluß von Bakterienbefall auf Nutzholz liegen kaum Angaben vor. Sowohl KOLLMANN (1951, S. 43) als auch UNGER (1990, S. 33) sehen in Bakterien keine, bzw. nur eine geringe Bedeutung bei der Zerstörung von Nutzholz, da cellulosespaltende Bakterien vornehmlich dem Abbau des Holzes im Boden dienen. SCHNIEWIND (1990) beschreibt zwar die Auswirkungen einer Kunstharzfestigung auf bakteriengeschädigtes Holz, benennt aber weder Art noch Ausmaß des Befalls.

### 4.2.3 Pilzbefall

Die sogenannten echten holzerstörenden Pilze wie Braun-, Weiß- und Moderfäule bauen Holzinhaltsstoffe und Gerüstsubstanzen ab und führen daher zu deutlichen Festigkeitsverlusten. Bei der Weißfäule wird hauptsächlich das Lignin abgebaut und der somit erhöhte Celluloseanteil führt zur weißlichen Färbung. Auf das Sorptionsverhalten hat die Weißfäule nach NIEMZ (1993, S. 50) keinen Einfluß.

Nach KOLLMANN (1951, S. 48) ist die Biegefestigkeit der beste Weiser für den Festigkeitsverlust bei beginnendem Abbau durch Weißfäule. Die Korrelation der Biegefestigkeitsabnahme mit dem Masseverlust (NIEMZ 1993, S. 143-144) ist in Abbildung 38 dargestellt. Abbildung 39 zeigt das bei einem Biegebelastungsversuch bis zum Bruch aufgenommene Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Befall mit *Polyphorus versicolor* (Linn.) im Vergleich zu ungeschädigtem Holz.

Durch Braunfäule werden Cellulose und Hemicellulosen abgebaut. Die dadurch hervorgerufene Erhöhung des relativen Ligninanteils verursacht die braune Färbung. Der sich bei der Absorption einstellende Feuchtigkeitsgehalt des Holzes sinkt annähernd proportional zum Massenverlust. Auf die Desorption hat die Braunfäule dagegen keinen Einfluß (NIEMZ 1993, S. 48, 50).

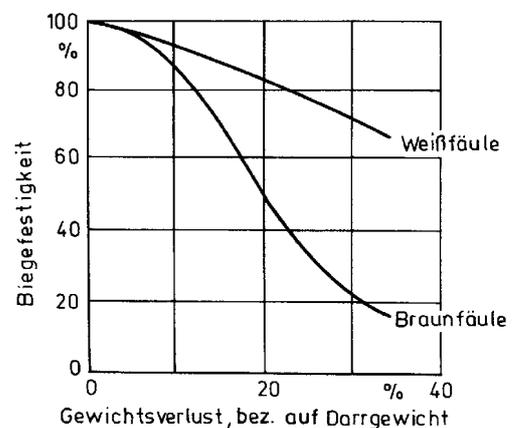
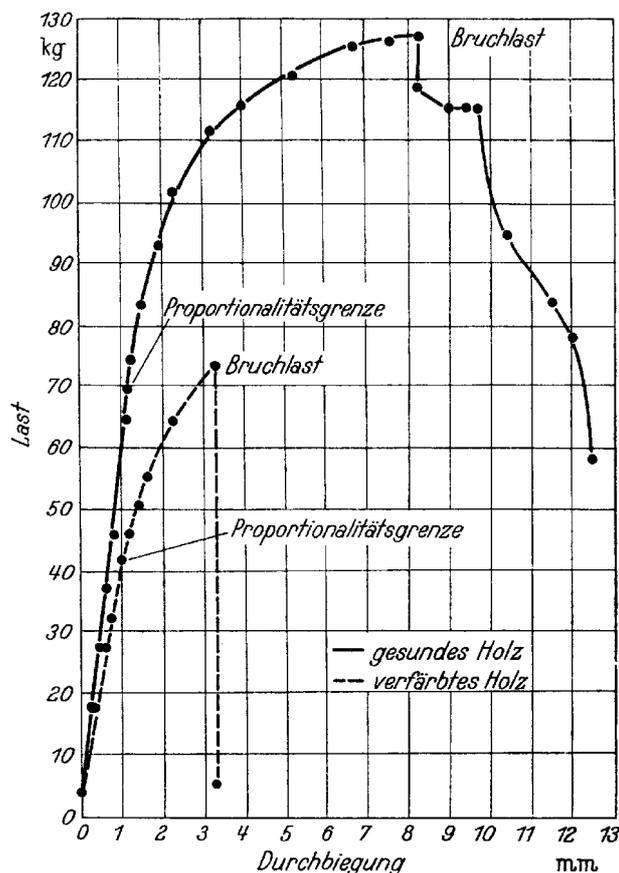


Abbildung 38:  
 Biegefestigkeit von Fichtenholz in Abhängigkeit vom durch Weiß- und Braunfäulebefall verursachten Gewichtsverlust.  
 Nach NIEMZ (1993, S. 144, Abb. 12-16c).

Abbildung 39:  
 Abnahme der Biegebelastbarkeit bei durch *Polyphorus versicolor* (Linn.) verfärbtem Splint-Amberholz (*Liquidambar styraciflua* L.). Das verfärbte Holz hatte 17,6% seiner ursprünglichen Rohdichte verloren.  
 Aus KOLLMANN (1951, S. 49, Bild 47).

Bei Befall durch Basidiomyceten und Moderfäule nimmt die Festigkeit stärker als die Masse oder das Volumen ab (SCHULTZE-DEWITZ 1966).

Über den Einfluß von Bläue-Pilzen auf die Festigkeitseigenschaften von Holz existieren in der Literatur zum Teil widersprüchliche Angaben. Während viele Autoren, wie NIEMZ (1993, S. 143), UNGER (1990, S. 32) und GLOS (1989b) keinen Einfluß der Bläue auf die Festigkeit sehen, ist bei KOLLMANN (1951, S. 61) eine Abnahme der Zug-, Druck- und Biegefestigkeit um bis zu 25% angegeben. GLOS (1989b, S. 370) bezieht seine Äußerung allerdings auf Fichtenholz, während die von KOLLMANN (1951) in Abbildung 40 wiedergegebenen Werte für Kiefernholz gelten.

Rotstreifigkeit wirkt sich nach NIEMZ (1993, S. 143) nicht auf die Biege- und Zugfestigkeit aus. GLOS (1989a) stellte dagegen bei astfreiem Fichtenholz eine Abnahme der Biegefestigkeit um über 20% fest, aber nur eine geringe Beeinträchtigung der Druckfestigkeit (GLOS 1989b, S. 370). Mit zunehmender Ästigkeit<sup>9</sup> verringert sich jedoch der Einfluß der Rotstreifigkeit auf die Festigkeit und ist ab einer Ästigkeit von 0,4 bei Biegebelastung und 0,2 bei Druckbelastung nicht mehr nachweisbar.

Abbildung 41 zeigt die prozentuale Abnahme der Druckfestigkeit abhängig von der Einwirkungsdauer des Echten Hausschwammes (*Merulius lacrimans*), des

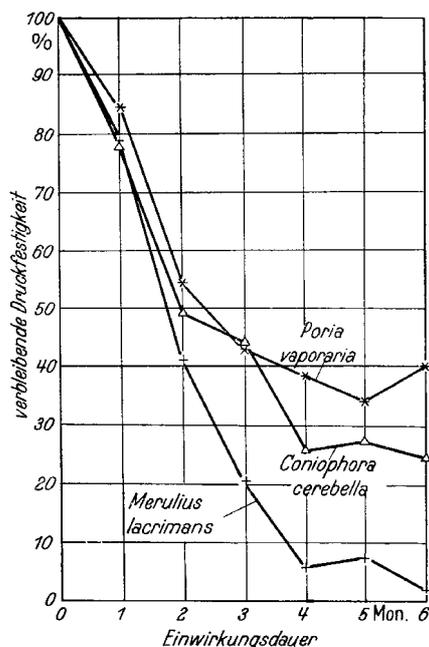


Abbildung 41: Abnahme der Druckfestigkeit von Kiefern-Splintholz bei zunehmender Einwirkdauer von holzerstörenden Pilzen (Schwämme). Aus KOLLMANN (1951, S. 72, Bild 66).

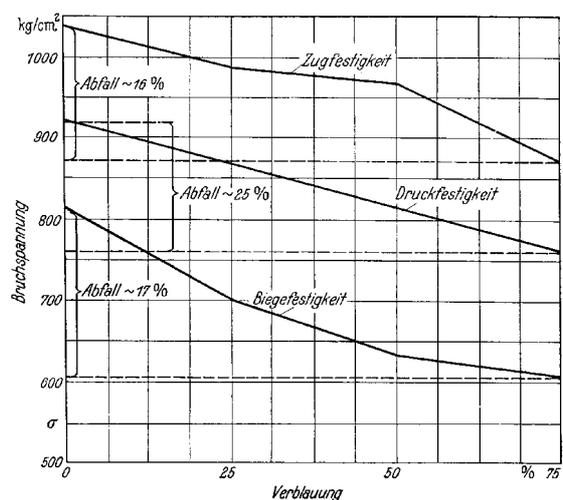


Abbildung 40: Abnahme der Zug-, Druck- und Biegefestigkeit von Kiefernholz mit fortschreitender Verblauung. Aus KOLLMANN (1951, S. 62, Bild 57)

9 DIN 4074-1 definiert die Ästigkeit als den kleinsten sichtbaren Durchmesser der Äste geteilt durch das Maß der zugehörigen Querschnittsseite des Holzkörpers. Maßgebend ist die größte Ästigkeit.

Warzen- oder Kellerschwammes (*Coniophora cerebella*) und des Porenhausschwammes (*Poria vaporaria*).

Eine praxisnahe Beurteilung eines Pilzbefalls hält GLOS (1989a) nur über die Holzverfärbung für möglich. Das Befallsausmaß legt er anhand der „Ausdehnung der Verfärbung über den Umfang des Prüfkörpers an der Stelle des maximalen Befalls in Prozent des Umfangs“ (GLOS 1989a, S. 331-332) fest. Zur genauen Bestimmung der Befallsart bedarf es Fachkenntnis und Erfahrung. Im Zweifel ist immer der Rat eines Mykologen einzuholen.

### 4.3 Salzbehandlung

Durch eine Behandlung mit salzhaltigen Holzschutzmitteln ändert sich das Sorptionsverhalten des Holzes (Abbildung 42). Das ist nach NIEMZ (1993, S. 48) auf die Herabsetzung des Fasersättigungsbereiches durch Salze zurückzuführen. Dieser wird bei mit Holzschutzsalzen behandeltem Holz ab einer relativen Luftfeuchte von 74% bis 94% erreicht. Bei hohen rF-Werten liegt dann schon freies Wasser im Holz vor. Der hygroskopische Bereich wird also verkleinert, was zu größeren Dimensionsänderungen bei Schwankungen der rF zwischen 55% und 75% führt.

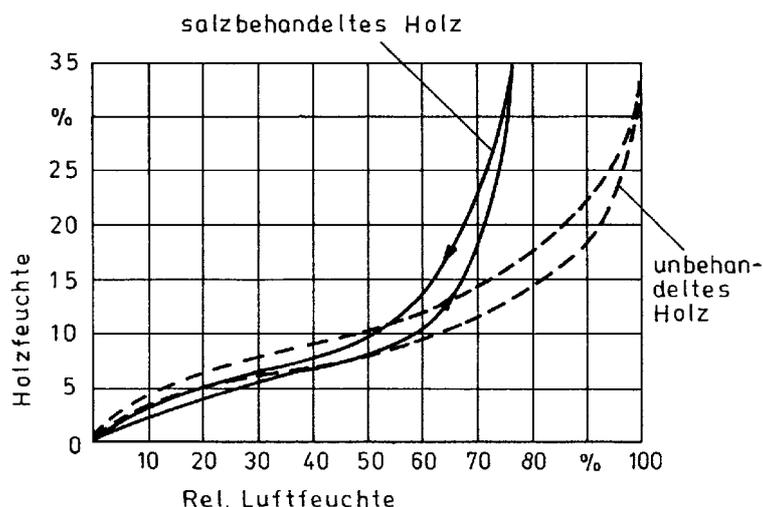


Abbildung 42:  
Änderung der Sorptionsisotherme von Eichenholz durch Tränkung mit Natriumchlorid.  
Aus NIEMZ (1993, S. 49, Abb. 4/15b).

#### 4.4 Holzfestigung

Die bei CUANY ET AL. (1988, S. 214-236) wiedergegebenen Untersuchungen zum feuchtephysikalischen Verhalten harzmodifizierter Tannenholzproben zeigen eine deutlich erhöhte Sorption nach der Festigung mit Leinöl, Glutinleim, Wachs/Paraffin und dem Zweikomponenten-Epoxydharz Araldit DY 026/Hy 2996. Nach einer Tränkung mit Schellack nehmen die Proben bei einer relativen Luftfeuchte von 35-65% deutlich mehr Wasser auf, bei 65-95% relativer Luftfeuchte dagegen deutlich weniger als unbehandeltes Holz. Nur minimale Abweichungen des Sorptionsverhaltens gegenüber unbehandeltem Holz ergeben sich bei den Festigungen mit den Kunstharzen Plexigum P-28, Paraloid B-71 und Mowilith 30. Leider sind weder Sorptionsisothermen noch eine prozentuale Gewichtung der Veränderungen angegeben. Auch die Holzfeuchtegehalte sind aus den angegebenen Daten nicht zu ermitteln. Die von SCHNIEWIND (1990) beschriebene Kunstharz-Festigung von bakteriengeschädigtem Douglasienholz bewirkt keine signifikante Änderung dessen Hygroskopizität. Denn das verwendete Acryloid B72 kann vermutlich aufgrund seines großen Molekulargewichts nicht in die Zellwandstruktur eindringen. Eine (wahrscheinliche) Verminderung der Sorptionsgeschwindigkeit durch die Festigung wurde jedoch nicht untersucht. Zerstörungsfreie Methoden zur Ermittlung der Festigkeitskennwerte von gefestigtem Holz sind nicht bekannt.

## 5 Bestimmung der Feuchtereaktion von Kulturgut aus Holz

Die Reaktion von Kunstwerken auf Feuchteänderungen wurde schon mehrfach untersucht.<sup>10</sup> Durch die gleichzeitige Einwirkung mehrerer Parameter kommen diese Arbeiten aber über eine phänomenologische Beschreibung von Ursachen und Auswirkungen nicht hinaus. So brachte beispielsweise die Messung von Dimensionsänderungen bei den beiden im folgenden beschriebenen Untersuchungen sehr unterschiedliche Ergebnisse. Sowohl KLEIN; BRÖKER (1990), als auch ASHLEY-SMITH ET AL. (1994) untersuchten den Einfluß von Luftfeuchteänderungen auf die Flächendehnung bei Holztafelgemälden. Zur Erfassung der Dimensionsänderungen dienen in beiden Fällen Wegaufnehmer. Die von ASHLEY-SMITH ET AL. (1994) verwendete Tafel ist dem Aufbau einer Ikone nachempfunden. Der Bildträger besteht aus zwei verleimten Weymouthskiefer-Brettern mit tangential orientierten Jahrringen. Rückseitig sind zwei konische Gratleisten aus Eichenholz flächenbündig eingelassen. Vorderseitig ist die Tafel mit Leinen kaschiert und auf einer Grundierung<sup>11</sup> in konventioneller Tempera-Technik mit einem Streifenmuster bemalt und vergoldet. Die Abmessungen betragen 875 mm in der Höhe, 568 mm in der Breite und 27 mm in der Dicke. Die von KLEIN; BRÖKER (1990) angefertigte Tafel ist dagegen nicht bemalt und besteht aus Eichenholz mit radial orientierten Jahrringen. Ihre Abmessungen betragen 500 mm in der Höhe, 400 mm in der Breite und 15 mm in der Dicke. Zusätzlich wurde eine ebenfalls unbemalte Eichenholztafel von 1625 mit gleichen Abmessungen untersucht. Die jeweils gemessenen Dimensionsänderungen sind mit den zugehörigen Werten der relativen Luftfeuchte in Abbildung 43 und 44 wiedergegeben. Die Schwankungen der relativen Luftfeuchte bewegen sich in vergleichbarer Höhe. In Abbildung 43 sind die Dimensionsänderungen am Tafelende (a) und in der Tafelmitte (b) gegenläufig und lassen keinen Zusammenhang mit der relativen Luftfeuchte (d) erkennen. Dagegen folgen die Dimensionsänderungen (test point 7, Test point 8) in Abbildung 44 etwas verzögert dem Verlauf der relativen Luftfeuchte.

10 U. a. BERGER; RUSSELL (1986, 1988, 1989, 1990, 1994, 1996), BRÖKER; KLEIN (1989), KLEIN; BRÖKER (1990), HEDLEY (1988), LEGRUM (1994), SCHAIBLE (1987, 1989), SCHWARZ; GADESMANN (1994).

11 Bei ASHLEY-SMITH ET AL. (1994, S. 30) ist nur von „gesso“ die Rede. Diese Bezeichnung kann im Englischen sowohl für Gips- als auch für Kreidegrundierungen verwendet werden.

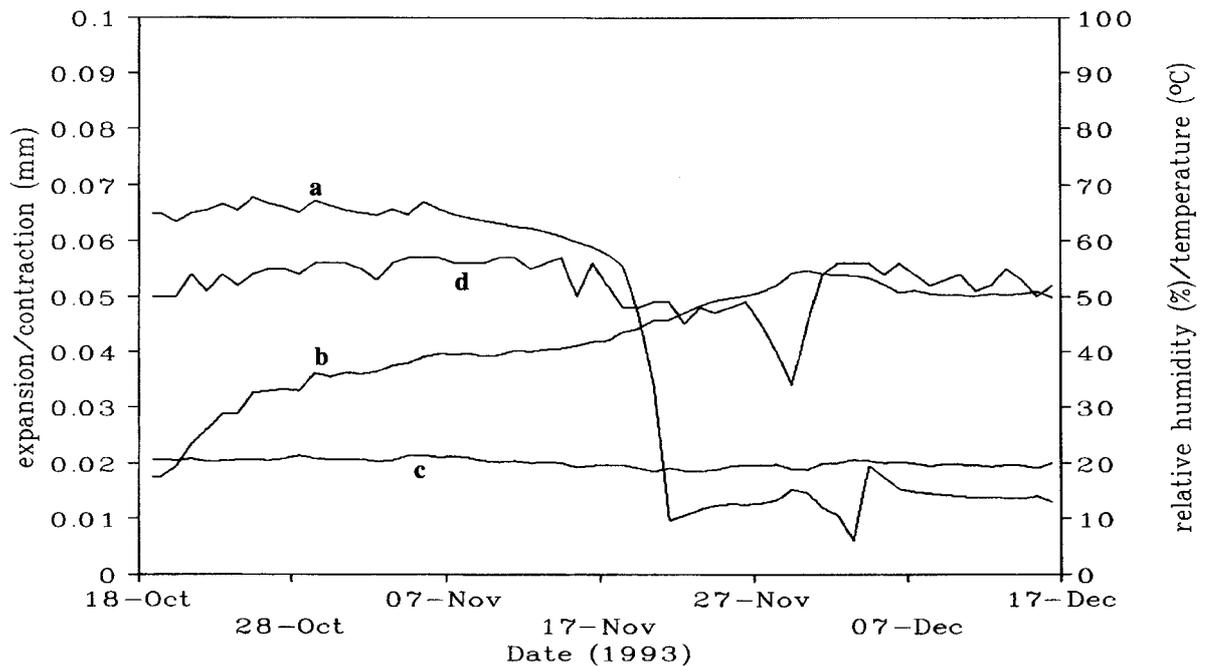


Abbildung 43: Dimensionsänderungen in der Breite bei einer nachgestellten Ikone aus Weymouthskiefer (875mm hoch, 568mm breit, 27 mm dick). Es bedeuten: a Sensor 1 nahe am Tafelende; b Sensor 2, nahe der Tafelmitte; c Temperatur [°C]; d relative Luftfeuchte [%].  
 Aus ASHLEY-SMITH ET AL. (1994, S. 30, Fig. 1).

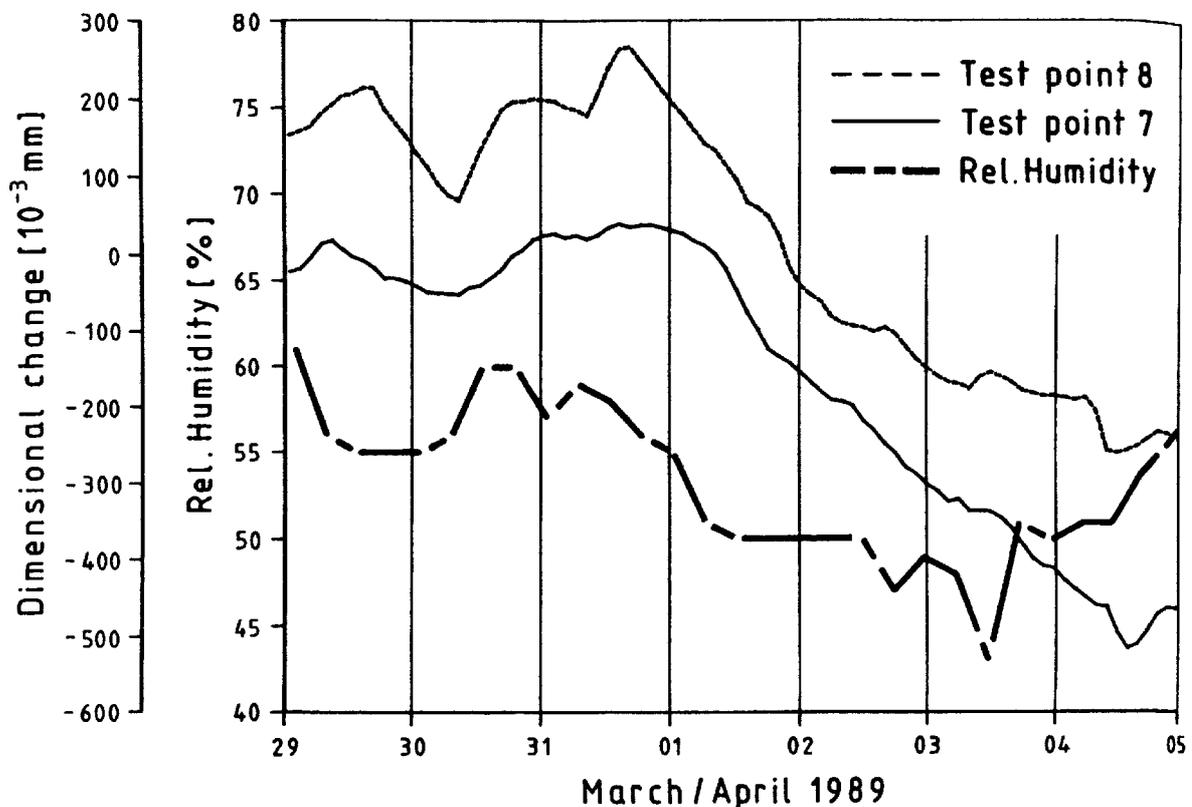


Abbildung 44: Dimensionsänderungen in der Breite bei einer 1987 hergestellten, unbemalten Eichenholztafel (500mm hoch, 400mm breit, 15mm dick). Die beiden oberen Kurven zeigen die Dimensionsänderungen an unterschiedlichen Meßpunkten (Test point 8, Test point 7), die unterste Kurve die relative Luftfeuchte (Rel. Humidity). Aus KLEIN; BRÖKER (1990, S. 42, Fig. 4).

