

**BEITRÄGE  
ZUR  
MATERIALTHEORIE**

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Lion

---

Thomas Ranz

**Ein feuchte- und temperaturabhängiger  
anisotroper Werkstoff:  
Holz**



**Ein feuchte- und temperaturabhängiger  
anisotroper Werkstoff:  
Holz**

von

**Thomas Ranz**

Universität der Bundeswehr München  
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik  
Institut für Mechanik (LRT 4)  
Werner-Heisenberg-Weg 39  
85579 Neubiberg  
Deutschland

**Heft 2/07 der Reihe**

**Beiträge zur Materialtheorie**

**Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Lion**

**ISSN 1862-5703**



**Herausgeber:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Lion  
Universität der Bundeswehr München  
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik  
Institut für Mechanik (LRT 4)  
Werner-Heisenberg-Weg 39  
85579 Neubiberg  
Deutschland

---

Thomas Ranz:  
Ein feuchte- und temperaturabhängiger Werkstoff: Holz  
Beiträge zur Materialtheorie 02/07  
Neubiberg 2007  
**ISSN 1862-5703**

**Postanschrift des Verfassers:**

Dipl.-Ing. Thomas Ranz  
Institut für Mechanik  
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik  
Universität der Bundeswehr München  
D-85577 Neubiberg

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist unzulässig und strafbar. Insbesondere gilt dies für die Übersetzung, den Nachdruck sowie die Speicherung auf Mikrofilm, mit vergleichbaren Verfahren oder in Datenverarbeitungsanlagen.

# **Ein feuchte- und temperaturabhängiger anisotroper Werkstoff: Holz**

## **Vorwort**

Aufgrund der zunehmenden ökologischen und ökonomischen Aspekte kommt dem Werkstoff und Rohstoff Holz eine verstärkte Aufgabe zu. Die Einsetzbarkeit als Werkstoff ist sehr mannigfaltig und reicht von massivem Konstruktionsholz bis zum formgebenden Holzwerkstoff. Für meine zukünftige Forschungsarbeit wird nur natives, also gewachsenes Massivholz betrachtet.

Diese Arbeit gibt eine Einführung in den Werkstoff Holz und beschreibt sein mechanisches Verhalten. Beginnend mit dem anatomischen Aufbau in mikroskopischer und makroskopischer Form wird das Holz durch seine chemischen Bestandteile und seinen physikalischen Eigenschaften beschrieben. Dabei wird der Einfluss der Feuchtigkeit auf den Werkstoff Holz genauer betrachtet.

Das Kapitel der elastomechanischen Eigenschaften beschreibt den Übergang vom anisotropen zum orthotropen Material. Außerdem werden die Einflüsse auf die elastomechanischen Eigenschaften zusammengefasst. Die Arbeit schließt mit einer Beschreibung des rheologischen Verhaltens und gibt einen Ausblick für zukünftige Arbeiten.

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Anatomie des Holzes</b> .....	<b>2</b>
2.1	Makroskopischer Aufbau des Holzes .....	3
2.2	Mikroskopischer Aufbau des Holzes .....	4
2.2.1	Nadelhölzer .....	5
2.2.2	Laubhölzer .....	5
2.3	Submikroskopischer Aufbau des Holzes .....	6
2.3.1	Mittellamelle oder Interzellularsubstanz .....	6
2.3.2	Primäre Zellwand .....	6
2.3.3	Sekundäre Zellwand .....	6
2.3.3.1	Äußere (erste) Schicht, S1 .....	7
2.3.3.2	Mittlere (zweite) Schicht, S2 .....	7
2.3.3.3	Innere (dritte) Schicht, S3 .....	7
<b>3</b>	<b>Holzfehler</b> .....	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Chemie des Holzes</b> .....	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Physik des Holzes</b> .....	<b>8</b>
5.1	Rohdichte .....	8
5.2	Darrdichte .....	10
5.3	Reindichte .....	10
5.4	Raumdichte .....	10
5.5	Holzfeuchtigkeit .....	10
5.5.1	Holzfeuchtigkeit .....	10
5.5.2	Sorption des Holzes .....	11
5.5.2.1	Molekulare Sorption bzw. Chemosorption: .....	11
5.5.2.2	Adsorption: .....	11
5.5.2.3	Kapillarkondensation: .....	11
5.5.3	Fasersättigungsfeuchtigkeit und Fasersättigungspunkt .....	11
5.5.4	Sorptionsgleichgewicht, Hysterese .....	12
5.5.5	Möglichkeiten zur Verringerung der Hygroskopizität .....	12
<b>6</b>	<b>Stand der Holzforschung</b> .....	<b>13</b>
<b>7</b>	<b>Elastomechanische Eigenschaften von Holz</b> .....	<b>14</b>
7.1	Kontinuumsmechanische Betrachtung .....	14
7.2	Elastische Eigenschaften .....	14
7.3	Orientierung des Werkstoffes Holz .....	17
7.4	Querkontraktionszahlen von Holz .....	18
7.5	Kompressibilität von Holz .....	18
7.6	Elastische Hysterese .....	19
7.7	Bestimmung der elastischen Konstanten und Festigkeiten .....	19
7.7.1	Zugversuch .....	20
7.7.2	Druckversuch .....	20
7.7.3	Biegeversuch .....	20
7.8	Elastische Kennwerte .....	23
7.9	Dynamische Elastizitätsmodule .....	24

7.10	Abhängigkeit der elastischen Eigenschaften.....	25
7.10.1	Einfluss der Rohdichte .....	25
7.10.2	Streuung der E-Module .....	26
7.10.3	Einfluss der Ästigkeit.....	27
7.10.4	Holzfeuchtigkeit.....	27
7.10.5	Temperatur .....	28
7.11	Holzvergütung.....	29
7.11.1	Pressvollholz .....	29
7.11.2	Formvollholz.....	29
7.11.3	Metallholz.....	29
<b>8</b>	<b>Rheologisches Verhalten von Holz.....</b>	<b>30</b>
8.1	Kriechen von Holz .....	30
8.1.1	Belastungsart .....	30
8.1.2	Belastungsgrad .....	31
8.1.3	Feuchtigkeit.....	31
8.1.4	Temperatur .....	32
8.1.5	Wechselklima.....	32
8.2	Kriechen im submikroskopischen Bereich.....	33
8.3	Rheologische Werkstoffmodelle für Holz.....	34
8.3.1	Linear viskoelastisches Materialverhalten .....	34
8.3.2	Kriechen bei konstantem Klima.....	35
8.3.3	Verallgemeinertes Werkstoffmodell .....	35
8.3.4	Mechano-sorptives Kriechen.....	