Obwohl die Messungen am nachgestellten und am alten Bildträger eine gute Übereinstimmung zeigen, betonen KLEIN; BRÖKER (1990, S. 43) daher zurecht: „All results refer directly only to the analysed panels; any variation in the wood, knots or variations of growth ring structure or of wood density will cause different results.“ Mit solchen Messungen lassen sich also nur die individuellen Dimensionsänderungen eines konkreten Gegenstandes erfassen.

Um die Feuchtereaktionen von Kulturgut aus Holz dennoch erfassen zu können, bietet sich eine separate Betrachtung möglicher Änderungen und ihrer Auswirkungen an. In den folgenden Abschnitten wird daher diskutiert, wie diese Änderungen und ihre Ursachen ermittelt und bewertet werden können.

Die Grundlage für eine genaue Auseinandersetzung mit der materiellen Beschaffenheit von Kulturgut stellt eine (kunst-)technologische Untersuchung von Aufbau und Konstruktion dar. Basierend auf deren Ergebnissen ist zu definieren, was für Veränderungen ab welchem Ausmaß als schädigend erachtet werden. Dann benötigt man die bei diesen Prozessen relevanten Kennwerte. Die Grenzen für diese Kennwerte ergeben sich aus der Schadensdefinition und technologischen Gesichtspunkten. Damit müßten sich dann Rückschlüsse auf Werte der relativen Luftfeuchte ziehen lassen, bei denen die Feuchtereaktionen unterhalb der Schadensgrenze ablaufen. Die eben beschriebene Vorgehensweise in Stichpunkten zusammengefaßt:

- Technologische Untersuchung von Aufbau und Konstruktion
- Definition von Schäden
- Ermittlung der relevanten Kennwerte
- Festlegung von Grenzen dieser Kenngrößen
- Rückschluß auf tolerierbare Schwankungen der relativen Luftfeuchte

## 5.1 Technologische Untersuchung von Aufbau und Konstruktion

Die vielgestaltige Verwendung von Holz als Werkstoff in Kulturgut macht eine individuelle Betrachtung des jeweils verwendeten Holzes notwendig. Neben der Holzart sind dabei die Abmessungen und strukturelle Orientierung der Holzteile ausschlaggebend. Die Untersuchung von Aufbau und Konstruktion soll die relevanten Parameter zur exakten Bestimmung der Kennwerte liefern. Es ist abzuklären, an welchen Stellen Dimensionsänderungen Probleme bereiten könnten. Dies ist beispielsweise bei vielen Holzverbindungen und Fügstellen von Materialkombinationen der Fall, da es dort zu Schichtentrennung kommen kann. Weiterhin muß ermittelt werden, wo durch Struktur oder Konstruktion Quellungsbehinderung vorliegt. Strukturbedingt sind vor allem die Anordnung der Jahrringe, Kern-/Splintholzanteil und die Querschnittsdimensionen wichtige Faktoren. Bei der Konstruktion ist hauptsächlich auf Holzverbindungen, Fügeteile, statische Lasten und Längs-/Querholzkombinationen zu achten. Weiterhin ist festzustellen, ob durch statische Belastungen Spannungen vorliegen. Von Interesse sind dabei Belastungsart und -richtung. Eine Anfälligkeit für feuchteinduzierte Spannungen läßt sich aus Asymmetrien im Aufbau oder einseitigen Beschichtungen ableiten. Auch die Jahrringgeometrie und große Querschnittsabmessungen können für innere Spannungen verantwortlich sein. Die abzuklärenden Fragen bei der Untersuchung in Stichpunkten zusammengefaßt:

- Dimensionsänderungen
  - absolut (unbehindert)
    - Fügeteile, Holzverbindungen
    - Materialkombinationen, Grenzschichten(-Trennung)
  - liegt Quellungsbehinderung vor?
    - Holzstruktur (Jahrringverlauf, Querschnittsdimensionen)
    - Konstruktion (Holzverbindungen, Fügeteile, Längs-/Querholzkombinationen)
- innere Spannungen
  - statische Belastungen, Belastungsart und -richtung
  - Asymmetrien (einseitige Beschichtung)
  - Jahrringgeometrie des Querschnitts

### 5.1.1 Holzart

Eine möglichst exakte Bestimmung der Holzart ist anzustreben, aber nicht in allen Fällen erforderlich. So unterschieden sich z. B. die Schwindmaße der Eichenholzarten so gut wie nicht, sodaß eine makroskopische Holzartenbestimmung für diesen Fall eine hinreichende Genauigkeit bietet. Die mikroskopische Untersuchung der Strukturmerkmale, beispielsweise nach GROSSER (1977), ist zur Zeit die genaueste Methode zur Bestimmung der Holzart. Dafür ist jedoch eine Probenentnahme und einige Erfahrung erforderlich.

### 5.1.2 Anatomische Ausrichtung und strukturelle Besonderheiten

Für eine Zuordnung der meisten Holzeigenschaften ist die Kenntnis der anatomischen Ausrichtung der Holzteile unabdingbar. Während sie sich an holzsichtigen Stellen problemlos nach dem Augenschein feststellen läßt, kann sie bei furnierten und gefaßten Teilen oftmals nur durch Röntgenaufnahmen ermittelt werden. Das gleiche gilt für die Ermittlung struktureller Besonderheiten, wie z. B. Äste, Jahrringgeometrie und Reaktionsholz. Zur Quantifizierung der Äste, besonders in Bezug auf die Änderung der Festigkeitseigenschaften, bietet sich die Ästigkeit nach DIN 4074-1, bzw. DIN 4047-5 an.

### 5.1.3 Veränderungen an historischen Hölzern

Wie schon aus dem Abschnitt über Einflüsse auf die Kenngrößen bei historischen Hölzern hervorgeht, können im Lauf der Zeit zahlreiche Veränderungen auf das Holz einwirken. Bei einer Untersuchung der Konstruktion sind daher Art und Ausmaß einer möglichen biologischen Schädigung mit zu ermitteln. Das Gleiche gilt für Veränderungen durch konservierende Eingriffe wie Holzschutzmittelbehandlungen oder Holzfestigung.

## 5.2 Definition von Schäden

Eine puristische Anschauung, die jegliche Materialänderung vermeiden will ist für den Werkstoff Holz unangebracht. Denn, wie KOLLMANN (1967, S. 6) feststellt, kommt es schon bei der Gewinnung des Rohstoffes Holz, durch Fällen und Trocknen zu Veränderungen und Vorschädigungen im Materialgefüge. Für Fichtenholz wiesen MÜLLER ET AL. (2003) nach Trocknung bei 20°C und anschließendem Wiederbefeuchten eine signifikante Abnahme der Druckfestigkeit um ca. 10% nach. Diese relative Abnahme wird jedoch von der wesentlich größeren Festigkeit trockenen Holzes überkompensiert und fand aus diesem Grund bisher keine Beachtung. Allein die Abnahme von Festigkeitseigenschaften beeinträchtigt nicht unbedingt die Funktion von Holz als Werkstoff. So wird beispielsweise bei einem Dachbalken selbst ein großer Riss nicht als relevanter Schaden angesehen, solange dadurch die erforderliche Festigkeit nicht beeinträchtigt wird. Je nach Einsatz und Verwendung sind Materialveränderungen also nicht als Schaden zu bezeichnen. Es ist somit notwendig, für jeden Einzelfall zu definieren, was als Schädigung empfunden wird. Dabei sind oftmals unterschiedliche Materialveränderungen wie z. B. sichtbare Veränderungen (Ästhetik), Veränderungen in der Material-Struktur (Erhaltung), etc. gegeneinander abzuwägen.

Es bietet sich an, Schäden über das Ausmaß von Materialveränderungen zu definieren. Dabei ist es sinnvoll zwischen vorübergehenden, reversiblen Änderungen und dauerhaften, irreversiblen Veränderungen zu unterscheiden. Damit wird die Zuordnung zu elastischen und plastischen Deformationen erleichtert. Es ist auch die Zeiteinwirkung mit zu beachten. Denn wegen der rheologischen Eigenschaften des Holzes können selbst elastische Deformationen auf Dauer durch Spannungsrelaxation permanente Verformungen hervorrufen.

Weiterhin kann man Schäden über die Auswirkungen von Veränderungen definieren. Dies können Brüche, Risse, Verformungen usw. sein. Dies mag bei der Diskussion relevanter Schäden das naheliegendste Vorgehen sein, dabei ist es aber schwierig, alle denkbaren Ursachen für diese Schäden zu berücksichtigen.

Eine schematische Einteilung, wie sie für die Auswirkungen von hygrischen Dimensionsänderungen in Tabelle 8 wiedergegeben ist, kann schwerlich sämtliche bei Kulturgut vorkommenden Besonderheiten erfassen.

Ursache	Wirkung	Mögliche Begleiterscheinungen	Einflußgrößen <sup>1)</sup>	Möglicher Schaden
Abnahme der Holzfeuchte im hygrokopischen Bereich	Schwindung	Verkleinerung der Abmessungen	Orientierung zu den Hauptachsen (long., rad., tang.)	Schönheitsmangel Aufgehende Fugen Beeinträchtigte Passung („Klaffen“)
		Verformung in Querrichtung (z. B. Querkrümmung, Winkeländerung von Querschnitten)	Winkel zwischen Jahrringrichtung und Querschnittskante	
		Verformung in Längsrichtung (z. B. Längskrümmung, Verdrehung)	Winkel zwischen Faserrichtung und Längsschnittkante	
		Zugspannung im schwindenden Holz	Art der Schwindungsbehinderung	Rißbildung
		Schubspannung in angrenzenden Schichten, z. B. anderen Holzlagen oder Leimfugen	Unterschiede im Schwindverhalten benachbarter Materialien, Schubsteifigkeit	offene Leimfugen Lösen von Einlegearbeiten
		Stauchung von Anstrichen		Aufwölben und Abheben von Anstrichen
Zunahme der Holzfeuchte im hygrokopischen Bereich	Quellung	Vergrößerung der Abmessungen	Orientierung zu den Hauptachsen (long., rad., tang.)	Schönheitsmangel Beeinträchtigte Passung („Klemmen“)
		Verformung in Querrichtung (z. B. Querkrümmung, Winkeländerung von Querschnitten)	Winkel zwischen Jahrringrichtung und Querschnittskante	
		Verformung in Längsrichtung (z. B. Längskrümmung, Verdrehung)	Winkel zwischen Faserrichtung und Längsschnittkante	
		Druckspannung im quellenden Holz	Art der Quellungsbehinderung	Krafteinwirkung auf umgebende Teile, wie z. B. Rahmen
		Schubspannung in angrenzenden Schichten z. B. anderen Holzlagen oder Leimfugen	Unterschiede im Quellverhalten benachbarter Materialien, Schubsteifigkeit	Lösen der Verleimung
		Dehnung von Anstrichen		Rißbildung in Anstrichen
<sup>1)</sup> Zusätzliche Einflußgrößen sind in jedem Fall die Größe und Geschwindigkeit der Feuchteänderungen sowie die Holzart.				

Tabelle 8: Schematische Übersicht über Auswirkungen und Schäden, die durch Schwindung bzw. Quellung des Holzes verursacht werden. Nach SCHWAB; KLEIN (1989, S. 26, Tabelle 7).

### 5.3 Ermitteln von Kennwerten für Kulturgut aus Holz

Die bereits vorgestellten Kenngrößen dienen dazu, die Eigenschaften des Holzes möglichst genau zu charakterisieren. Im folgenden werden Methoden vorgestellt, mit denen sich die Werte dieser Kenngrößen ermitteln lassen und ihre Eignung für Kulturgut beurteilt. Die Abwägung zwischen Erkenntnisgewinn und zerstörungsbehafteten Untersuchungsmethoden stellt sich in der präventiven Konservierung so gut wie nicht. Solange keine unveränderlichen Eigenschaften ermittelt werden, sondern Reaktionen auf äußere Einwirkungen, lassen sich zerstörende Methoden kaum rechtfertigen.

Für die Anwendung bei der präventiven Konservierung von Kulturgut müssen die Methoden zur Ermittlung der Kennwerte zerstörungsfrei, exakt und mit geringem Aufwand an Kosten und Zeit durchführbar sein. In der Holzforschung finden sich leider wenige Meßverfahren, die alle drei Anforderungen erfüllen. Anhand einiger grundlegenden Merkmale, wie z. B. Holzart und anatomischer Ausrichtung, lassen sich jedoch manche Kennwerte mit hinreichender Genauigkeit aus Literaturdaten entnehmen.

#### 5.3.1 Rohdichte

Die Festigkeitseigenschaften des Holzes hängen sehr stark von der Rohdichte ab. Auch die Druck- und Zugfestigkeit quer zur Faserrichtung, wichtig zur Beurteilung innerer Spannungen, läßt sich nach GÖRLACHER (1987, S. 278) am besten anhand der Rohdichte abschätzen. Die Bestimmung der Rohdichte ist prinzipiell mit einfachen Meßgeräten, nämlich Maßband und Waage, durchführbar. Man bestimmt die Masse eines ausgemessenen Volumens und erhält damit die Rohdichte bei gegebenem Feuchtegehalt (SCHÖNE 1989). Bei Kulturgut finden sich jedoch selten geometrisch klar definierte, wägbare Holzteile. Die von GÖRLACHER (1987) beschriebene Methode ist nur zerstörungsarm und läßt sich daher nur sehr bedingt für Kulturgut anwenden. Dabei wird ein Stahlstift mit 2,0-3,0 mm Durchmesser mit definierter Energie in das Holz eingetrieben und dessen Eindringtiefe (bis zu 40 mm) gemessen. Mit der von SCHWARZ (1990) beschriebenen Infrarot-thermographischen Untersuchung lassen sich nur Dichteunterschiede, aber keine absoluten Werte ermitteln. Mittels Radiologischer Methoden (Röntgen, Computertomographie, siehe PANG; WIBERG (1998)) läßt sich die Rohdichte prinzipiell auch messen. Die lokalen

Dichteunterschiede in den Jahrringzonen und die Abhängigkeit von der Holzfeuchte erschweren aber die Ermittlung der durchschnittlichen Rohdichte.

Für die Rohdichtebestimmung bei Kulturgut gibt es, trotz der großen Bedeutung dieses Kennwertes, bisher keine einfach anwendbare Standardmethode.

### 5.3.2 Holzfeuchte

Der Holzfeuchtegehalt wird, wie bereits erwähnt, meist als Durchschnittswert angegeben. Eine Übersicht der prinzipiellen Möglichkeiten und Verfahren zur Feuchtemessung gibt Abbildung 45. Die Darmmethode und die Extraktionsmethode sind die Basismethoden in der Holzforschung. Sie liefern sehr exakte Werte, eignen sich aber nicht zur Bestimmung der Holzfeuchte an Kulturgut, da sie zerstörungsbehaftet sind.

Beim Widerstandsmeßverfahren werden üblicherweise zwei Elektroden in das Holz eingeschlagen. Es gibt zwar für einige Meßgeräte auf dem Markt auch Oberflächenelektroden. Diese verringern aber zusätzlich die Meßgenauigkeit und benötigen saubere, unbehandelte Holzoberflächen. Bei Raumtemperatur lassen sich Holzfeuchten unter 6% nicht mehr bestimmen (NIEMZ 1993, S. 67).

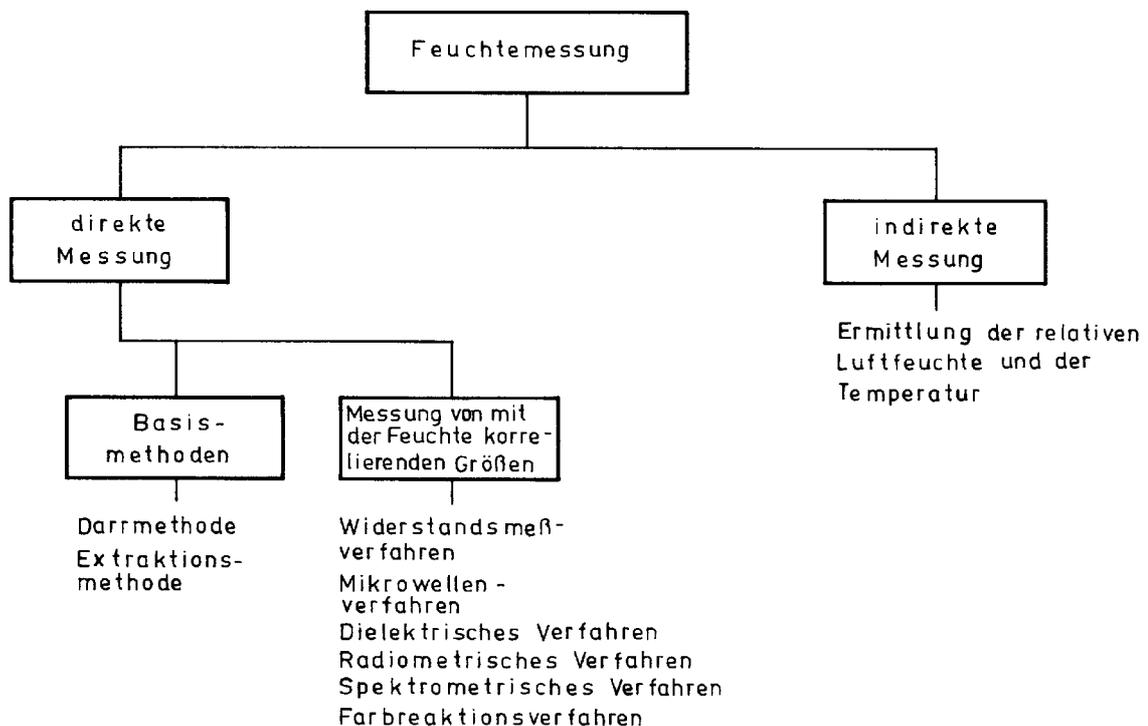


Abbildung 45: Übersicht zu Feuchtemeßverfahren. Aus NIEMZ (1993, S. 65, Abb. 4/37).

Das Mikrowellen- und das dielektrische Verfahren arbeiten beide zerstörungsfrei. Sie nutzen die Unterschiede der Dielektrizitätskonstanten von Wasser (ca. 80) und trockenem Holz (ca. 2-3), bzw. die wesentlich höhere Mikrowellenabsorption des Wassers. Das Mikrowellenverfahren liefert die genaueren Meßwerte. Allerdings sind bisher nur wenige transportable Modelle auf dem Markt, die zudem nur für wenige Holzarten Korrekturdaten bieten.

Das Radiometrische Verfahren beruht auf der Abbremsung von Neutronenstrahlung durch die Wasserstoffatome des Wassers und dürfte sich daher kaum als Standardverfahren eignen.

Beim spektrometrischen Verfahren wird das Absorptionsvermögen von Wasser bei den Wellenlängen 1930 nm und 1450 nm im IR-Licht ausgenutzt. Aufgrund der geringen Eindringtiefe der Strahlung von etwa 0,1 mm liefert die Messung nur Werte an der Oberfläche (NIEMZ 1993, S. 67).

Das schon bei der Rohdichte erwähnte thermographische Verfahren nach SCHWARZ (1990) kann für die Holzfeuchte ebenfalls nur graduelle Unterschiede darstellen.

Das Farbreaktionsverfahren beruht auf dem feuchteabhängigen Farbumschlag von Indikatorpapieren (z. B. Kobaltchlorid). Das Verfahren kann nur bei Temperaturen von 15-25°C und Holzfeuchten von 6-20% eingesetzt werden. Zudem ist ein Hohlraum oder eine Bohrung zum Einbringen des Indikatorpapiers notwendig (NIEMZ 1993, S. 72).

Bleibt noch die indirekte Bestimmungsmöglichkeit über die umgebende Luft. Anhand der Temperatur und relativen Luftfeuchte läßt sich bei gegebenem Luftdruck auf die Holzgleichgewichtsfeuchte schließen. Die Abhängigkeiten lassen sich als Diagramm darstellen (siehe Abbildung 46), aus dem sich am Schnittpunkt von Temperatur und relativer Luftfeuchte die entsprechende Gleichgewichtsfeuchte ablesen läßt. Diese Methode liefert aber nur bei konstanter Temperatur und relativer Luftfeuchte verlässliche Holzfeuchtwerte.

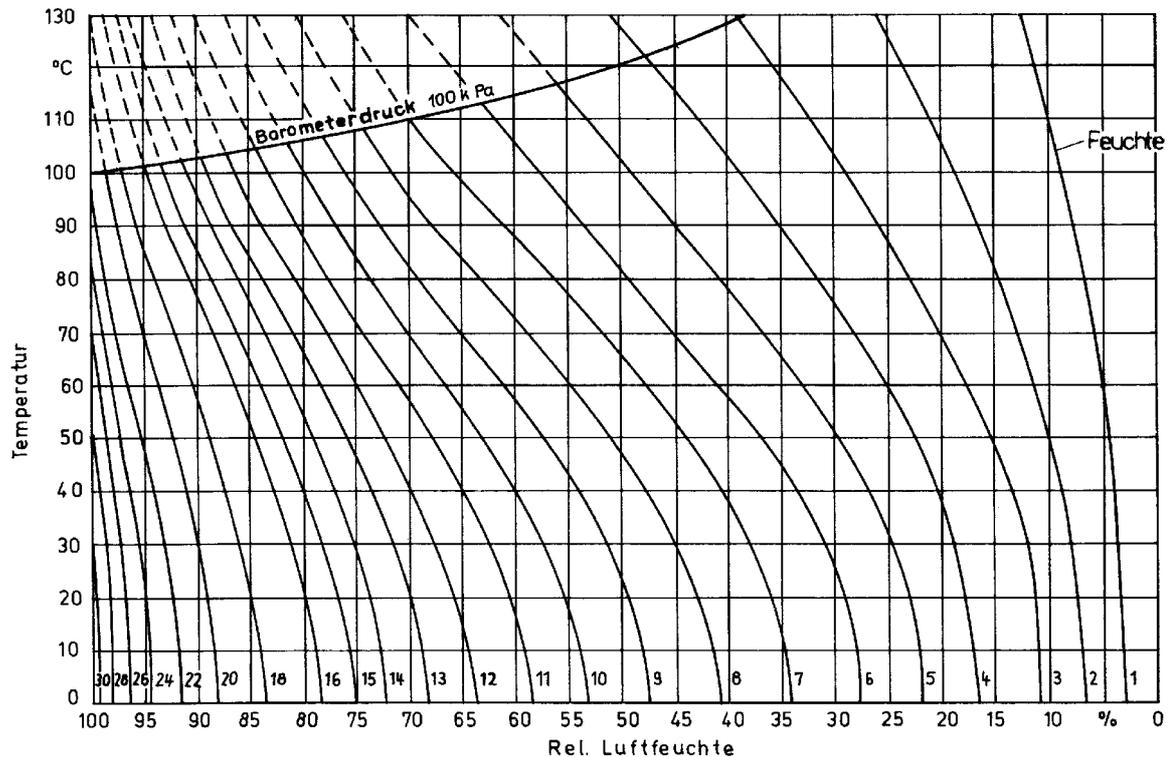


Abbildung 46: Hygroskopisches Gleichgewicht von Sitka-Fichte in Abhängigkeit von der Temperatur bei einem Luftdruck von 100 kPa. Aus NIEMZ (1993, S. 49, Abb. 4/13).

Temperatur und relative Luftfeuchte werden heute in Museen standardmäßig aufgezeichnet. Die überwiegende Zahl der verfügbaren „Klimadaten“ lässt sich im Nachhinein aber nur mit großer Unsicherheit auf die Gegenstände beziehen. Das liegt zum einen daran, daß die Meßtoleranz und die Einhaltung von Wartungsintervallen der verwendeten Meßgeräte meist nicht bekannt sind. Zum anderen wird üblicherweise, oft ohne Angabe von Meßpunkt und -bedingungen, die Raumluft gemessen. Für das hygroskopische Verhalten sind aber die Werte der oberflächennahen Grenzschicht bestimmend. Auf diese wirken weitere standortbedingte Faktoren ein, wie die Strahlungsexposition und konvektive Bedingungen, worauf schon LEGRUM (1992) hinwies. Dadurch ist auch diese Methode nur eingeschränkt anwendbar.

### 5.3.3 Sorptionsgeschwindigkeit

Wie bereits gezeigt, scheint eine Beschreibung der zeitabhängigen Reaktion des Holzes auf Feuchteänderungen anhand von Diffusionskenngrößen wenig aussichtsreich. Deshalb wird im folgenden versucht, die Geschwindigkeit der Sorptionsvorgänge im Holz auf andere Weise zu ermitteln. Für die Sorptionsgeschwindigkeit gibt es keine direkte Kenngröße, da sie von etlichen Parametern abhängt. Eine Auflistung möglicher Einflüsse findet sich bei SCHWAB; KLEIN (1989, S. 19):

„Wie schnell sich die Holzfeuchte bei einem bestimmten Wechsel der umgebenden relativen Luftfeuchte ändert, hängt von folgenden Einflüssen ab:

- der Strömungsgeschwindigkeit der umgebenden Luft, die den Feuchteübergang von bzw. zur Holzoberfläche mitbestimmt.
- Der möglichen Oberflächenbeschichtung, deren Diffusionswiderstand den Feuchteausaustausch zwischen Holz und Umgebung mitbestimmt.
- Den Querschnittsabmessungen des Holzes, weil die Diffusionswege im Holz mit zunehmenden Abmessungen größer werden.
- Der Holzart und -richtung. [...]

Aufgrund der genannten Einflußgrößen ist eine Vorhersage über die Geschwindigkeit der Holzfeuchteänderung schwierig.“

Auf die Bedeutung dieser Einflüsse und die Schwierigkeiten wird nun im einzelnen eingegangen.

Wie aus Abbildung 47 zu entnehmen ist, hat die Luftgeschwindigkeit bei einer Holzfeuchte unterhalb von 20% keinen bedeutenden Einfluß auf die Trocknungsgeschwindigkeit. Laut DENIG ET AL. (2000, S.14) hängt letztere bei niedriger Holzfeuchte wesentlich stärker von der Geschwindigkeit des

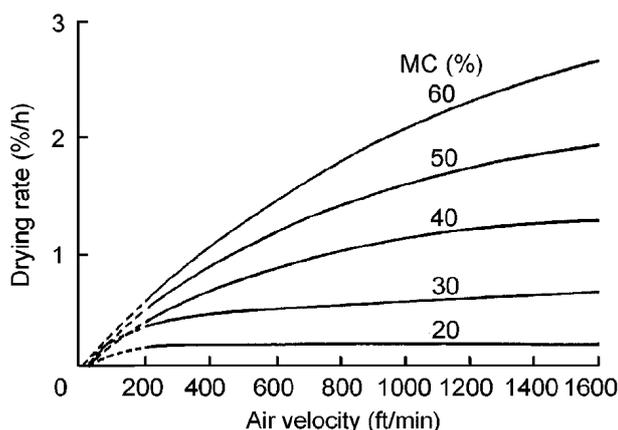


Abbildung 47:  
Abhängigkeit der Trocknungsrate (**Drying rate**) von der Luftgeschwindigkeit (**Air velocity**) bei verschiedenen Holzfeuchtegehalten (**MC**). Bei Holzfeuchten unterhalb Fasersättigung wird die Trocknungsrate von der Luftgeschwindigkeit um weniger als ein halbes Prozent pro Stunde beeinflusst. 200 ft/min entspricht etwa 1 m/s. Aus DENIG ET AL. (2000, S. 14, Fig. 2.3),

Feuchtetransportes im Holz ab, als von der Rate, mit der die Luft Feuchte von der Oberfläche abtransportieren kann. Nach WELLING ET AL. (2003, S. 29) weist eine turbulente Strömung zwar einen zehnmal höheren Wärme- und Stoffübergang auf, als eine laminare Strömung. Der Richtwert von etwa 2 m/s für das Vorliegen einer turbulenten Strömung dürfte aber in Innenräumen kaum erreicht werden. Der Einfluß der Luftgeschwindigkeit auf die Sorptionsgeschwindigkeit läßt sich im Zusammenhang dieser Betrachtung also vernachlässigen.

Der Einfluß von Oberflächenbeschichtungen ist in dieser Betrachtung aus Gründen der Themeneingrenzung ausgeklammert. Mit dieser Thematik befassen sich z. B. die Arbeiten von BREWER (1991) und KOLLMANN ET AL. (1966).

Der Einfluß der Querschnittsabmessungen ist offenkundig, die Sorptionsgeschwindigkeit hängt jedoch nicht unmittelbar mit Diffusionsprozessen zusammen. Mit ihren Untersuchungen an sehr dünnen Holzproben zeigten CHRISTENSEN; KELSEY (1959a), daß die Sorption langsamer als die Diffusion abläuft. Wie aus Abbildung 48 hervorgeht, besteht dabei eine gegenüber der Diffusion umgekehrte Feuchtigkeitsabhängigkeit. Bei niedriger rF und somit niedrigerem Holzfeuchtigkeitsgehalt, erfolgt die Anpassung an die Gleichgewichtsfeuchte schneller als bei hohen rF Werten. Der Diffusionswiderstand nimmt dagegen bei sinkendem Holzfeuchtigkeitsgehalt zu (siehe Abschnitt 3.7). Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch KOLLMANN ET AL. (1966) bei Untersuchungen an

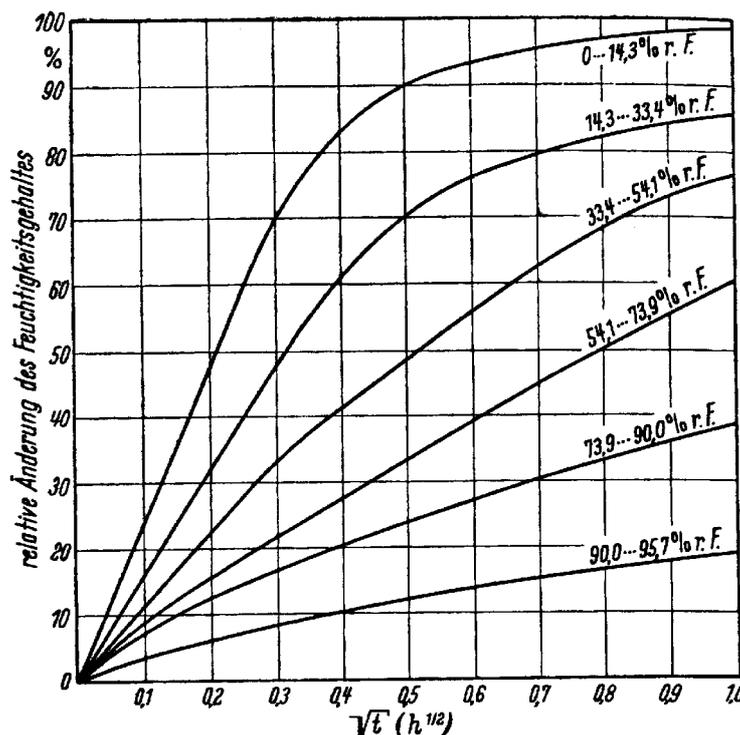


Abbildung 48:  
Sorptionsgeschwindigkeit von Klinki-Pine (Probenlänge in Faserrichtung: 20 mm; Querschnitt 1 mm x 1 mm) bei Steigerung der rF in verschiedenen Bereichen.  
Aus CHRISTENSEN, KELSEY (1959a, S. 182, Bild 4).

Fichtenholzproben von 30 mm x 30 mm Querschnitt und 1 mm Länge in Faserrichtung. Für die möglichen Schritte bei relativen Luftfeuchten von 0%, 35%, 65% und 95% sind in Abbildung 49 die Absorptionskurven dargestellt. Die Sorption verläuft umso langsamer, je höher die Endfeuchte ist. Bei gleicher Endfeuchte bewirkt das größere Feuchtegefälle eine höhere Sorptionsgeschwindigkeit. In Abbildung 50 sind für die Schritte 35-65% und 65-95% die Ab- und Desorptionskurven aufgetragen. Die Desorption verläuft in beiden Fällen schneller als die Absorption. Bei Klimaschwankungen ist daher eine geringere durchschnittliche Holzfeuchte zu erwarten, als die dem Mittelwert der relativen Luftfeuchte entsprechende Ausgleichsfeuchte.

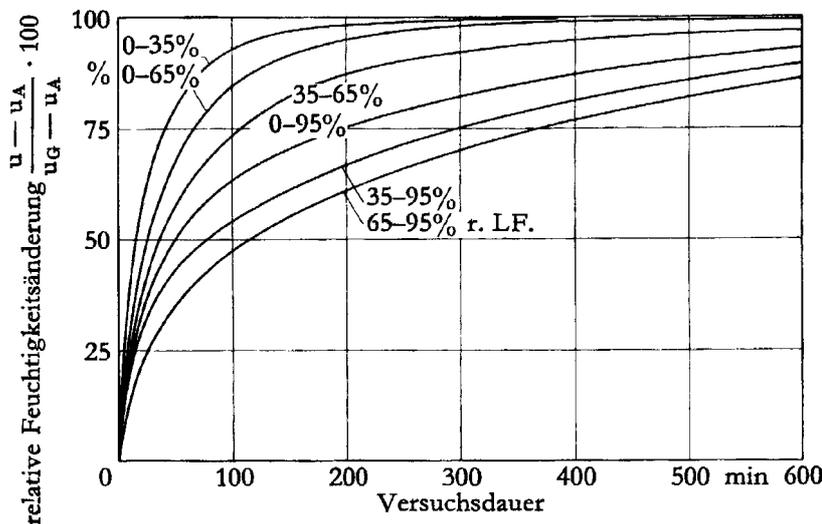


Abbildung 49:  
 Verlauf der Wasserdampf-  
 absorption bei 20°C an  
 Fichtenholzproben für die  
 eingetragenen Schritte der  
 relativen Luftfeuchte (r. LF.).  
 Probenmaße: 30 mm x 30 mm  
 Querschnitt, 1 mm Länge in  
 Faserrichtung.  
 Aus KOLLMANN ET AL. (1966, S.  
 28, Abb. 15).

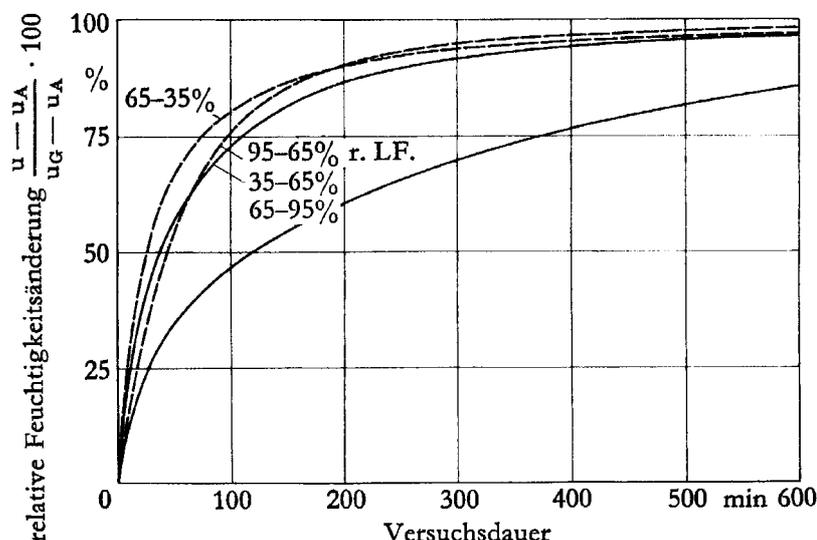


Abbildung 50:  
 Vergleich der Absorption und  
 Desorption von Wasserdampf  
 bei 20°C an Fichtenholzproben  
 für die eingetragenen Schritte  
 der relativen Luftfeuchte (r. LF.).  
 Probenmaße: 30 mm x 30 mm  
 Querschnitt, 1 mm Länge in  
 Faserrichtung. Die Desorptions-  
 kurven sind gestrichelt.  
 Aus KOLLMANN ET AL. (1966, S.  
 31, Abb. 17).

Abbildung 51 zeigt den Einfluß von Holzart und anatomischer Schnittrichtung auf die Sorptionsgeschwindigkeit bei Probewürfeln mit 30 mm Kantenlänge. Die meisten Holzbauteile weisen deutlich größere Radial- und Tangentialflächen als Querschnittsflächen auf. So zeigt die höhere Sorptionsgeschwindigkeit in axialer Richtung bei Proben aus Fichtenholz ab 128 mm Probenlänge bei einem Querschnitt von 10 mm x 10 mm nur noch einen relativ geringen Einfluß (KOLLMANN ET AL. 1966, S. 49).

Für oberflächennahe Schichten ist der Einfluß der Schnittrichtung zu vernachlässigen. Dies läßt sich aus den in Abbildung 52 und 53 wiedergegebenen Untersuchungsergebnissen von CHRISTENSEN; KELSEY (1959a) an Mikrotomschnitten und 1 mm dicken Proben schließen. Weiterhin läßt sich aus diesen Graphen ablesen, daß im ersten Millimeter innerhalb einer Stunde mindestens die Hälfte der Feuchtigkeitsgehaltsänderung abläuft, wenn die rF weniger als 80% beträgt. Bei einer Änderung der rF von 34% auf 52% hat der Feuchtegleich nach einer Stunde schon zu zwei Drittel stattgefunden. Nach NAVI ET AL. (2002, S. 454) benötigt eine 0,7 mm dicke Strandkiefer-Probe sechs Stunden, um bei einem Luftfeuchtezyklus von 30% – 75% – 30% die Ausgleichsfeuchte zu erreichen. BUCK (1972, S. 5-6) konditionierte Birkenholzproben die bei 21°C und einer rF von 80% auf eine Holzfeuchte von  $u = 18\%$ . Durch Absenken der rF auf 20-25% stellte sich innerhalb von 24 h ein durchschnittlicher Feuchtegehalt von  $u = 8-10\%$  ein. Die Ausgleichsfeuchte von  $u = 5\%$  wurde erst nach zwei Wochen erreicht.

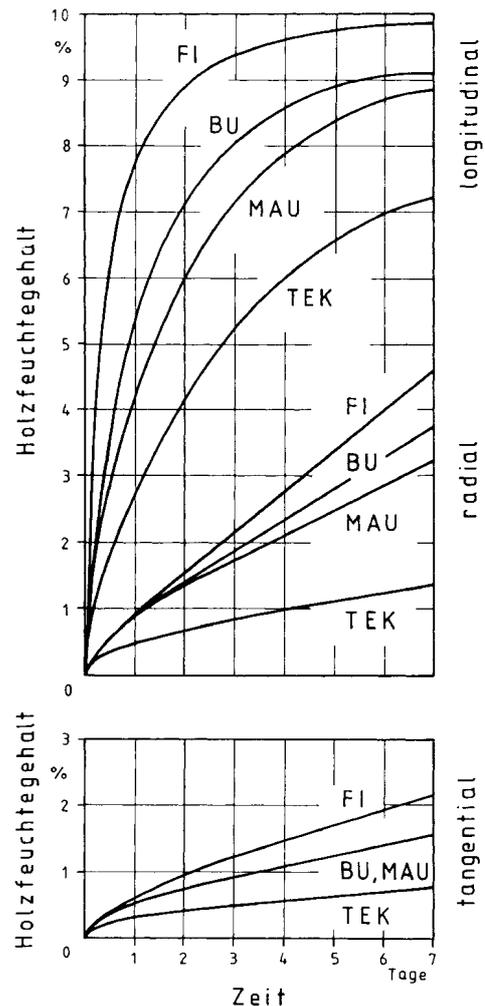


Abbildung 51: Angleichgeschwindigkeit des durchschnittlichen Feuchtigkeitsgehaltes von Fichte (FI), Buche (BU), Sipomahagoni (MAU) und Teak (TEK) in den drei anatomischen Hauptrichtungen. Die anfangs darrtrockenen Probewürfel (30 mm Kantenlänge) wurden bei einer rF von 65% und 20°C gelagert. Aus SCHWAB (1992).

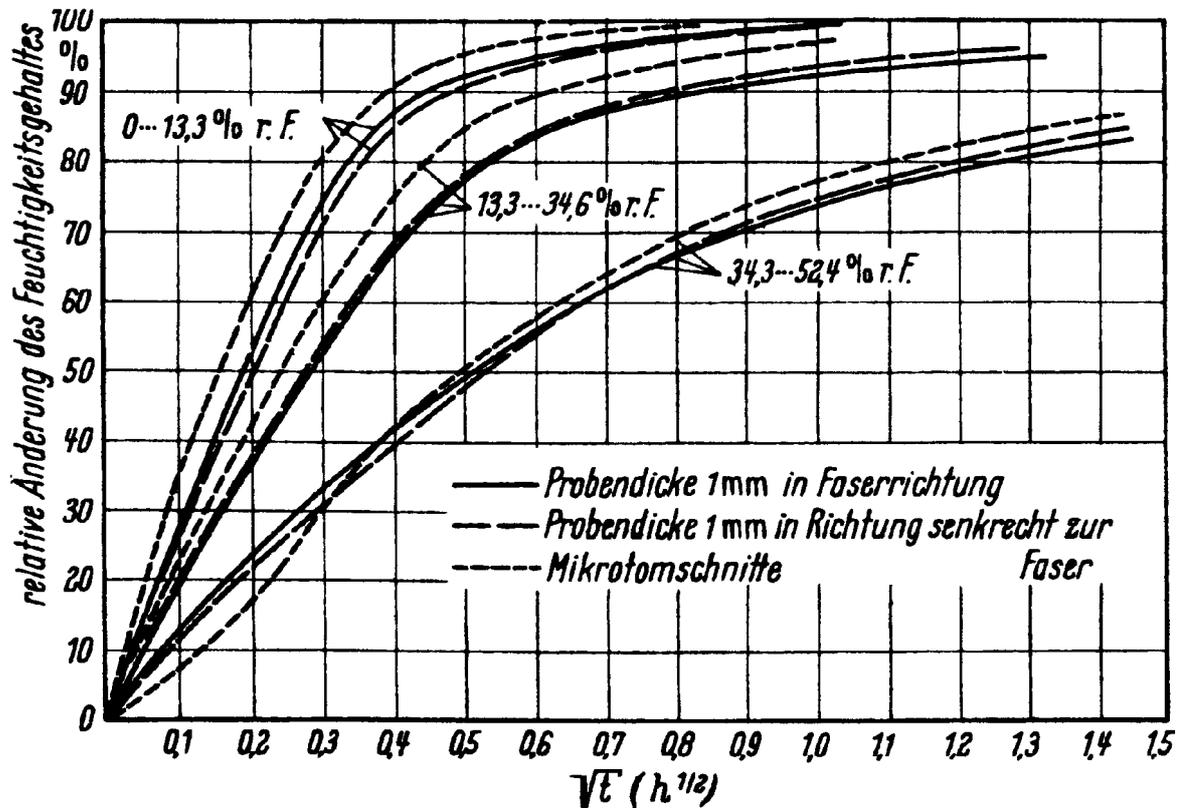


Abbildung 52: Sorption von Wasserdampf bei 40°C durch unterschiedliche Proben von Klinki Pine für aufeinanderfolgende Steigerungsbeträge der rF. Aus CHRISTENSEN; KELSEY (1959a, S.180, Bild 1).

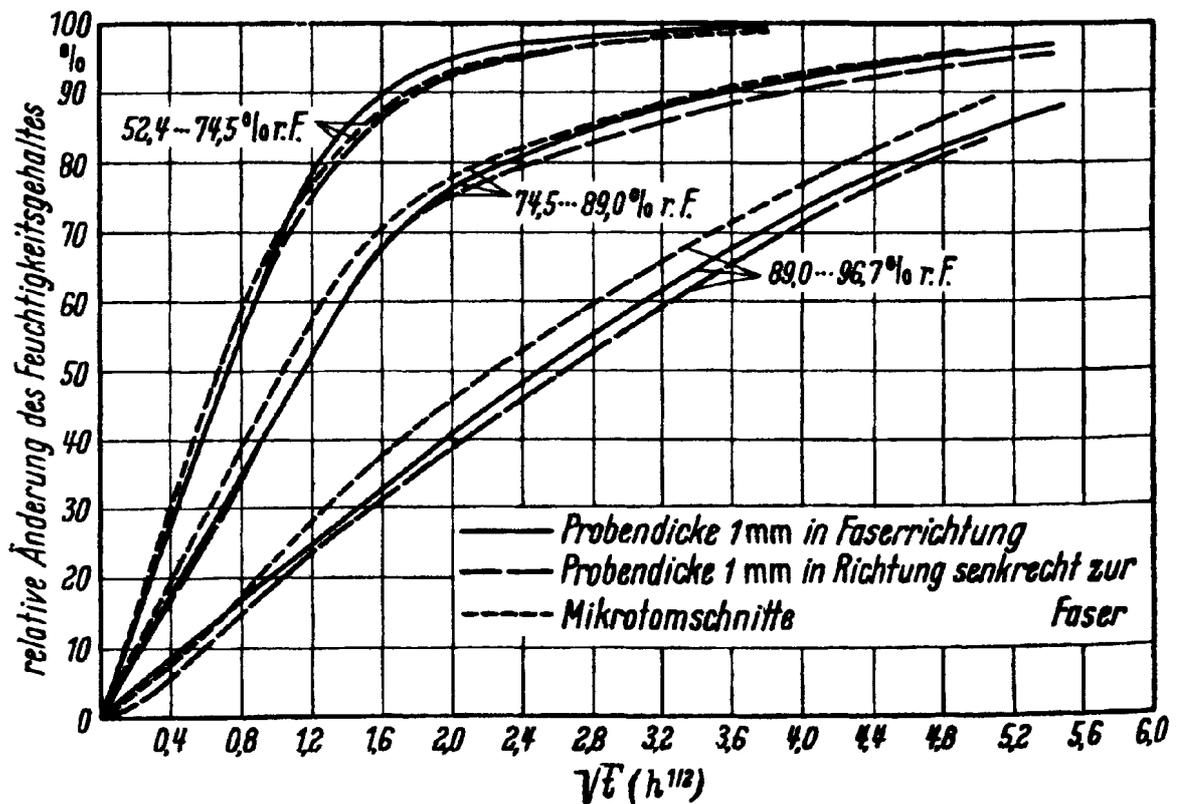


Abbildung 53: Sorption von Wasserdampf bei 40°C durch unterschiedliche Proben von Klinki Pine für aufeinanderfolgende Steigerungsbeträge der rF. Aus CHRISTENSEN; KELSEY (1959a, S.180, Bild 2).

Die äußersten Schichten reagieren demnach innerhalb von Minuten bis Stunden auf Feuchteänderungen. Bei mehreren Zentimeter dicken Holzteilen dauert es dagegen einige Tage, bis die Ausgleichsfeuchte über den gesamten Querschnitt erreicht wird. Der Feuchteangleich verläuft anfangs rasch, nähert sich dann aber asymptotisch der Ausgleichsfeuchte an. Aus diesem Grund läßt sich die Zeit bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte nicht exakt bestimmen. Zudem finden dadurch die Unterschiede zu Beginn der Sorption zu wenig Beachtung. Als Maß für die Sorptionsgeschwindigkeit verwenden CHRISTENSEN; KELSEY (1959a) und KOLLMANN ET AL. (1966) daher die Halbwertszeit des Feuchteangleichs. Aber auch diese Halbwertszeit läßt nur Aussagen für definierte Holzproben und Luftfeuchteänderungen zu.

#### 5.3.4 Festigkeitswerte

Sind Holzart, Rohdichte und Holzfeuchte bekannt, lassen sich die Festigkeitswerte aus Literaturdaten entnehmen. Diese Daten sind auch für ungeschädigtes altes Holz gültig, wie im Abschnitt zu Alterungseinflüssen bereits geklärt. Nach Holzarten unterschiedene Daten zu den Festigkeitseigenschaften finden sich in einigen Standardwerken, wie z. B. KOLLMANN (1951) und VORREITER (1949), in DIN 68100 und DIN 68364, sowie in zahlreichen Fachaufsätzen. Am einfachsten lassen sich diese Quellen über die Datenbank zu Holzeigenschaften vom Lehrstuhl für Holz- und Faserwerkstofftechnik (HFT) an der Technischen Universität Dresden erschließen.<sup>12</sup> Bezüglich der Simulation der Vorgänge bei der Holz Trocknung stellen LÜHMANN; NIEMZ (1993) jedoch fest: „Die entsprechenden, statistisch gesicherten und nur mit großem Versuchsaufwand zu erlangenden Holzkenwerte bilden immer noch den Schwachpunkt bei den Berechnungen.“ Auf beachtenswerte Besonderheiten bei der Verwendung von Literaturdaten einiger Festigkeitswerte sei daher im folgenden hingewiesen.

Die wichtigsten Festigkeitswerte bezüglich Luftfeuchteschwankungen sind die Querdruck- und besonders die Querkzugfestigkeit. Diese Werte senkrecht zur Faserrichtung weisen die geringste Festigkeit der Holzstruktur auf. Für die Vorgänge bei der Holz Trocknung sind die Kennwerte aus statischen Kurzzeitversuchen nach LÜHMANN; NIEMZ (1993) nicht ohne weiteres anwendbar. In ihren Versuchen stellten sie fest, daß die Bruchdehnung im Vergleich zur statischen Kurzzeitbelastung deutlich größer und die Bruchspannung in der Regel kleiner ist. Sie sehen die Bruchdehnung

<sup>12</sup> Über das Internet abrufbar unter <http://mhph58.mw.tu-dresden.de> (Stand: 07.03.2004).

als das günstigere Schadenskriterium an und nennen für Fichte einen Wert von ca. 3%.

Die Querdruckfestigkeit ist etwas höher als die Querzugfestigkeit, stellt aber im eigentlichen Sinn keine Bruchspannung dar. Bei Überschreiten der Proportionalitätsgrenze kommt es zu einer zunehmenden Verdichtung des Materialgefüges, wodurch der Widerstand gegen das Zusammendrücken steigt. Als Maß für die Querdruckfestigkeit dient daher die Quetschgrenze. Sie markiert im Spannungs-Dehnungs-Diagramm den (zu definierenden) Punkt, ab dem die Verformung stark zunimmt (N<sub>IE</sub>MZ 1993, S. 159). Es können also schon unterhalb der Quetschgrenze plastische Deformationen auftreten.

Bei Querzugbelastung finden sich kaum Werte für die Höhe der Proportionalitätsgrenze. Ab welchen Zugspannungen plastische Deformationen zu erwarten sind, läßt sich daher nur in wenigen Fällen sagen. Die Querzugfestigkeit, also die Bruchspannung, weist eine große Streuung und Abhängigkeit von der Rohdichte, der Ästigkeit und inneren Kerbstellen auf. Zudem sind viele in der Literatur als Querzugfestigkeit bezeichnete Daten nach der amerikanischen Norm ASTM-D 143 ermittelt. Durch die Ausformung des in Abbildung 54 dargestellten Prüfkörpers entwickelt sich über dem mittleren Probenquerschnitt eine ungleichmäßige Spannungsverteilung (Abbildung 55). Die an solchen Prüfkörpern

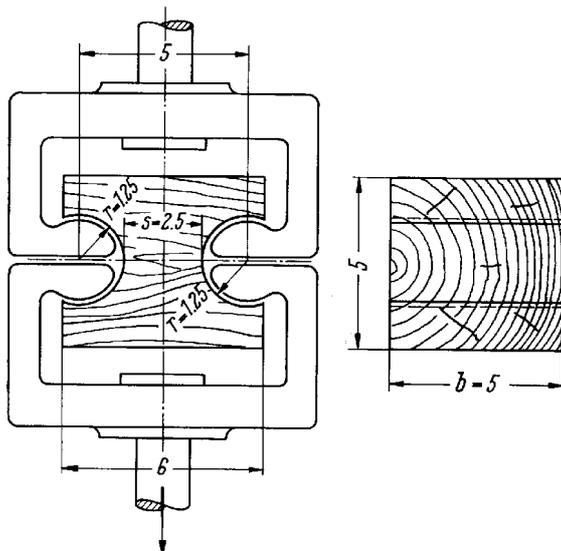


Abbildung 54:  
Probekörper und Einspannvorrichtung zur Bestimmung der „Querzugfestigkeit“ nach ASTM D 143-52. Alle Maßangaben in cm.  
Aus KOLLMANN; CÔTÉ (1968, S 330, Fig. 7.50).

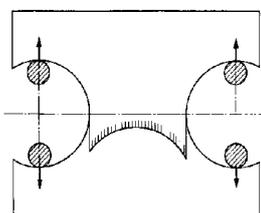


Abbildung 55:  
Spannungsverteilung über den mittleren Querschnitt bei einer Doppelspaltprobe nach Amerikanischen und Britischen Normen.  
Aus KOLLMANN; CÔTÉ (1968, S 330, Fig. 7.52).

ermittelte Bruchspannung ist dadurch niedriger als bei Querkzugversuchen mit gleichmäßiger Spannung über den Probenquerschnitt. Schon KEYLWERTH (1951) hat darauf hingewiesen, daß Prüfkörper nach ASTM-D 143 korrekter als Doppelspaltproben zu bezeichnen sind. Die von ihm gegenübergestellten Werte von Querkzug- und Spaltfestigkeiten sind in Tabelle 9 wiedergegeben.

Holzart	Zugfestigkeit $\sigma_{zB}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	Spaltwiderstand $\sigma_S$		Rohdichte $\rho_u$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Holz- feuchtigkeit $u$ [%]
		Spaltproben [kg/cm <sup>2</sup> ]	Doppelspalt- proben [kg/cm <sup>2</sup> ]		
Eiche	83...97	8,4...9,5	22,2...31,8	0,64...0,68	12,1...12,6
	90	8,8	26,3	0,66	12,4
Rotbuche	96...118	8,3...8,8	24,6...38,1	0,67...0,72	11,5...11,8
	107	8,6	31,1	0,69	11,7
Weißbuche	-	7,1...9,7	27,1...33,3	0,76...0,78	10,8...11,3
	-	8,1	30,2	0,77	11,2
Esche	101...127	8,5...10,0	25,4...42,3	0,67...0,79	8,6...9,1
	112	9,6	30,6	0,76	8,8
Nußbaum	98...114	8,8...12,7	21,1...32,6	0,58...0,66	10,9...11,4
	105	11,7	29,7	0,60	11,2
Linde	50...60	6,6...7,3	20,7...25,4	0,57...0,59	9,8...10,1
	58	7,0	22,8	0,58	10,0
Erle	69...79	6,4...7,4	24,5...26,5	0,53...0,56	10,4...10,8
	73	7,0	25,9	0,55	10,7
Fichte	33...40	4,1...5,1	15,0...20,4	0,48...0,69	11,5...11,6
	38	4,6	17,3	0,54	11,7
Lärche	48...52	4,8...5,5	11,3...27,9	0,66...0,72	11,6...12,3
	50	5,2	20,1	0,68	12,1
Kiefer	32...37	4,7...5,4	15,1...19,6	0,51...0,58	10,9...13,7
	43	5,1	17,4	0,54	12,0

Tabelle 9: Werte für die Querkzugfestigkeit und Spaltwiderstand für einige Gebrauchshölzer bei gegebener Rohdichte und Holzfeuchtigkeit. Die nach ASTM-D 143 ausgeführten Doppelspaltproben haben aufgrund der ungleichmäßigen Spannungsverteilung im Probenkörper einen deutlich geringeren Betrag. Nach KEYLWERTH (1951, S. 6, Tabelle 2).

Am Beispiel der Doppelspaltprobe wird deutlich, daß innere Kerbstellen, wie schon vorhandene (Mikro-)Risse, und Strukturunterschiede, wie z. B. Holzstrahlen oder Äste, die Querkzugfestigkeit deutlich herabsetzen können. An diesen Kerbstellen

treten lokale Spannungsspitzen auf, die bei wesentlich geringerer Gesamtbelastung die Bruchspannung überschreiten. Diese lokalen Schwächungen setzen die Festigkeit des Gefüges herab und führen letztlich zum makroskopischen Bruch. Eine ausführliche Betrachtung des Bruchgeschehens anhand innerer Kerbstellen findet sich bei KOLLMANN (1967).

Es gibt einige Ansätze, von anderen Werten auf die Querkzugfestigkeit zu schließen. Nach KOLLMANN; CÔTÉ (1968, S. 333) ist die Querkzugfestigkeit zehn mal so groß wie die Spaltfestigkeit. Letztere ist in radialer Richtung am kleinsten (NIEMZ 1993, S. 164). Die Querkzugfestigkeit beträgt dagegen in tangentialer Richtung 2-10%, in radialer 3-25% der Längszugfestigkeit (KOLLMANN 1951, S. 668).

BUCK (1972, S. 6) versucht die Proportionalitätsgrenze für Querkzugbelastung anhand der Biegebarkeit durch Dämpfen abzuschätzen. Technologische Kennwerte zur Biegebarkeit finden sich im WOOD HANDBOOK (1999, 3-16, Table 3-8) und bei KOLLMANN (1955, S. 793, Zahlentafel 114). Im ersten Fall dient der prozentuale Anteil bruchfrei gebogener Proben als Kriterium, im zweiten Fall der maximal erzielbare Krümmungsradius. Da in beiden Fällen weder die Probenabmessungen noch die sonstigen Versuchsparameter angegeben sind, eignen sich diese Werte allenfalls zur tendenziellen Einteilung der Querkzugempfindlichkeit von Holzarten.

Nach NIEMZ (1993, S. 158) beträgt die Querkzugfestigkeit 3-4% der Längszugfestigkeit. Aus Abbildung 56 ergibt sich für die Querkzugfestigkeit eine lineare Abhängigkeit von der Holzfeuchte bei Zimmertemperatur. Die Längszugfestigkeit besitzt dagegen eine nichtlineare Abhängigkeit von der Holzfeuchte, wie aus Abbildung 57 ersichtlich ist. Eine Umrechnung ist daher problematisch.

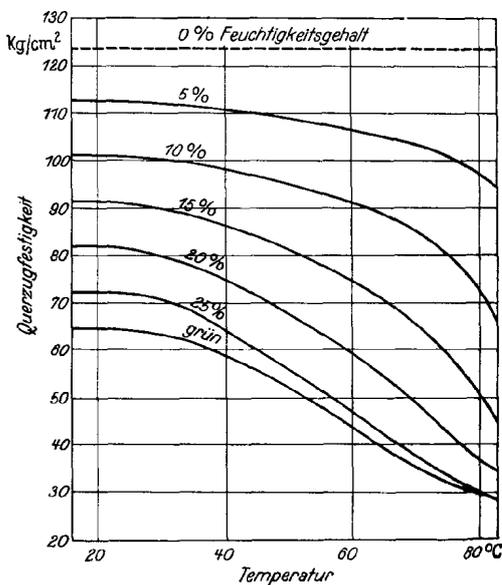


Abbildung 56:  
Zugfestigkeit für Buchenholz senkrecht zur Faser bei verschiedenen Holzfeuchtigkeiten in Abhängigkeit von der Temperatur.  
Aus KOLLMANN (1951, S. 667, Bild 564).

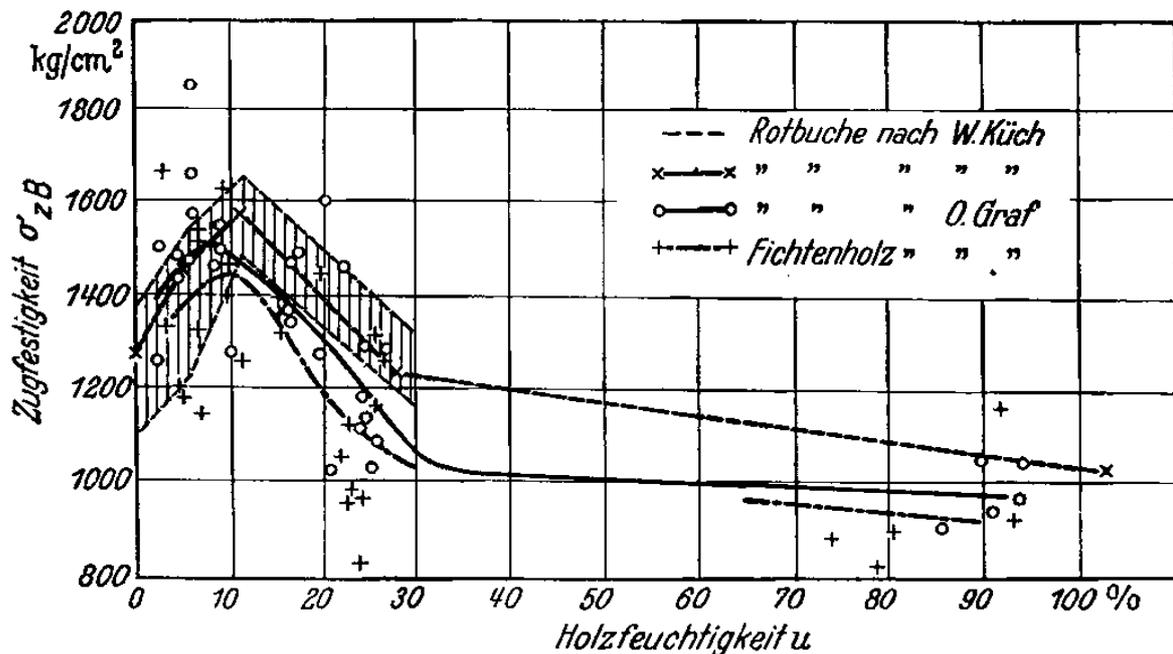


Abbildung 57: Abhängigkeit der Zugfestigkeit längs der Faser vom Feuchtigkeitsgehalt bei Fichtenholz und Rotbuchenholz. Aus KOLLMANN (1951, S. 663, Bild 557).

### 5.3.5 Quell- und Schwindmaße

Ebenso wie bei den Festigkeitswerten kann man zur Ermittlung der Quell- und Schwindmaße auf Literaturdaten zurückgreifen, sofern Holzart, Rohdichte und Holzfeuchtebereich bekannt sind. Zu beachten ist lediglich das Bezugsmaß dieser Werte, das sich in der Regel auf den darrtrockenen oder den maximal gequollenen (über Fasersättigung) Zustand bezieht. Auch die Quell- und Schwindmaße lassen sich über die Datenbank vom Lehrstuhl für Holz- und Faserwerkstofftechnik (HFT) an der Technischen Universität Dresden erschließen.<sup>13</sup>

Aus den Nomogrammen in den Beiblättern 1-3 zu DIN 68100 lassen sich Grenz- und Mittelwerte der Maßänderungen (bei unbehinderter Quellung bzw. Schwindung bis zur Ausgleichsfeuchte) durch Feuchteänderungen ablesen.

Die wohl umfangreichste Sammlung an differenzierten Daten zu Quell- und Schwindmaßen findet sich in RIJSDIJK; LAMING (1994). Sie sind dort für 145 Holzarten in Diagrammform für die radiale und tangentielle Richtung enthalten. Weiterhin sind die Sorptionskurve sowie Angaben zur Rohdichte (mit Minimal- und Maximalwertangabe) und Quellungs-/Schwindungskoeffizienten mit Variationsbereichen angegeben.

<sup>13</sup> Über das Internet abrufbar unter <http://mhph58.mw.tu-dresden.de> (Stand: 07.03.2004).

### 5.3.6 Spannungen im Holz

Spannungen im Holz können ihre Ursache in einer äußeren Belastung haben. Deren Höhe lässt sich aus statischen Berechnungen ableiten. Daneben können im Holz aber auch sogenannte Eigenspannungen vorliegen. Beispiele hierfür sind Wuchs- und Trockenspannungen (Verschalung) oder Spannungen durch ungleichmäßige Feuchteverteilung über den Querschnitt. SCHNIEWIND (1960) teilt die Eigenspannungen in drei Gruppen ein. Das sind erstens Spannungen innerhalb der Zellwand, die vornehmlich auf den unterschiedlichen Schwindmaßen der Zellwandschichten beruhen. Die zweite Art von Spannungen bildet sich im Zellgewebe aus und die dritte in größeren Holzstücken. Sie beruht auf der Schwindungsanisotropie, kann aber auch durch ungleiche Feuchteverteilung bedingt sein. Die bisherige Betrachtung der Holzfeuchte als Durchschnittswert lässt eine relativ homogene Verteilung erwarten. Durch die zeitliche Verzögerung der Sorption bei Trocknungs- oder Befeuchtungsprozessen entsteht aber eine ungleichmäßige Verteilung. Abbildung 58 zeigt die Feuchteverteilung in der Mitte eines Fichtenholzstabes bei der Trocknung.

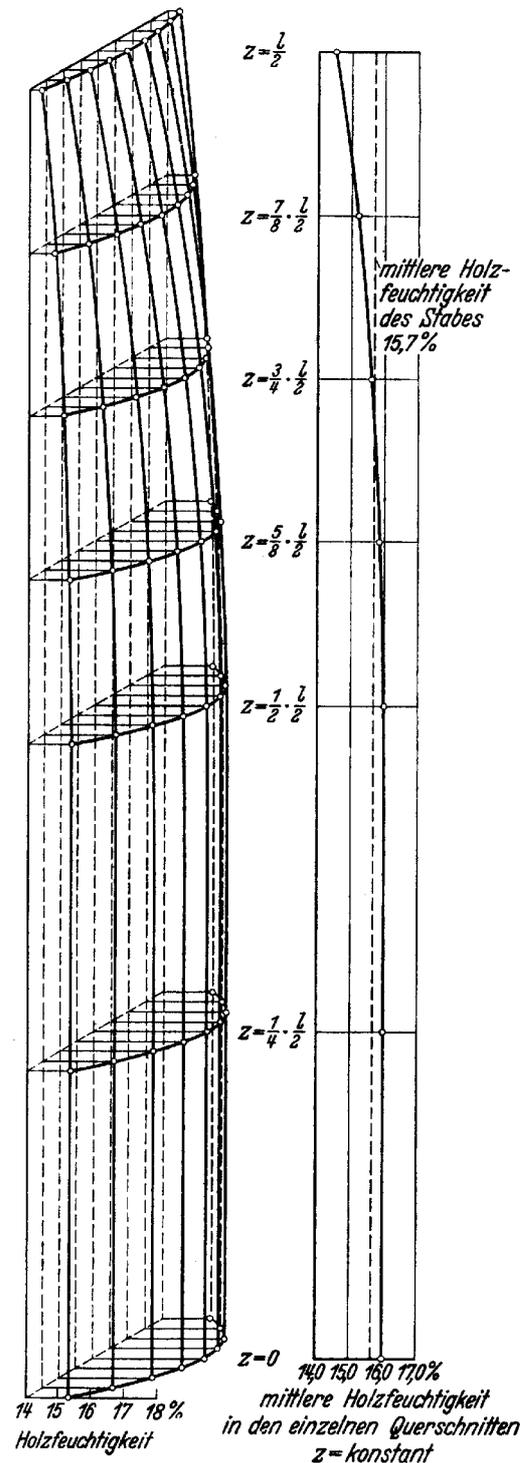


Abbildung 58: Feuchtigkeitsverteilung in der Hälfte eines trocknenden Fichtenholzstabes mit 400 mm Länge, 57,9 mm Breite und 24,5 mm Dicke. Es bedeuten: z Koordinate mit Ursprung in der Stabmitte; l Länge des Stabes.  
 Aus KOLLMANN (1951, S. 452-453, Bild 348).

Die Feuchteverteilung über den Brettquerschnitt bei der Trocknung ist in Abbildung 59 wiedergegeben. Der Feuchtegradient über den Holzquerschnitt kann mehrere Prozent betragen und lässt sich wie in Abbildung 60 als Holzfeuchteprofil darstellen. Daneben sind die aus dem Feuchtegradienten resultierenden Spannungen aufgetragen.

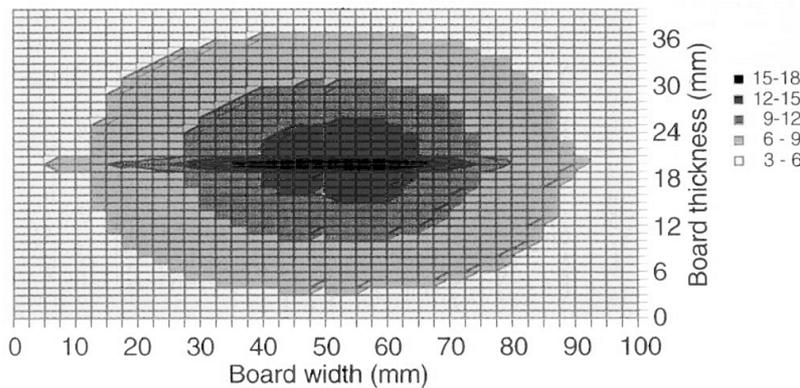


Abbildung 59:  
 Feuchteverteilung über den Querschnitt (100 mm x 40 mm) eines Kiefern Brettes bei der Trocknung.  
 Nach PANG; WIBERG (1998, S. 11, Fig 2i).

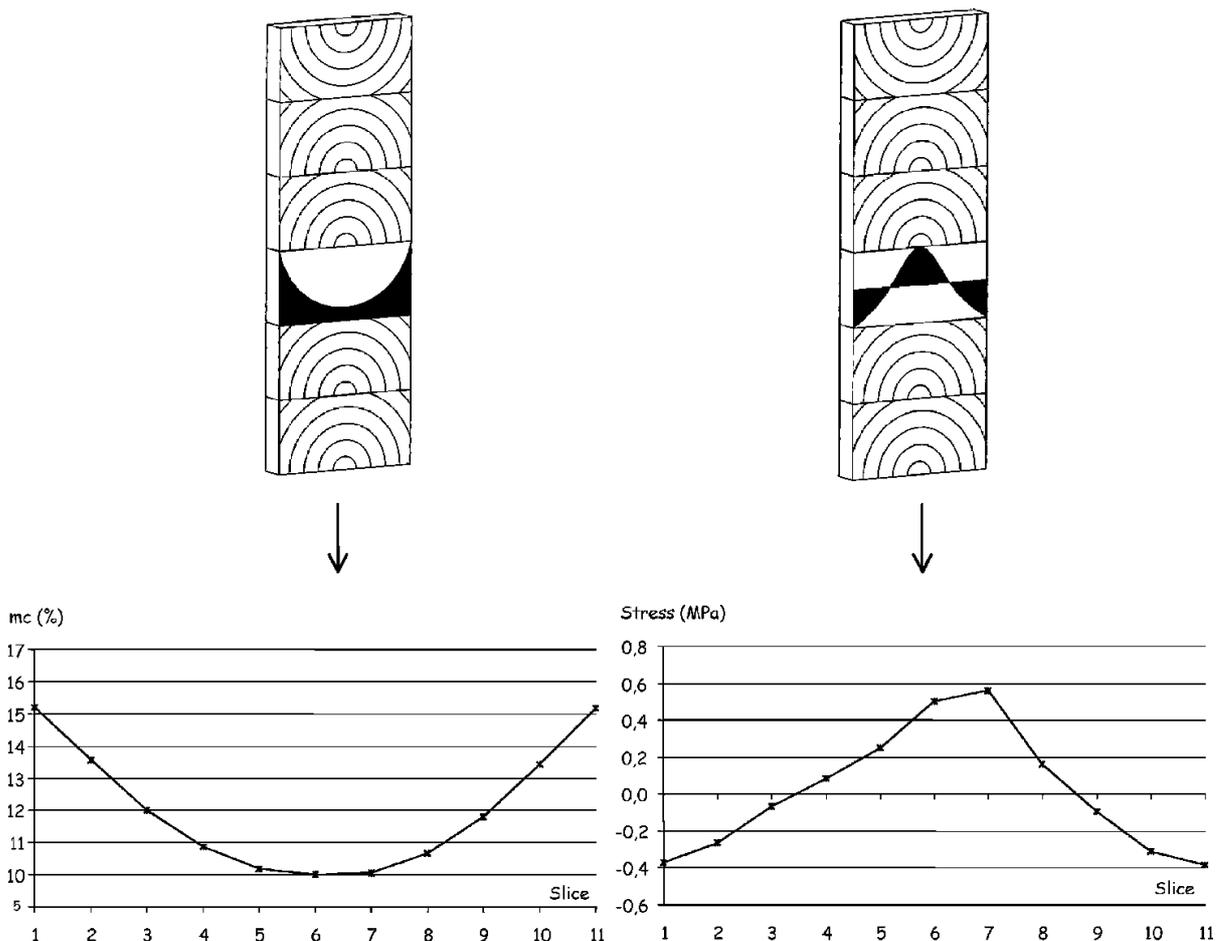


Abbildung 60: Feuchteverteilung (links) und entsprechende innere Spannungen (rechts) in Brettchichtholzproben am 11. Tag nach der Lagerung bei 80% relativer Luftfeuchte. Die 90 mm breiten, 270 mm langen und 16 mm dicken Proben wurden zuvor bei 40% relativer Luftfeuchte konditioniert. Die Hirnholzflächen sind versiegelt, um eindimensionalen Feuchtetransport quer zur Faserrichtung sicherzustellen. Aus JÖNSSON; THELANDERSSON (2003, S. 343, Abb.1).

Trocknungsspannungen sind nach WELLING ET AL. (1989, S. 15) „Eigenspannungen, die im Holz ohne Einwirkung von äußeren Lasten allein durch die Schwindungsbehinderung von unterschiedlich feuchten Brettschichten entstehen. Eigenspannungen können nur durch zerstörende Prüfung nachgewiesen werden. Eine quantitative Bestimmung ist nur mit erheblichem Aufwand möglich“. Laut FORTUIN (2003, S.1) ist bis heute noch kein Messverfahren bekannt, mit dem Eigenspannungen zerstörungsfrei nachgewiesen werden können. Eine Übersicht zu den Verfahren gibt NIEMZ (1997). Sie beruhen alle auf dem stufenweisen Abbau der Spannungen durch Zerlegen des Probekörpers. Aus den dabei auftretenden Deformationen läßt sich die Spannung ableiten. WELLING (1987) entwickelte ein Verfahren, mit dem sich die bei der Holz Trocknung auftretenden Eigenspannungen aus dem Holzfeuchteprofil errechnen lassen. Er bestimmt das Feuchteprofil während des Trocknungsvorganges über das Widerstandsmeßverfahren. Dazu sind Elektroden in unterschiedlicher Tiefe in den Brettquerschnitt einzubringen. FORTUIN (2003) versuchte dies zu umgehen, indem er die Feuchteverteilung anhand verschiedener Diffusionsmodelle aus den Umgebungsbedingungen und Holzkenwerten berechnete. Diese Modelle zeigen aber keine ausreichende Genauigkeit, sodaß FORTUIN (2003, S. 199) abschließend feststellt: „Um die Trocknungsspannungen bei unterschiedlichen Trocknungsbedingungen abzuschätzen, ist eine genaue Vorhersage der Profilfeuchten unerlässlich. Leider reicht das in dieser Arbeit angewandte Differenzenverfahren zur Berechnung der Feuchteverteilung mit den allgemeinen Ansätzen zum Diffusionskoeffizienten hierfür noch nicht aus. Es sind weitere Anstrengungen nötig, um die Gesetzmäßigkeiten beim Feuchtetransport zu erkennen. Aufgrund der in der Literatur beschriebenen Trocknungsversuche kann vermutet werden, dass neben der mikroskopischen und makroskopischen Struktur und chemischen Zusammensetzung des Holzes auch die Trocknungs-Spannungen einen Einfluß auf den Feuchtetransport besitzen.“

Bei der Übertragung von Arbeiten zur (technischen) Holz Trocknung ist generell zu beachten, daß die primäre Sorptionsisotherme, d. h. mit Trocknungsbeginn über Fasersättigung, einen anderen Verlauf aufweist als im hygroskopischen Bereich (siehe MATEJAK 1983).

## 5.4 Bewertungsmöglichkeiten

Unter welchen klimatischen Bedingungen feuchteinduzierte Spannungen im Holz die Querkzugfestigkeit überschreiten ist noch nicht ausreichend geklärt und Gegenstand aktueller Forschungen. Eine exakte Vorhersage der Feuchtereaktionen von Holz scheint demnach bisher nicht möglich.<sup>14</sup> Es ist bezeichnend, wenn selbst ein renommiertes Holzforschungsinstitut für den konkreten Fall einer Holztafelbilderdecke nur die wenig konkrete Empfehlung gibt: „Die Kontrolle und Regelung des Raumklimas ist als Hauptmaßnahme zur Verbesserung der Dimensionsstabilität der Bildtafeln und damit zur Erhaltung der Malereien anzusehen“ (ARNOLD; RICHTER 1997, S. 239). Zur Bewertungsproblematik äußert sich DREINER (1997, S. 285): „Eine bewertende Betrachtung muß die Frage beantworten, welche Deformationen bei jeweils vorherrschenden Klimasituationen zu erwarten sind. Absolute Angaben hierzu, die z. B. zukünftige Formänderungen mit genauen Maßangaben prognostizieren, sind für einen so komplexen Werkstoff wie Holz nicht möglich, vergleichende Bewertungen verschiedener Klimasituationen lassen sich aber sehr wohl ableiten.“

Daher werden im folgenden zwei Ansätze diskutiert, die den Luftfeuchteeinfluß anhand einiger der bisher vorgestellten Kenngrößen zu bewerten versuchen.

---

<sup>14</sup> „Failure modes in tension perpendicular to grain are difficult to predict due to the complex material response of wood when it is exposed to moisture changes. [...] The purpose of the present research is to measure moisture-induced stresses in wood cross sections under moisture action. The results can be used to verify and develop models which can predict moisture-induced stresses in a reliable way“ (JÖNSSON 2004, S. 154).

### 5.4.1 Methode von ERHARDT ET AL. (1995)

Einen vielversprechenden Ansatz verfolgen ERHARDT ET AL. (1995) indem sie tolerierbare Schwankungsbereiche der relativen Luftfeuchte aus den Festigkeitseigenschaften und dem Quellungskoeffizient für Nordamerikanische Schwarzpappel ableiten. Auf eine sehr anschauliche Weise stellt Abbildung 61 das Ergebnis dar. Ausgehend von einem bestimmten Wert der relativen Luftfeuchte, beispielsweise 50%, läßt sich daraus der Änderungsbereich der relativen Luftfeuchte ermitteln, in dem bei völliger Quellungsbehinderung noch keine plastischen Deformationen auftreten. Auf der Abszisse ist die relative Luftfeuchte aufgetragen, bei der sich das Holz im Gleichgewicht befindet (Starting Relative Humidity). An den „Yield“-Kurven lassen sich nun die auf der Ordinate aufgetragenen Werte der maximalen bzw. minimalen rF ablesen, innerhalb derer noch keine dauerhafte

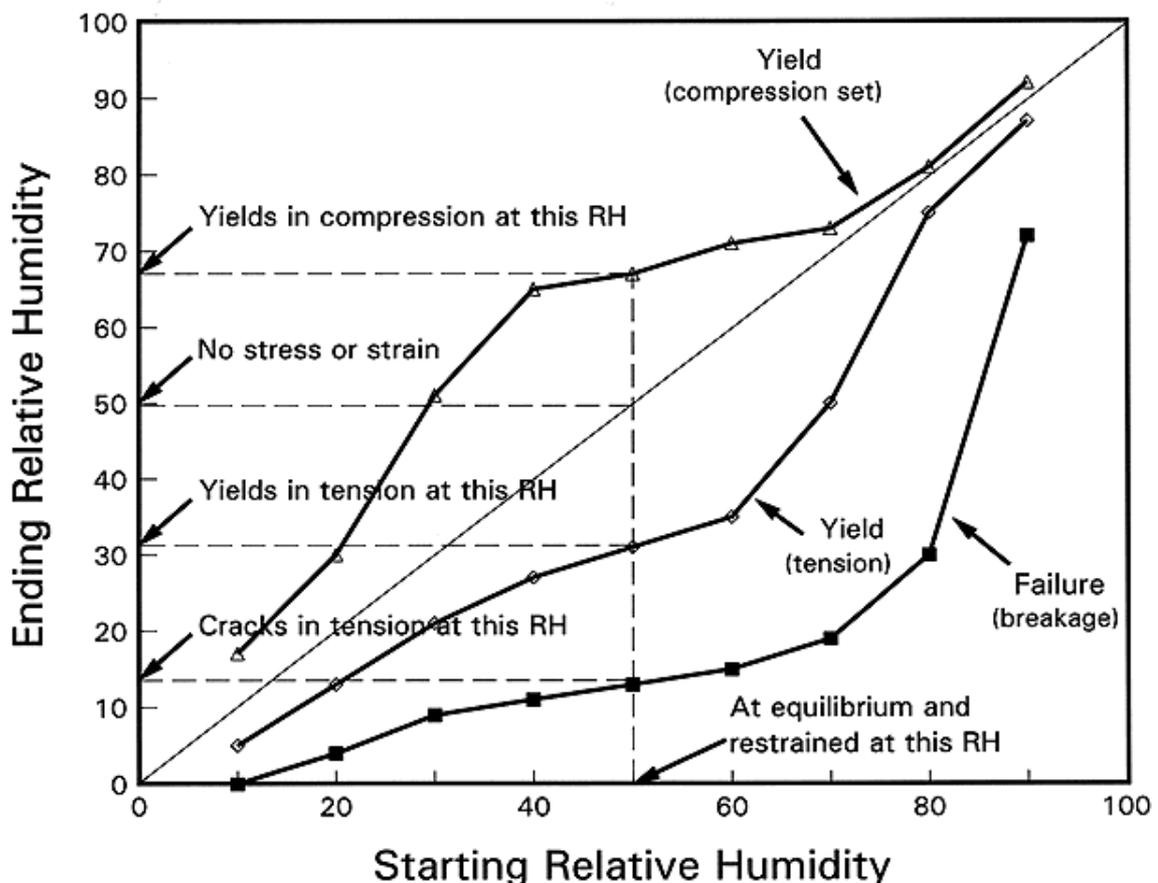


Abbildung 61: Zugfestigkeit (**Failure**) und Proportionalitätsgrenzen (**Yield**) bei Druck- (**compression set**) und Zugspannungen (**tension**) in tangentialer Richtung für Nordamerikanische Schwarzpappel in Abhängigkeit von rF-Änderungen bei vollständiger Quellungs- bzw. Schwindungsbehinderung. Ein fehler- und spannungsfreies Holzstück erträgt ausgehend von 50% relativer Luftfeuchte eine Erhöhung auf 68% oder ein Absinken auf 31% ohne dauerhafte Verformung. Zum Reißen durch Überschreitung der Querzugfestigkeit kommt es erst bei einer rF unterhalb 13%.  
 AUS ERHARDT ET AL. (1995, Figure 5).

Verformung auftritt. Ausgehend von einer rF von 50% gelangt man so zu 31% und 68%. Querzugrisse (Failure/breakage) sind erst unterhalb einer rF von 13% zu erwarten.

Zu dieser Darstellung gelangen ERHARDT ET AL. (1995), indem sie aus der luftfeuchteabhängigen Dimensionsänderung (das ist der Quellungskoeffizient) auf die entstehende Spannung schließen, die entsteht, wenn diese Verformung völlig unterbunden wird. Setzt man für diese Spannung nun den Wert der tangentialen Zug- bzw. Bruchspannung an der Proportionalitätsgrenze oder die Bruchspannung ein, erhält man die entsprechende relative Luftfeuchte.

Allein aus der Annahme völliger Quellungsbehinderung und der Verwendung der tangentialen Querspannung ergibt sich aber noch nicht der angestrebte „worst-case“.

Erstens gibt es Holzarten, deren Querkzugfestigkeit unter der von Nordamerikanischer Schwarzpappel liegt.

Zweitens sind die in der Literatur vorkommenden Kennwerte ausschließlich an kleinen, fehlerfreien Holzproben ermittelt worden. Durch Vorschädigung, Risse, Äste, etc. entstehen innere Kerben, an denen die Spannungsverteilung ungleichmäßig ist. Die lokalen Spannungsspitzen überschreiten die Grenzwerte bei geringerer Gesamtbelastung, was bereits am Beispiel der Doppelspaltprobe verdeutlicht wurde. Bei historischen Hölzern kann es daher schon erheblich früher zu lokalen Deformationen kommen.

Zum Dritten können im Holz schon Spannungen vorhanden sein, z. B. durch äußere Lasten oder Verschalung. Da diese vektoriellen Größen richtungsabhängig sind, können sie die zulässige Spannung vergrößern oder mindern (siehe JÖNSSON; THELANDERSSON 2003).

Hauptkritikpunkt an dieser Methode ist die zu geringe Anzahl an berücksichtigten Einflüssen auf die Kenngrößen. Auch das rheologische Verhalten des Holzes und die Änderungsgeschwindigkeit der relativen Luftfeuchte bleiben unberücksichtigt. Die sehr anschauliche Darstellungsweise ermöglicht jedoch eine einfache und schnelle Ermittlung der Schwankungsbereiche.

#### 5.4.2 Methode von DREINER (1997)

Gegenstand der Untersuchungen von DREINER (1997) ist eine Beurteilung der klimabedingten Belastungen für ein Tafelbild aus Eichenholzbrettern. Sein Ansatz richtet sich dabei ausschließlich auf die feuchteinduzierten Bewegungen des Bildträgers. Diese unterscheidet er nach zwei Verformungsmechanismen: Strukturell bedingte Formänderungen durch das anisotrope Quell- und Schwindverhalten, sowie Formänderungen durch unterschiedliche Quellzustände im Querschnitt. Laut DREINER (1997, S. 285) betreffen „tageszeitliche Schwankungen [...] wegen der langsamen Feuchtebewegung im Holz bei Objekten mit Querschnittsabmessungen über 1 cm nur die oberflächennahen Schichten und führen dementsprechend zu Spannungen mit daraus resultierenden Verformungen.“ Um diese Unterschiede zwischen der tageszeitlich gesehen konstanten Holzfeuchte im Kern und der innerhalb von Minuten bis Stunden reagierenden Oberfläche abschätzen zu können wird die Gleichgewichtsfeuchte des Holzes anhand von Raumtemperatur und relativer Luftfeuchte berechnet. Aus den Wertepaaren von Temperatur und relativer Luftfeuchte in Abbildung 62 läßt sich die zugehörige Gleichgewichtsfeuchte ableiten (vgl. Abbildung 46). Diese berechnete Gleichgewichtsfeuchte ist in Abbildung 62 im untersten Diagramm aufgetragen. Sie entspricht nicht dem Verlauf der tatsächlichen durchschnittlichen Holzfeuchte sondern allenfalls dem der Oberflächenschicht. Um nun die möglichen Feuchteunterschiede im Holzquerschnitt bewerten zu können vergleicht DREINER (1997) die Maximalwerte (Oberfläche) dieser Gleichgewichtsfeuchte mit deren Durchschnittswert (Kern). In dem Beispiel in Abbildung 63 beträgt der Tagesmaximalwert 9,6%, der Tagesminimalwert 9,4% und der Mittelwert 9,52%. Aus der Differenz von Maximal und Mittelwert ergibt sich eine Maßzahl für den Feuchteunterschied zwischen Holzoberfläche und Kern. Diese Maßzahl, im genannten Beispiel 0,12%, spiegelt nicht die tatsächlichen Feuchteunterschiede im Holz wieder, sondern wird lediglich als Kennzahl für das Ausmaß der Bildbewegungen herangezogen.

Die Methode von DREINER (1997) eignet sich also vornehmlich zum Vergleich von Raumklimasituationen aufgrund vorhandener Meßwerte von Temperatur und relativer Luftfeuchte. Die Kennzahlen erlauben nur eine tendenzielle Wertung der Feuchtereaktionen und eignen sich nicht zur Quantifizierung tatsächlicher Formänderungen. Ein Vorzug dieser Methode liegt darin, daß teilweise die Ursachen von Kriechverformungen berücksichtigt werden.

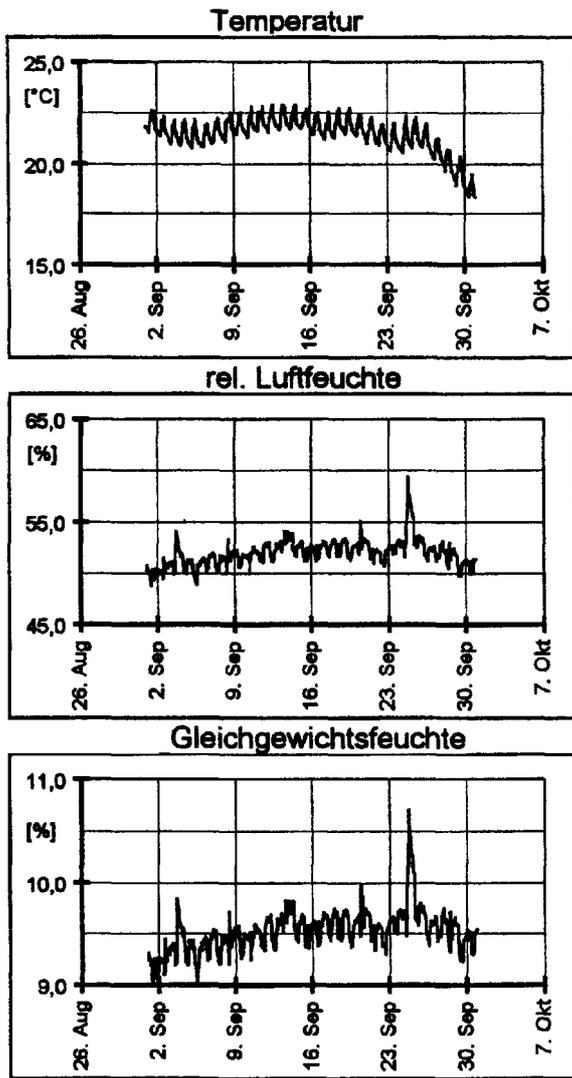


Abbildung 62:  
 Temperatur und relative Luftfeuchte mit daraus berechnetem Gleichgewichtsfeuchteverlauf (Stiftsmuseum Aschaffenburg, September 1995).  
 Nach DREINER (1997, S. 286, Abb. 6-rechts).

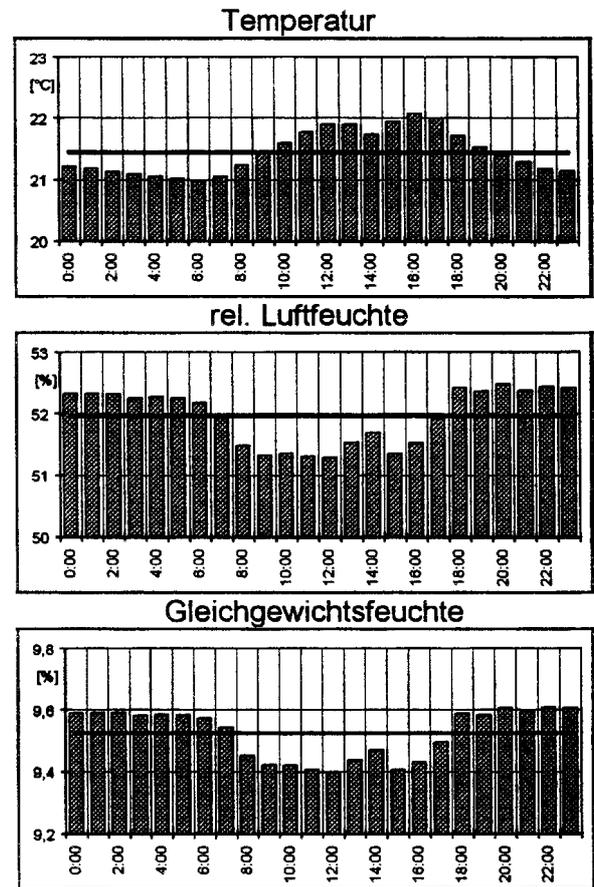


Abbildung 63:  
 Tagesgang für Temperatur, relative Luftfeuchte und daraus berechnete Gleichgewichtsfeuchte. Die horizontalen Linien markieren die Mittelwerte (Stiftsmuseum Aschaffenburg, September 1995).  
 Nach DREINER (1997, S. 288, Abb. 11-rechts).

## 6 Zusammenfassung

Die Reaktion des Holzes auf Luftfeuchteänderungen läßt sich grundsätzlich anhand seines anatomischen Aufbaus und physikalischer Kenngrößen beschreiben. Eine solche Betrachtung führt einerseits durch eine genauere Vorstellung von den Vorgängen im Material zu einem besseren Verständnis seiner Feuchtereaktionen. Zum anderen liefert sie die Grundlagen für eine quantitative Bewertung der Feuchteempfindlichkeit.

Alle mechanischen Feuchtereaktionen des Holzes beruhen auf Quell- oder Schwindvorgängen, die Dimensionsänderungen (Dehnung) oder Spannungen (bei Behinderung der Dehnung) bewirken. Sie können auf submikroskopischer, mikroskopischer und makroskopischer Ebene stattfinden. In deren Folge kann es zu plastischen Deformationen (Druckstauchung, Risse, Verwölbung, usw.), Änderung von Materialeigenschaften (Festigkeitswerte) und bei Materialverbänden zu Schichtentrennung kommen.

Der Einfluß von Luftfeuchteänderungen auf Holz läßt sich nach dem bisherigen Forschungsstand nur schwer vorhersagen. Modelle, die einen Diffusionsansatz benutzen erreichen noch keine ausreichende Genauigkeit für die Holz Trocknung. Der Einfluß auf einzelne Kenngrößen und Wirkungsmechanismen ist aber relativ genau bekannt.

Für die Bewertung von Eigenspannungen ist die Festigkeit quer zur Faser ausschlaggebend, wobei die geringsten Werte in tangentialer Richtung auftreten. Momentan existieren keine zerstörungsfreien Verfahren zur direkten Bestimmung von inneren Spannungen. Ein allgemeingültiger Ansatz zur Beschreibung der Sorptionsgeschwindigkeit, ihrer Tiefenwirkung und den daraus resultierenden inneren Spannungen fehlt bisher.

Die Kriechverformung bzw. Spannungsrelaxation verstärkt sich mit zunehmender Luftfeuchtedifferenz und Anzahl der Änderungen. Aber auch geringe Änderungen der Holzfeuchte können das mechano-sorptive Kriechverhalten deutlich beeinflussen. Dafür genügen unter Umständen Änderungen der relativen Luftfeuchte um 5%. Die Änderungsgeschwindigkeit der relativen Luftfeuchte hat dagegen auf das Kriechverhalten von Holz keinen Einfluß.

Die Festigkeitskennwerte von neuem Holz sind auch für ungeschädigtes altes Holz gültig. Dagegen zeigt Holz mit biologischem Befall teilweise deutlich veränderte

Kennwerte, was entsprechend berücksichtigt werden muß. Zerstörungsfreie Methoden zur direkten Festigkeitsbestimmung von biologisch geschädigtem und gefestigtem Holz sind nicht bekannt. Zur indirekten Festigkeitsbestimmung bei Fraßinsektenbefall liefert die von GLOS (1989a, 1989b) beschriebene Methode einen guten Ansatz. Die Festigkeitsabnahme durch Pilzbefall kann nur für manche Arten über den Masseverlust des Holzes ermittelt werden.

Voraussetzung zur Bestimmung der Feuchtereaktion von Kulturgut ist eine gründliche technologische Untersuchung von Aufbau und Konstruktion. Dabei sind neben den Holzarten und der anatomischen Anordnung der Holzteile die Einflüsse auf die zu bestimmenden Kenngrößen festzustellen. Eine Definition möglicher Schäden benötigt man zur Festlegung schadensrelevanter Grenzwerte. Zur Ermittlung der Kennwerte gibt es noch nicht für alle Kenngrößen zerstörungsfreie Standardmethoden.

Die Ergebnisse der meisten Untersuchungen zur Feuchtereaktion von Kunstwerken sind nur auf den jeweils betrachteten Fall anwendbar. Dennoch gibt es Ansätze, mit denen eine eingeschränkte Quantifizierung oder zumindest ein Vergleich der Feuchteempfindlichkeit von Kulturgut aus Holz möglich ist.

## 7 Ausblick

Die Berechnung des Feuchtetransportes und der dabei durch Feuchteprofile entstehenden Spannungen ist aktueller Gegenstand der Holzforschung. Angesichts der noch relativ ungenauen Ergebnisse für die technische Holz Trocknung scheint es verfrüht, die Trocknungsmodelle auf die Fragestellungen der präventiven Konservierung zu übertragen. Es darf daher nicht verwundern, wenn bisher nur die Kontrolle und Regelung des Raumklimas empfohlen wird, ohne dies genauer zu spezifizieren. Trotz des im Vergleich zur Konservierungswissenschaft sehr umfangreichen Wissens über die Eigenschaften von Holz, sind in der Holzforschung noch längst nicht alle Fragen zur Feuchtereaktion des Holzes geklärt (siehe BENGSSON 2001b, FORTUIN 2003). Viele jüngst erschienene Forschungsergebnisse zeigen dennoch für die Belange der präventiven Konservierung interessante Ansätze.

Zum genauen Verständnis der einzelnen Prozesse und ihrer Ursachen ist eine möglichst separate Betrachtung sinnvoll. Bei der Anwendung der daraus gewonnenen Erkenntnisse bedarf es aber der Einbeziehung des Gesamtkontextes. Denn das Verhalten von Kulturgut gegenüber Luftfeuchteschwankungen läßt sich erst mit einer entsprechenden Betrachtung der Feuchtereaktionen aller im jeweiligen Fall vorkommenden Materialien beurteilen. Nicht immer ist es dabei ausreichend nur das empfindlichste Material im Gefüge als Maßstab heranzuziehen. Es ist zu berücksichtigen, daß sich das Verhalten von Materialkombinationen nicht in jedem Fall additiv aus den Eigenschaften der einzelnen Schichten ableiten läßt. Das Beispiel der Holzfestigung und die Untersuchungen von BREWER (1991) zeigen, daß Materialien durchaus gegenseitig ihre feuchtephysikalischen Eigenschaften beeinflussen können.

Außer den Kurzzeitschwankungen sind der maximal zuträgliche Schwankungsbereich und chemische Reaktionen durch Luftfeuchteinfluß zu berücksichtigen. Weiterhin hat die Temperatur bei hygroskopischen Materialien in kleinen Luftvolumina wie in Klimavitrinen oder Transportkisten einen erheblichen Einfluß auf den Feuchteausaustausch (DREINER 1997. TOISHI 1963).

## 8 Literaturverzeichnis

Die Zitierweise orientiert sich an DIN 1505-2. Bei den Herkunftsangaben der Abbildungen und Tabellen im Text bezeichnet „Aus“ die unveränderte Übernahme, während „Nach“ Veränderungen gegenüber dem Original kennzeichnet.

- APPELBAUM 1991 APPELBAUM, Barbara: *Guide to Environmental Protection of Collections*. Madison : Sound View Press, 1991
- APPELBAUM 1996 APPELBAUM, Barbara: Comments from a Conservator on Climate Control. In: *WAAC Newsletter* 18 (1996), Nr. 3, S. 21
- ARMSTRONG; CHRISTENSEN 1961 ARMSTRONG, L. D.; CHRISTENSEN, G. N.: Influence of moisture changes on deformation of wood under stress. In: *nature* 191 (1961), Nr. 4791, S. 869-870
- ARMSTRONG; KINGSTON 1960 ARMSTRONG, L. D.; KINGSTON, R. S. T.: Effect of Moisture Changes on Creep in Wood. In: *nature* 185 (1960), Nr. 4716, S. 862-863
- ARNOLD; RICHTER 1997 ARNOLD, Martin; RICHTER, Klaus: Holztechnologische Aspekte bei der Erhaltung der Bilderdecke. In: BLÄUER BÖHM, Christine (Hrsg.): *Die romanische Bilderdecke der Kirche St. Martin in Zillis : Grundlagen zur Konservierung und Pflege*. Bern : Haupt, 1997, S. 227-242
- ASHLEY-SMITH ET AL. 1994 ASHLEY-SMITH, Jonathan; FORD, David; UMNEY, Nick: Let's be honest - realistic environmental parameters for loaned objects. In: ROY, Ashok; SMITH, Perry (Hrsg.): *Preventive conservation: practice, theory and research (Preprints of the contributions to the Ottawa Congress, 12-16 September 1994)*. London : International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, 1994, S. 28-31
- BALL ET AL. 2001 BALL, R. D.; SIMPSON, I. G.; PANG, S.: Measurement, modelling and prediction of equilibrium moisture content in *Pinus radiata* heartwood and sapwood. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 59 (2001), Nr. 6, S. 457-462

- BANKS 1999 BANKS, Paul N.: What makes records deteriorate. In: *ASHRAE Journal* (1999), April, S. 71-76
- BARBER; MEYLAN 1964 BARBER, N. F.; MEYLAN, B. A.: The anisotropic shrinkage of wood : A theoretical model. In: *Holzforschung* 18 (1964), Nr. 5, S. 146-156
- BARKAS 1949 BARKAS, Wilfred W.: *The swelling of wood under stress : a discussion of its hygroscopic, elastic and plastic properties*. London : His Majesty's Stationery Office, 1949
- BEHERENS ET AL. 1994 BEHRENS, Ulrich; BALLERSTEDT, T.; SCHERER, K. H.; SCHMITT, R. E.: *Wissenschaftliche Arbeiten zur Ermittlung der optimalen Bedingungen für die Langzeitlagerung von archivalischem und bibliothekarischem Sammelgut : Abschlußbericht Stufe II für die Kommission des Deutschen Bibliotheksinstituts für Bestandserhaltung*. Eschborn : Battelle Ingenieurtechnik GmbH, 1994
- BENGTSSON 2000 BENGTSSON, C.: Stiffness of spruce wood – Influence of moisture conditions. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 58 (2000), Nr. 5, S. 344-352
- BENGTSSON 2001a BENGTSSON, C.: "Short-term" mechano-sorptive creep of well-defined spruce timber. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 59 (2001), Nr. 1-2, S. 117-128
- BENGTSSON 2001b BENGTSSON, C.: Mechano-sorptive bending creep of timber – influence of material parameters. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 59 (2001), Nr. 4, S. 229-236
- BERGER; RUSSELL 1986 BERGER, Gustav A.; RUSSELL, William H.: The reaction of plastic materials to environmental changes. In: *Studies in Conservation* 31 (1986), S. 49-64
- BERGER; RUSSELL 1988 BERGER, Gustav A.; RUSSELL, William H.: An evaluation of the preparation of canvas paintings using stress measurements. In: *Studies in Conservation* 33 (1988), S. 187-204

- BERGER; RUSSELL 1989 BERGER, Gustav A.; RUSSELL, William H.: Untersuchungen zum Einfluß der Umwelt auf die Erhaltung von Leinwandgemälden. In: *Restauro : Zeitschrift für Kunsttechniken, Restaurierung und Museumsfragen* (1989), Nr. 3, S. 191-203
- BERGER; RUSSELL 1990 BERGER, Gustav A.; RUSSELL, William H.: Deterioration Of Surfaces Exposed To Environmental Changes. In: *Journal of the American Institute for Conservation* 29 (1990), Nr. 1, S. 45-76
- BERGER; RUSSELL 1994 BERGER, Gustav A.; RUSSELL, William H.: Interaction between canvas and paint film in response to environmental changes. In: *Studies in Conservation* 39 (1994), S. 73-86
- BERGER; RUSSELL 1996 BERGER, Gustav A.; RUSSELL, William H.: Letter to the Editor. In: *WAAC Newsletter* 18 (1996), Nr. 1, S. 27-29
- BOOKER 1994 BOOKER, J. D.: Acoustic emission and surface checking in Eucalyptus regnans boards during drying. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 52 (1994), Nr. 6, S. 383-388
- BRADLEY 1995 BRADLEY, Susan (Hrsg.): *A Guide to the Storage, Exhibition and Handling of Antiquities, Ethnographia and Pictorial Art*. British Museum Occasional Papers Nr. 66, London : The British Museum, 1995
- BREWER 1991 BREWER, J. A.: Effect of selected coatings on moisture sorption of selected wood test panels with regard to common panel painting supports. In: *Studies in Conservation* 36 (1991), Nr. 1, S. 9-23
- BRÖKER 1984 BRÖKER, Friedrich-Wilhelm: Untersuchungen zur Quersugfestigkeit von Fichtenholz. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 42 (1984), Nr. 12, S. 474
- BRÖKER; KLEIN 1989 BRÖKER, Friedrich-Wilhelm; KLEIN, Peter: Bestimmung von Flächendehnungen bei Gemäldetafeln aus Holz. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 47 (1989), S. 206

- BROWN 1994 BROWN, Jonathan P.: Hygrometric measurement in museums: calibration, accuracy, and the specification of relative humidity. In: ROY, Ashok; SMITH, Perry (Hrsg.): *Preventive conservation: practice, theory and research (Preprints of the contributions to the Ottawa Congress, 12-16 September 1994)*. London : International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, 1994, S. 39-43
- BROWN; ROSE 1997 BROWN, Jonathan P.; ROSE, William B.: *Development of humidity recommendations in museums and moisture control in buildings*. 1997.  
<http://palimpsest.stanford.edu/byauth/brownjp/humidity1997.html>  
(08.01.2004)  
This paper is the full-length text of an article which was published, in a somewhat adumbrated form, in the APT Bulletin as: 'Humidity and moisture in historic buildings: the origins of building and object conservation', APT Bulletin, 27 / 3 (1996), 12-24
- BUCK 1952 BUCK, Richard D.: A Note on the Effect of Age on the Hygroscopic Behaviour of Wood. In: *Studies in Conservation* 1 (1952), S. 39-44
- BUCK 1962 BUCK, Richard D.: Some applications of mechanics to the treatment of panel paintings. In: THOMSON, Garry (Hrsg.): *Recent advances in Conservation : Contributions to the IIC Rome Conference, 1961*. London : Butterworths, 1962, S. 156-162
- BUCK 1972 BUCK, Richard D.: Some applications of rheology to the treatment of panel paintings. In: *Studies in Conservation* 17 (1972), Nr. 1, S. 1-11
- BURMESTER 1997 BURMESTER, Andreas: Der moderne Museumsbau: Konzept des Überlebens oder überlebtes Konzept?. In: *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung* 11 (1997), Nr. 2, S. 192-200
- CAMUFFO 1998 CAMUFFO, Dario: *Microclimate for cultural heritage*. Developments in atmospheric science Nr. 23, Amsterdam : Elsevier, 1998

- CHEN ET AL. 1997 CHEN, Guangnan; KEEY, R. B.; WALKER, J. C. F.: The drying stress and check development on high-temperature kiln seasoning of sapwood *Pinus radiata* boards. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 55 (1997), Nr. 3, S. 169-173
- CHRISTENSEN; KELSEY 1959a CHRISTENSEN, G. N.; KELSEY, Kathleen E.: Die Geschwindigkeit der Wasserdampfsorption durch Holz. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 17 (1959), Nr. 5, S. 178-188
- CHRISTENSEN; KELSEY 1959b CHRISTENSEN, G. N.; KELSEY, Kathleen E.: Die Sorption von Wasserdampf durch die chemischen Bestandteile des Holzes. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 17 (1959), Nr. 5, S. 189-203
- CORNELIUS 1967 CORNELIUS, F. Dupont: Movement of wood and canvas for paintings in response to high and low RH cycles. In: *Studies in Conservation* 12 (1967), Nr. 2, S. 76-80
- CUANY ET AL. 1988 CUANY, Françoise; SCHAIBLE, Volker; SCHIESSL, Ulrich: *Untersuchungen zu Kontrollmethoden der Eindringtiefe flüssiger Festigungsmittel in degradiertes Holz und ihrer hinreichenden Dosierung bei konservierenden Tränkungen*. Nationales Forschungsprogramm 16 des Schweizer Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung. Forschungsprojekt Nr. 4.697-0.83.16 Untersuchungen zur Beförderung von Erhaltungs- und Restaurierungsverfahren an Dekorationsmalereien und ihrem immobilien Bildträger aus Holz. Bern, 1988
- CUANY ET AL. 1989 CUANY, Françoise; SCHAIBLE, Volker; SCHIESSL, Ulrich: Studien zur Festigung biologisch geschwächten Nadelholzes: Eindringvermögen, Stabilitätserhöhung, feuchtephysikalisches Verhalten. In: *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung* 3 (1989), Nr. 2, S. 249-292
- DAHMS 1996 DAHMS, Klaus-Günther: *Das kleine Holzlexikon*. ROTO Fachbibliothek Bd. 1. 7. Aufl. Tamm : Wegra, 1996

- DE MEIJER; MILITZ 2000 DE MEIJER, M.; MILITZ, H.: Moisture transport in coated wood. Part 1: Analysis of sorption rates and moisture content profiles in spruce during liquid water uptake. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 58 (2000), Nr. 5, S. 354-362
- DE MEIJER; MILITZ 2001 DE MEIJER, M.; MILITZ, H.: Moisture transport in coated wood. Part 2: Influence of coating type, film thickness, wood species, temperature and moisture gradient on kinetics of sorption and dimensional change. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 58 (2001), Nr. 6, S. 467-475
- DENIG ET AL. 2000 DENIG, Joseph; WENGERT, Eugene M.; SIMPSON, William T.: *Drying hardwood lumber : General Technical Report FPL-GTR-118*. Madison : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2000  
<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/FPLGTR/fplgtr118.pdf> (26.01.2004)
- DEPPE; RÜHL 1993 DEPPE, H.-J.; RÜHL, H.: Zur Beurteilung alter Bauhölzer : 1. Rohdichte und Druckfestigkeit. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 51 (1993), S. 379-383
- DIN 1422-1 Norm DIN 1422-1 : 1983-02. *Veröffentlichungen aus Wissenschaft, Technik, Wirtschaft und Verwaltung – Gestaltung von Manuskripten und Typoskripten*
- DIN 1505-2 Norm DIN 1505-2 : 1984-01. *Titelangaben von Dokumenten – Zitierregeln*
- DIN 4074-1 DIN 4074-1 : 2003-06. *Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Nadelschnittholz*
- DIN 4074-5 DIN 4074-5 : 2003-06. *Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Laubschnittholz*
- DIN 50 010-2 Norm DIN 50010-2 : 1981-08. *Klimate und ihre technische Anwendung – Klimabegriffe, Physikalische Begriffe*
- DIN 50 014 Norm DIN 50014 : 1985-07. *Klimate und ihre technische Anwendung – Normalklimate*
- DIN 52181 DIN 52181 : 1975-08. *Bestimmung der Wuchseigenschaften von Nadelschnittholz*

- DIN 52 182 Norm DIN 52 182 : 1976-09. *Prüfung von Holz – Bestimmung der Rohdichte*
- DIN 52 183 Norm DIN 52 183 : 1977-11. *Prüfung von Holz – Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes*
- DIN 52 184 Norm DIN 52 184 : 1979-03. *Prüfung von Holz – Bestimmung der Quellung und Schwindung*
- DIN 52 185 Norm DIN 52 185 : 1976-09. *Prüfung von Holz – Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser*
- DIN 52 186 Norm DIN 52 186 : 1978-06. *Prüfung von Holz – Biegeversuch*
- DIN 52 187 Norm DIN 52 187 : 1979-05. *Prüfung von Holz – Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung*
- DIN 52 188 Norm DIN 52 188 : 1979-05. *Prüfung von Holz – Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zur Faser*
- DIN 52 192 Norm DIN 52 192 : 1979-05. *Prüfung von Holz – Druckversuch quer zur Faserrichtung*
- DIN 68 100 Norm DIN 68 100 : 1984-12. *Toleranzsystem für Holzbe- und -verarbeitung – Begriffe, Toleranzreihen, Schwind- und Quellmaße*
- DIN 68 364 Norm DIN 68 364 : 2003-05. *Kennwerte von Holzarten – Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten*
- DIN EN 844-4 Norm DIN EN 844-4 : 1997-08. *Rund- und Schnittholz – Terminologie – Teil 4: Begriffe zum Feuchtegehalt*
- DIN EN 1193 Norm DIN EN 1193 : 1998-06. *Holzbauwerke – Bestimmung der Scherfestigkeit und der mechanischen Eigenschaften rechtwinklig zur Faserrichtung*
- DIN EN ISO 9346 Norm DIN EN ISO 9346 : 1996-08. *Wärmeschutz – Stofftransport – Physikalische Größen und Definitionen*
- DIN EN ISO 12572 Norm DIN EN ISO 12572 : 2001-09. *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit*

- DIN V 33 901 Norm DIN V 33 901 : 2001-02. *Information und Dokumentation – Anforderungen an die Aufbewahrung von Archiv- und Bibliotheksgut*
- DREINER 1997 DREINER, Klaus: Untersuchungen zur Reduzierung klimabedingter Belastungen für das Aschaffener Tafelbild. In: EMMERLING, Erwin; RINGER, Cornelia (Hrsg.): *Das Aschaffener Tafelbild : Studien zur Tafelmalerei des 13. Jahrhunderts*. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege Bd. 89. München : Lipp, 1997, S. 283-291
- DREINER ET AL. 1996 DREINER, Klaus; KLEIN, Peter; ZILICH, Isabel: Investigation into the deformations of panel paintings. In: *ICOM Preprints, 11th Triennial Meeting, Edinburgh, Scotland, 1-6 September 1996*. Bd. 1. London : James & James, 1996, S. 268-270
- ELOVITZ 1999 ELOVITZ, Kenneth M.: Understanding what humidity does and why. In: *ASHRAE Journal* (1999), April, S. 84-90
- ERHARDT ET AL. 1995 ERHARDT, David; McCORMICK-GOODHART, Mark; MECKLENBURG, Marion F.; TUMOSA, Charles S.: The Determination of Allowable RH Fluctuations. In: *WAAC Newsletter* (1995), Nr. 1, S. 19-23
- ERHARDT ET AL. 1996 ERHARDT, David; MECKLENBURG, Marion F.; TUMOSA, Charles S.: New vs Old Wood: Differences and Similarities in Physical, Mechanical, and Chemical Properties. In: *ICOM Preprints, 11th Triennial Meeting, Edinburgh, Scotland, 1-6 September 1996*. Bd. 2. London : James & James, 1996, S. 903-910
- ERHARDT; MECKLENBURG 1994 ERHARDT, David; MECKLENBURG, Marion F.: Relative humidity re-examined. In: ROY, Ashok; SMITH, Perry (Hrsg.): *Preventive conservation: practice, theory and research (Preprints of the contributions to the Ottawa Congress, 12-16 September 1994)*. London : International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, 1994, S. 32-39

- ERIKSSON; NORÉN 1965 ERIKSSON, Lennart; NORÉN, Bengt: Der Einfluß von Feuchtigkeitsänderungen auf die Verformung von Holz bei Zug in Faserrichtung. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 23 (1965), Nr. 5, S. 201-209
- FORTUIN 2003 FORTUIN, Georg: *Anwendung mathematischer Modelle zur Beschreibung der technischen Konvektionstrocknung von Schnittholz*. Hamburg, Universität Hamburg, Fachbereich Biologie, Diss., 2003  
urn:nbn:de:gbv:18-11229  
<http://www.sub.uni-hamburg.de/opus/volltexte/2004/1122/pdf/dissertation.pdf>  
(07.03.2004)
- GIBSON 1965 GIBSON, E. J.: Creep of wood: Role of Water and Effect of a Changing Moisture Content. In: *nature* 206 (1965), Nr. 4980, S. 213-215
- GLOS 1989a GLOS, P.: Festigkeit von Fichten-Bauholz mit Insekten- und Pilzbefall : Biegefestigkeit. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 47 (1989), S. 329-335
- GLOS 1989b GLOS, P.: Festigkeit von Fichten-Bauholz mit Insekten- und Pilzbefall : Druck- und Zugfestigkeit. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 47 (1989), S. 365-371
- GÖRLACHER 1987 GÖRLACHER, Rainer: Zerstörungsfreie Prüfung von Holz: Ein 'in situ'-Verfahren zur Bestimmung der Rohdichte. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 45 (1987), S. 273-278
- GÖRLACHER 1991 GÖRLACHER, Rainer: Untersuchung von altem Konstruktionsholz : Bestimmung des Elastizitätsmoduls. In: *Bauen mit Holz : Organ des Bundes Deutscher Zimmerermeister im Zentralverband des Deutschen Baugewerbes* 93 (1991), Nr. 8, S. 582-587
- GRESSEL 1984 GRESSEL, Peter: Kriechverhalten von Holz und Holzwerkstoffen. In: *Bauen mit Holz : Organ des Bundes Deutscher Zimmerermeister im Zentralverband des Deutschen Baugewerbes* 86 (1984), Nr. 4, S. 216-223

- GROSSER 1977 GROSSER, Dietger: *Die Hölzer Mitteleuropas : Ein mikrophotographischer Lehratlas*. Berlin : Springer, 1977
- HANSEN ET AL. 1992 HANSEN, Eric F.; LEE, Steve N.; SOBEL, Harry: The effects of relative humidity on some physical properties of modern vellum : implications for the optimum relative humidity for the display and storage of parchment. In: *Journal of the American Institute for Conservation* 31 (1992), Nr. 3, S. 325-342
- HARRIS; MEYLAN 1965 HARRIS, J. Maddern; MEYLAN, B. A.: The influence of microfibril angle on longitudinal and tangential shrinkage in pinus radiata. In: *Holzforschung* 19 (1965), Nr. 5, S. 144-153
- HEDLEY 1988 HEDLEY, Gerry: Relative humidity and the stress/strain response of canvas paintings : Uniaxial measurements of naturally aged samples. In: *Studies in Conservation* 33 (1988), S. 133-148
- HELNWEIN ET AL. 2000 HELNWEIN, Peter; HANHIJÄRVI, Antti; EBERHARDSTEINER, Josef: *Long-term behavior of wood under multiaxial states of stress and simulation of structural details*. Proceedings of the World Conference on Timber Engineering, Whistler Resort, British Columbia, Canada, July 31 - August 3, 2000  
<http://timber.ce.wsu.edu/Resources/papers/8-5-1.pdf> (07.01.2004)
- HENNE 1995 HENNE, Erich: *Luftbefeuchtung*. 4. Aufl. München : Oldenbourg, 1995
- HOADLEY 1978 HOADLEY, R. Bruce: The dimensional response of wood to variation in relative humidity. In: *Conservation of wood in painting and the decorative arts (Preprints of the contributions to the Oxford congress, 17 - 23 September 1978)*. London : International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, 1978, S. 1-6
- HOADLEY 1990 HOADLEY, R. Bruce: *Holz als Werkstoff*. Ravensburger Holzwerkstatt Bd. 1. Ravensburg : Maier, 1990

- HOADLEY 1998 HOADLEY, R. Bruce: Wood as a Physical Surface for Paint Application. In: *Painted wood : history & conservation*. Los Angeles : Getty Conservation Institute, 1998, S. 2-16
- HOLMBERG 1995 HOLMBERG, Jan G.: *Relative Humidity, RH, in historic houses, museums and museum storage rooms, a literature study : EU 1383 PREVENT Preventive Conservation: Report no 1 from Swedish partners*. EUROCARE EUREKA Project EU 140. 1995
- HOLZ 1981 HOLZ, Dietrich: Zum Alterungsverhalten des Werkstoffes Holz - einige Ansichten, Untersuchungen, Ergebnisse. In: *Holztechnologie* 22 (1981), Nr. 2, S. 80-85
- HORNS 1978 HORNS, James: Induced strain in panel paintings undergoing conformational changes. In: *Conservation of wood in painting and the decorative arts (Preprints of the contributions to the Oxford congress, 17 - 23 September 1978)*. London : International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, 1978, S. 123-130
- IRB 1996 FRAUNHOFER- INFORMATIONSZENTRUM RAUM UND BAU (Hrsg.): *Querzugfestigkeit von Holz und Holzwerkstoffen : IRB-Literaturauslese plus*. IRB-Literaturdokumentation Nr. 6673, : Fraunhofer IRB-Verlag, Feb. 1996
- IRB 2003 FRAUNHOFER- INFORMATIONSZENTRUM RAUM UND BAU (Hrsg.): *Quellen und Schwinden von Holz und Holzwerkstoffen : Literaturdokumentation*. IRB-Literaturdokumentation Nr. 647, : Fraunhofer IRB-Verlag, Aug. 2003
- JERONIMIDIS 1978 JERONIMIDIS, G.: Fracture of wood and factors which influence it. In: *Conservation of wood in painting and the decorative arts (Preprints of the contributions to the Oxford congress, 17 - 23 September 1978)*. London : International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, 1978, S. 7-10
- JOHANSSON ET AL. 2001 JOHANSSON, M.; PERSTORPER, M.; KLIGER, R.; JOHANSSON, G.: Distortion of Norway spruce timber : Part 2. Modelling twist. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 59 (2001), Nr. 3, S. 155-162

- JÖNSSON 2004 JÖNSSON, Johan: Internal stresses in the cross-grain direction in glulam induced by climate variations. In: *Holzforschung* 58 (2004), Nr. 2, S. 154-159
- JÖNSSON; SVENSSON 2004 JÖNSSON, Johan; SVENSSON, Staffan: A contact free measurement method to determine internal stress states in glulam. In: *Holzforschung* 58 (2004), Nr. 2, S. 148-153
- JÖNSSON; THELANDERSSON 2003 JÖNSSON, Johan; THELANDERSSON, S.: The effect of moisture gradients on tensile strength perpendicular to grain in glulam. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 61 (2003), S. 342-348
- KARPOWICZ 1989 KARPOWICZ, Adam: In-plane Deformations of Films of Size on Paintings in the Glass Transition Region. In: *Studies in Conservation* 34 (1989), Nr.2, S. 67-74
- KEYLWERTH 1951 KEYLWERTH, Rudolf: Freie Quellung. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 20 (1962), Nr. 7, S. 252-259
- KEYLWERTH 1962a KEYLWERTH, Rudolf: Freie Quellung. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 20 (1962), Nr. 7, S. 252-259
- KEYLWERTH 1962b KEYLWERTH, Rudolf: Behinderte Quellung. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 20 (1962), Nr. 8, S. 292-303
- KEYLWERTH 1964a KEYLWERTH, Rudolf: Untersuchungen über den Quellungsverlauf und die Feuchtigkeitsabhängigkeit der Rohdichte von Hölzern. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 22 (1964), Nr. 7, S. 255-258
- KEYLWERTH 1964b KEYLWERTH, Rudolf: Parallel zur Faserrichtung behinderte Quellung. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 22 (1964), Nr. 8, S. 295-296
- KHALI; RAWAT 2000 KHALI, D. P.; RAWAT, S. P. S.: Clustering of water molecules during adsorption of water in brown rot decayed and undecayed wood blocks of *Pinus sylvestris*. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 58 (2000), Nr. 5, S. 340-341

- KIESSL 1983 KIESSL, Kurt: *Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen : Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung.* Essen, Universität-Gesamthochschule-Essen, Fachbereich Bauwesen, Diss., 1983
- KIESSL; MÖLLER 1989a KIESSL, Kurt; MÖLLER, U.: Zur Bestimmung des Feuchteverhaltens von Bauteilen aus Holz und Holzwerkstoffen : Selektion feuchtetechnischer Stoffeigenschaften. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 47 (1989), S. 317-322
- KIESSL; MÖLLER 1989b KIESSL, Kurt; MÖLLER, U.: Zur Bestimmung des Feuchteverhaltens von Bauteilen aus Holz und Holzwerkstoffen : Stoffeigenschaftsfunktionen und deren rechnerische Anwendung. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 47 (1989), S. 359-363
- KLEIN; BRÖKER 1990 KLEIN, Peter; BRÖKER, Friedrich-Wilhelm: Investigations on swelling and shrinkage of panels with wooden support. In: *ICOM Preprints, 9th triennial meeting, Dresden, German Democratic Republic, 26-31 August 1990.* Bd. 1. Paris : ICOM Committee for Conservation, 1990, S. 41-43
- KLIGER ET AL. 2003 KLIGER, R.; JOHANSSON, M.; PERSTORPER, M.; JOHANSSON, G.: Distortion of Norway spruce timber : Part 3: Modelling bow and spring. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 61 (2003), Nr. 4, S. 241-250
- KLUMMER 1981 KLUMMER, Gottfried: Klimafaktoren in geschlossenen Räumen. In: *Restauratorenblätter* 5 (1981), S. 66-78
- KNIGHT 2002 KNIGHT, Barry: Predicting the unpredictable: how does the museum environment fluctuate?. In: *ICOM Preprints, 13th Triennial Meeting, Rio de Janeiro, 22-27 September 2002.* London : James & James, 2002, S. 45-50
- KOC ET AL. 2003 KOC, Pino.; HOUŠKA, Mladen; ŠTOK, Boris: Computer Aided Identification of the Moisture Transport Parameters in Spruce Wood. In: *Holzforschung* 57 (2003), S. 533-538

- KOC; HOUŠKA 2002 KOC, Pino.; HOUŠKA, Mladen: Characterization of the sorptive properties of spruce wood by the Inverse Identification Method. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 60 (2002), S. 265-270
- KOLLMANN 1951 KOLLMANN, Franz F. P.: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Bd. 1. 2. Aufl. Berlin : Springer, 1951
- KOLLMANN 1955 KOLLMANN, Franz F. P.: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Bd. 2. 2. Aufl. Berlin : Springer, 1955
- KOLLMANN 1967 KOLLMANN, Franz F. P.: *Verformung und Bruchgeschehen bei Holz als einem anisotropen, inhomogenen, porigen Festkörper*. VDI-Forschungsheft Nr. 520, Düsseldorf : VDI-Verlag, 1967
- KOLLMANN 1982 KOLLMANN, Franz F. P.: Volumenschwindung von Holz und Rohdichteinfluß, Ursachen von Ausreißern. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 40 (1982), S. 429-432
- KOLLMANN ET AL. 1961 KOLLMANN, Franz F. P.; SCHNEIDER, Adolf; TEICHGRÄBER, R.: Untersuchungen über die Erwärmung, Verwölbung und Trocknung hölzerner Bildtafeln bei starker Beleuchtung. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 19 (1961), Nr. 2, S. 41-47
- KOLLMANN ET AL. 1966 KOLLMANN, Franz F. P.; SCHNEIDER, Adolf; SERRAND, Willibald: *Untersuchungen über den Einfluß der Abmessungen und von Feuchtigkeitsschutzbehandlungen von Holzteilen auf die Geschwindigkeit der Feuchtigkeitsveränderungen im Konstantklima und auf die Feuchtigkeitschwankungen im natürlichen Wechselklima*. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 1647, Köln : Westdeutscher Verlag, 1966
- KOLLMANN; CÔTÉ 1968 KOLLMANN, FRANZ F. P.; CÔTÉ, Wilfred A., Jr.: *Principles of Wood Science and Technology : Solid Wood*. Bd. 1. Berlin : Springer, 1968

- KOLLMANN; SCHNEIDER 1964 KOLLMANN, Franz F. P.; SCHNEIDER, Adolf: *Untersuchungen über den Einfluß von Wärmebehandlungen im Temperaturbereich bis 200°C und von Wasserlagerung bis 10°C auf wichtige physikalisch-chemische Eigenschaften des Holzes*. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 1399, Köln : Westdeutscher Verlag, 1964
- KRISCHER 1963 KRISCHER, Otto: *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*. Bd. 1. 2. Aufl. Berlin : Springer, 1963
- KRISCHER 1992 KRISCHER, Otto: *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*. Bd. 1. 3. Aufl. Berlin : Springer, 1992
- KÜRSCHNER 1964 KÜRSCHNER, K.: Betrachtungen zum gegenwärtigen Stand der chemischen Holzforschung. In: *Holzforschung* 18 (1964), Nr. 3, S. 67-76
- LAM ET AL. 2003 LAM, F.; ABAYAKOON, S.; SVENSSON, Staffan; GYAMFI, C.: Influence of proof loading on the reliability of members. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 61 (2003), Nr. 6, S. 432-438
- LEGRUM 1992 LEGRUM, Jürgen: *Untersuchungen über das Temperaturverhalten von Holztafelbildern*. Bericht Nr. 2, Wiesbaden : Institut für Steinkonservierung, 1992
- LEGRUM 1994 LEGRUM, Jürgen: Ambient atmospheric conditions as a significant factor in the conservation of an altarpiece by Konrad von Soest in its original location. In: ROY, Ashok; SMITH, Perry (Hrsg.): *Preventive conservation: practice, theory and research (Preprints of the contributions to the Ottawa Congress, 12-16 September 1994)*. London : International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, 1994, S. 104-109
- LOESCHER 1994 LOESCHER, Johannes: Vom Reißen des Holzes - Schadensbilder, Ursachen, Reparatur- und Konservierungsmethoden an Musikinstrumenten. In: *Arbeitsblätter für Restauratoren : Gruppe 13 : Musikinstrumente* (1994 ), Nr. 2, S. 154-159

- LÜHMANN; NIEMZ 1993 LÜHMANN, A.; NIEMZ, Peter: Untersuchungen zu Bruchkriterium und mechano-sorptivem Kriechen bei der Holz Trocknung. In: *Holzforschung und Holzverwertung* 45 (1993), Nr. 6, S. 109-112
- LULL 1995 LULL, William P.: Further Comments on Climate Control Guidelines. In: *WAAC Newsletter* 17 (1995), Nr. 1, S. 26-28
- MATEJAK 1983 MATEJAK, M.: Primäre Sorptionsisothermen von Holz. In: *Holzforschung und Holzverwertung* 35 (1983), Nr. 1, S. 1-6
- MARTENSSON 1992 MARTENSSON, Annika: *Mechanical behaviour of wood exposed to humidity variations*. Report TVBK Nr. 1006, Lund : Lund Institute of Technology, Department of Structural Engineering, Diss., 1992
- McCRADY 1994 McCRADY, Ellen: Temperature & RH Guidelines Challenged by Smithsonian. In: *Abbey Newsletter* 18(1994), Nr. 4, S. 44-45
- MECKLENBURG 1991 MECKLENBURG, Marion F.: Some mechanical and Physical properties of Gilding Gesso. In: *Gilded Wood : Conservation and History*. Madison : Sound View Press, 1991, S. 163-170
- MECKLENBURG ET AL. 1994 MECKLENBURG, Marion F.; McCORMICK-GOODHART, Mark; TUMOSA, Charles S.: Investigation into the Deterioration of Paintings and Photographs using Computerized Modeling of Stress Development. In: *Journal of the American Institute for Conservation* 33 (1994), Nr. 2, S. 153-170
- MECKLENBURG ET AL. 1998 MECKLENBURG, Marion F.; TUMOSA, Charles S.; ERHARDT, David: Structural Response of Wood Panel Paintings to Changes in Ambient Relative Humidity. In: *Painted wood : history & conservation*. Los Angeles : Getty Conservation Institute, 1998, S. 464-483
- MECKLENBURG; TUMOSA 1991 MECKLENBURG, Marion F.; TUMOSA, Charles S.: Mechanical behavior of paintings subjected to changes in temperature and relative humidity. In: MECKLENBURG, Marion F. (Hrsg.): *Art in Transit : Studies in the Transport of Paintings*. Washington : National Gallery of Art, 1991, S. 173-216

- MECKLENBURG; TUMOSA 1999 MECKLENBURG, Marion F.; TUMOSA, Charles S.: Temperature and relative humidity effects on the mechanical and chemical stability of collections. In: *ASHRAE Journal* (1999), April, S. 77-82
- MICHALSKI 1991a MICHALSKI, Stefan: Crack Mechanisms in Gilding. In: *Gilded Wood : Conservation and History*. : Sound View Press, 1991, S. 171-181
- MICHALSKI 1991b MICHALSKI, Stefan: Paintings - their response to temperature, relative Humidity, shock and vibration. In: MECKLENBURG, Marion F. (Hrsg.): *Art in Transit : Studies in the Transport of Paintings*. Washington : National Gallery of Art, 1991, S. 223-248
- MICHALSKI 1993 MICHALSKI, Stefan: Relative Humidity: A Discussion of Correcht/Incorrect Values. In: *ICOM Preprints, 10th Triennial Meeting, Washington, DC, USA, 22-27 August 1993*. Bd. 2. Paris : James & James, 1993, S. 624-629
- MICHALSKI 1994 MICHALSKI, Stefan: Relative Humidity and Temperature Gudielines: What's Happening?. In: *CCI Newsletter*. Nr. 14, Sep. 1994, S. 6-8
- MICHALSKI 1999 MICHALSKI, Stefan: Setting Standards for Conservation: New Temperature and Relative Humidity Guidelines Are Now Published. In: *CCI Newsletter* (1999), Nr. 24, S. 3-4
- MOHAGER; TORATTI 1993 MOHAGER, S.; TORATTI, Tomi: Long term bending creep of wood in cyclic relative humidity. In: *Wood Science and Technology* 27 (1993), Nr. 1, S. 49-59
- MOLIŃSKI; RACZKOWSKI 1988 MOLIŃSKI, W.; RACZKOWSKI, J.: Creep of wood in bending and non-symmetrical moistening. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 46 (1988), S. 457-460
- MÜHLE 1992 MÜHLE, Peter: *Wörterbuch der Holzwirtschaft : Dictionary of wood science and technology*. 1. Aufl. Wiesbaden : Brandstetter, 1992

- MÜLLER 2001 MÜLLER, Birgit: Unruhige Raumluft, schwankende Temperatur, schlingernde Feuchte : oder: Wie man problematische Klimaverhältnisse stabilisiert. In: JOHN, Hartmut; KOPP-SIEVERS, Susanne (Hrsg.): *Sicherheit für Kulturgut! : innovative Entwicklungen und Verfahren, neue Konzepte und Strategien*. Publikationen der Abteilung Museumsberatung Nr. 13, Bielefeld : transcript Verlag, 2001, S. 71-89
- MÜLLER ET AL. 2003 MÜLLER, Ulrich; JOŠČÁK, T.; TEISCHINGER, Alfred: Strength of dried and re-moistened spruce wood compared to native wood. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 61 (2003), S. 439-443
- NAVI ET AL. 2002 NAVI, P.; PITTET, V.; PLUMMER, C. J. G.: Transient moisture effects on wood creep. In: *Wood Science and Technology* 36 (2002), Nr. 6, S. 447-462
- NEGI 1999 NEGI, A.: Turbulence in the wood system with small and short stresses. In: *Wood Science and Technology* 33 (1999), Nr. 3, S. 209-214
- NIEMZ 1993 NIEMZ, Peter: *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Leinfelden-Echterdingen : DRW, 1993
- NIEMZ 1997 NIEMZ, Peter: Ermittlung von Eigenspannungen in Holz und Holzwerkstoffen. In: *Holz-Zentralblatt* 123 (1997), Nr. 5, S. 84, 86
- NIEMZ ET AL. 2003 HÄUPL, P.; NIEMZ, Peter; PETZOLD, H.: Untersuchungen zur Messung und Simulation der Feuchteänderung von dreischichtigen Massivholzplatten bei Klimawechsel. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 61 (2003), S. 8-12
- ÖRV 1998 ÖSTERREICHISCHER RESTAURATORENVERBAND (Hrsg.): *Konservieren Restaurieren : Mitteilungen des Österreichischen Restauratorenverbandes*. Wien, 1998
- PADFIELD 1999 PADFIELD, Tim: *The role of absorbent materials in moderating changes of relative humidity*. Series R no. 54. Lyngby, The Technical University of Denmark, Department of Structural Engineering and Materials, Diss., 1999  
[http://www.natmus.dk/cons/tp/phd/tp\\_phd.pdf](http://www.natmus.dk/cons/tp/phd/tp_phd.pdf) (29.12.2003)

- PANG; WIBERG 1998 PANG, S.; WIBERG, P.: Model predicted and CT scanned moisture distribution in a *Pinus radiata* board during drying. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 56 (1998), S. 9-14
- PERKITNY 1965 PERKITNY, Tadeusz: Über Wechselbeziehungen zwischen Sorption, Desorption und Rheologie von Holz. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 23 (1965), Nr. 5, S. 173-182
- PERSTORPER ET AL. 2001 PERSTORPER, M.; JOHANSSON, M.; KLIGER, R.; JOHANSSON, G.: Distortion of Norway spruce timber : Part 1. Variation of relevant wood properties. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 59 (2001), Nr. 1-2, S. 94-103
- REAL 1995 REAL, William A.: Some Thoughts on the Recent CAL Press Release on Climate Control for Cultural Collections. In: *WAAC Newsletter* 17 (1995), Nr. 1, S. 24-26
- REES-JONES 1978 REES-JONES, Stephen G.: Calculations on the response of wood to moisture. In: *Conservation of wood in painting and the decorative arts (Preprints of the contributions to the Oxford congress, 17 - 23 September 1978)*. London : International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, 1978, S. 137-139
- RICHARD 1978 RICHARD, Mervin: Factors affecting the dimensional responses of wood. In: *Conservation of wood in painting and the decorative arts (Preprints of the contributions to the Oxford congress, 17 - 23 September 1978)*. London : International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, 1978, S. 131-135
- RIJSDIJK; LAMING 1994 RIJSDIJK, Jan F.; LAMING, Peter B.: *Physical and related properties of 145 timbers : information for practice*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers , 1994
- ROSENKILDE ET AL. 2004 ROSENKILDE, Anders; GORCE, Jean-Philippe; BARRY, Amanda: Measurement of moisture content profiles during drying of Scots pine using magnetic resonance imaging. In: *Holzforschung* 58 (2004), Nr. 2, S. 138-142

- RUG; SEEMANN 1989 RUG, Wolfgang; SEEMANN, Axel: Ermittlung von Festigkeitskennwerten an alten Holzkonstruktionen. In: *Holztechnologie* 30 (1989), Nr. 2, S. 69-73
- SALIN 2003 SALIN, Jarl-Gunnar: A Theoretical Analysis of Timber Drying in Oscillating Climates. In: *Holzforschung* 57 (2003), Nr. 4, S. 427-432
- SANDERMANN; SCHMITZ 1966 SANDERMANN, Wilhelm; SCHMITZ, Günter: Versuche zur Identifizierung von Holzarten mit chemischen und physikalisch-chemischen Schnelltesten. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 24 (1966), Nr. 10, S. 498-502
- SAUNDERS 1997 SAUNDERS, David: Who needs Class 1 Museums?. In: *IIC Bulletin* (1997), Nr. 2, S. 3-6
- SCHAIBLE 1987 SCHAIBLE, Volker: Neue Überlegungen zur Feuchtigkeit am Leinwandbild. In: *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung* 1 (1987), Nr. 1, S. 75-94
- SCHAIBLE 1990 SCHAIBLE, Volker: Überlegungen zum Phänomen der Schüsselbildung an Leinwandgemälden. In: *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung* 4 (1990), Nr. 2, S. 235-250
- SCHIESSL 1995 SCHIESSL, Ulrich: Festigkeitserhöhende Konservierung von Holz. In: PETZET, Michael (Hrsg.): *Holzschutz, Holzfestigung, Holzergänzung*. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege Bd. 73. München : Lipp, 1995, S. 15-27
- SCHILLING; GINELL 1993 SCHILLING, MICHAEL R.; GINELL, William S.: The Effects of Relative Humidity Changes on Dead Sea Scrolls Parchment Samples. In: *ICOM Preprints, 10th Triennial Meeting, Washington, DC, USA, 22-27 August 1993*. Bd. 1. Paris : James & James, 1993, S. 50-56
- SCHNEIDER 1975 SCHNEIDER, Adolf: Zur Asymmetrie der Wasserdampfdurchlässigkeit einseitig angestrichenen Holzes. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 33 (1975), S. 427-433

- SCHNIEWIND 1960 SCHNIEWIND, Arno P.: On the Nature of Drying Stresses in Wood. In: *Holzforschung* 14 (1960), Nr. 6, S. 161-168
- SCHNIEWIND 1966 SCHNIEWIND, Arno P.: Über den Einfluß von Feuchtigkeitsänderungen auf das Kriechen von Buchenholz quer zur Faser unter Berücksichtigung von Temperatur und Temperaturänderungen. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 24 (1966), Nr. 3, S. 87-98
- SCHNIEWIND 1990 SCHNIEWIND, Arno P.: Solvent and moisture effects in deteriorated wood consolidated with soluble resins. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 48 (1990), S. 11-14
- SCHÖNE 1989 SCHÖNE, Werner: Einige Grundlagen der zerstörungsfreien Prüfung von Brettschichtholz. In: *Holztechnologie* 30 (1989), Nr. 2, S. 65-69
- SCHULTZ 1995 SCHULTZ, William: CAL scientists revise guidelines for museum climate control. In: *WAAC Newsletter* 17 (1995), Nr. 1, S. 23-24
- SCHULTZE-DEWITZ 1966 SCHULTZE-DEWITZ, Günter: Beziehungen zwischen der Elastizität und der statischen sowie dynamischen Biegefestigkeit von Kiefernholz nach dem Angriff durch echte holzerstörende Pilze. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 24 (1966), Nr. 10, S. 506-512
- SCHULZ ET AL. 1984 SCHULZ, H.; VON AUFSESS, H.; VERRON, T.: Eigenschaften eines Fichtenbalkens aus altem Dachstuhl. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 42 (1984), S. 109
- SCHWAB 1992 SCHWAB, Ernst: Geschwindigkeit der Feuchteaufnahme von Holz. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 50 (1992), S. 312
- SCHWAB; KLEIN 1989 KLEIN, Peter; SCHWAB, Ernst: Zum Verständnis des Quell- und Schwindverhaltens von Holz und Holzwerkstoffen. In: *Restauratorenblätter* 19 (1989), S. 15-28
- SCHWARZ 1990 SCHWARZ, Andreas: Infrarot-thermographische Dichte- und Feuchtedifferenzmessung an bemalten Holztafeln. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 48 (1990), S. 36

- SCHWARZ 1992 SCHWARZ, Andreas: Das Klima eines unbeheizten historischen Raums : Untersuchungsergebnisse aus der Celler Schloßkapelle. In: *Restauro : Zeitschrift für Kunsttechniken, Restaurierung und Museumsfragen* (1992), Nr. 5, S. 314-317
- SCHWARZ; GADESMANN 1994 SCHWARZ, Andreas; GADESMANN, Detlev: Holzfeuchtemessungen an Tafelgemälden : Untersuchungsergebnisse aus der Celler Schloßkapelle (Teil 2). In: *Restauro : Zeitschrift für Kunsttechniken, Restaurierung und Museumsfragen* (1994), Nr. 4, S. 256-261
- SEGERS-GLOCKE 1995 SEGERS-GLOCKE, Christiane (Hrsg.): *Holz in der restauratorisch denkmalpflegerischen Praxis : 2. Fortbildungsveranstaltung für Restauratoren am 11. März 1994 in Hannover*. Materialien zur Fort- und Weiterbildung Nr. 2, Hannover : Niedersächsisches Landesverwaltungsamt, 1995
- SIAU 1995 SIAU, John Finn: *Wood : Influence of moisture on physical properties*. : Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1995
- SIMPSON 1991 SIMPSON, William T. (Hrsg.): *Dry kiln operator's manual*. Agriculture Handbook Nr. 188, Madison : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1991  
<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/usda/ah188/ah188.htm> (26.01.2004)
- SKAAR 1988 SKAAR, Christen: *Wood-water relations*. Springer series in wood science Berlin : Springer, 1988
- SPENGLER 1988 SPENGLER, Robert: *Herleitung von Kenngrößen zum anisotrop-elastischen Materialverhalten von Nadelholz aus submikroskopischen Strukturmerkmalen*. München, Technische Universität München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Institut für Bauingenieurwesen II - Baukonstruktion und Holzbau, Diss., 1988

- STRAUB 1968 STRAUB, Rolf E.: Das Problem des verwölbten Holztafelbildes. In: *Nachrichtenblatt der Denkmalpflege in Baden-Württemberg* (1968 ), Nr. 3, S. 71-77
- SVENSSON 1997 SVENSSON, Staffan: *Internal stress in wood caused by climate variations*. Report TVBK Nr. 1013. Lund : Lund Institute of Technology, Department of Structural Engineering, Diss., 1997
- SVENSSON; MÄRTENSSON 1999 SVENSSON, STAFFAN; MÄRTENSSON, Annika: Simulation of drying stresses in wood : Part I: comparison between one- and two-dimensional models. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 57 (1999), Nr. 2, S. 129-136
- SVENSSON; MÄRTENSSON 2002 SVENSSON, Staffan; MÄRTENSSON, Annika: Simulation of drying stresses in wood : Part II. Convective air drying of sawn timber. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 60 (2002), Nr. 1, S. 72-80
- SVENSSON; THELANDERSSON 2003 SVENSSON, Staffan; THELANDERSSON, S.: Aspects on reliability calibration of safety factors for timber structures. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 61 (2003), Nr. 5, S. 336-341
- SVENSSON; TORATTI 2002 SVENSSON, Staffan; TORATTI, Tomi: Mechanical response of wood perpendicular to grain when subjected to changes of humidity. In: *Wood Science and Technology* 36 (1992), Nr. 2, S. 145-156  
ebenfalls in SVENSSON (1997, S. 65-78)
- TEISCHINGER 1991 TEISCHINGER, Alfred: Der Einfluß des Trocknungsverfahrens auf ausgewählte Holzkennwerte, Teil 1 : Literaturübersicht. In: *Holzforschung und Holzverwertung* 43 (1991), Nr. 1, S. 20-22
- TEISCHINGER 1992 TEISCHINGER, Alfred: Der Einfluß des Trocknungsverfahrens auf ausgewählte Holzkennwerte, Teil 2. In: *Holzforschung und Holzverwertung* 44 (1992), Nr. 6, S. 83-85
- THOMSON 1981 THOMSON, Garry: *The museum environment*. The Butterworth series on conservation in the arts, archeology and architecture 2. Aufl. London : Butterworths, 1981

- TIME 1998 TIME, Berit: *Hygroscopic Moisture Transport in Wood*. Trondheim, Norwegian University of Science and Technology, Department of Building and Construction Engineering, Diss., 1998
- TIME 2002a TIME, Berit: Studies on hygroscopic moisture transport in Norway spruce (*Picea abies*) : Part 1: Sorption measurements of spruce exposed to cyclic step changes in relative humidity. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 60 (2002), S. 271-276
- TIME 2002b TIME, Berit: Studies on hygroscopic moisture transport in Norway spruce (*Picea abies*) : Part 2: Modelling of transient moisture transport and hysteresis in wood. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 60 (2002), S. 405-410
- TOISHI 1963 TOISHI, Kenzo: Relative humidity in a closed package. In: THOMSON, Garry (Hrsg.): *Recent advances in Conservation : Contributions to the IIC Rome Conference, 1961*. London : Butterworths, 1963, S. 21-26
- TORATTI; SVENSSON 2000 TORATTI, Tomi; SVENSSON, Staffan: Mechano-sorptive experiments perpendicular to grain under tensile and compressive loads. In: *Wood Science and Technology* 34 (2000), Nr. 4, S. 312-326  
ebenfalls in SVENSSON (1997, S. 53-64)
- TRENDELENBURG 1955 TRENDELENBURG, Reinhard: *Das Holz als Rohstoff*. 2. Aufl. München : Hanser, 1955
- TUMOSA ET AL. 1996 TUMOSA, Charles S.; MECKLENBURG, Marion F.; ERHARDT, David; McCORMICK-GOODHART, Mark: A Discussion of Research on the Effects of Temperature and Relative Humidity on Museum Objects. In: *WAAC Newsletter* 18 (1996), Nr. 3, S. 19-20
- UNGER 1990 UNGER, Achim: *Holzkonservierung : Schutz und Festigung von Holzobjekten*. 2. Aufl. München : Callwey, 1990

- UNGER ET AL. 2001 UNGER, Achim; SCHNIEWIND, Arno P.; UNGER, Wibke: *Conservation of Wood Artifacts : with 69 figures and 5 tables*. Natural Science in Archaeology. Berlin : Springer, 2001
- VANEK 1991 VANEK, M.: Kontinuierliche Ermittlung von Trocknungsspannungen mittels Biegemomentmessung. In: *Holzforschung und Holzverwertung* 43 (1991), Nr. 1, S. 22-25
- VORREITER 1949 VORREITER, Leopold: *Holztechnologisches Handbuch*. Bd. 1. Wien : Georg Fromme & Co., 1949
- WADSÖ 1993a WADSÖ, Lars: Measurements of water vapour sorption in Wood : Part 1. Instrumentation. In: *Wood Science and Technology* 27 (1993), S. 396-400
- WADSÖ 1993b WADSÖ, Lars: Measurements of water vapour sorption in wood : Part 2. Results. In: *Wood Science and Technology* 28 (1993), Nr. 1, S. 59-65
- WADSÖ 1993c WADSÖ, Lars: *Studies of Water Vapour Transport and Sorption in wood*. Lund, Lund University, Division of Building Materials, Diss., 1993
- WEINTRAUB 1996 WEINTRAUB, Steven: Revisiting the RH Battlefield: Analysis of Risk and Cost. In: *WAAC Newsletter* 18 (1996), Nr. 3, S. 22-23
- WELLING 1987 WELLING, Johannes: *Die Erfassung von Trocknungsspannungen während der Kammertrocknung von Schnittholz*. Hamburg, Universität Hamburg, Diss., 1987
- WELLING 1988 WELLING, Johannes: Die modellmäßige Erfassung von Trocknungsspannungen während der Kammertrocknung von Schnittholz. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 46 (1988), S. 295-300

- WELLING ET AL. 1989 WELLING, Johannes; BRÖKER, Friedrich-Wilhelm; SOFF, P.: *Einfluß trocknungsbedingter Verschalung auf die Querkzugfestigkeit von Leimholz-Lamellen aus Fichte : Abschlußbericht für den Versuchszeitraum 1988/1989*. Stuttgart : IRB-Verlag, 1989
- WELLING ET AL. 2003 WELLING, Johannes; RIEHL, Torsten; KRUSE, Kai; ROSE, Björn: *Verbesserte Schnittholztrocknung im Frischluft-/Ablufttrockner durch Wechselklima*. Abschlussbericht AiF Vorhaben 11401 N aus 2000. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg, 2003  
[http://www.bfah.de/bibl/pdf/vi\\_03\\_1.pdf](http://www.bfah.de/bibl/pdf/vi_03_1.pdf) (31.12.2003)
- WELLING; FORTUIN 1989 WELLING, Johannes; FORTUIN, Georg: Überprüfung berechneter Trocknungsspannungs-Verteilungen durch einen experimentellen quantitativen Spannungsnachweis. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 47 (1989), S. 243-247
- WELLING; RIEHL 2002 WELLING, Johannes; RIEHL, Torsten: Schnittholztrocknung im Wechselklima. In: *HOB : Die Holzbearbeitung* (2002), Nr. 6, S. 44-46
- WOOD HANDBOOK 1999 FOREST PRODUCTS LABORATORY (Hrsg.): *Wood handbook : Wood as an engineering material. General Technical Report FPL GTR 113*. General Technical Report FPL GTR 113. Madison : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999  
<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/FPLGTR/fplgtr113/fplgtr113.htm>  
(26.01.2004)
- ZUMBÜHL 2003 ZUMBÜHL, Stefan: Proteinische Leime - Ein vertrauter Werkstoff? : Aspekte zum feuchtephysikalischen Verhalten von Gelatine. In: *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung* 17 (2003), Nr. 1, S. 95-104

## Internet

<http://mhph58.mw.tu-dresden.de> (07.03.2004)

Datenbank Holzeigenschaften, Technische Universität Dresden, Institut für Holz- und Papiertechnik, Lehrstuhl für Holz- und Faserwerkstofftechnik (HFT)

<http://www.bfafh.de/inst4/44/schluesel.htm> (09.03.2004)

Schlüssel für Fruchtkörper von Gebäudepilzen, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg, Institut für Holzbiologie und Holzschutz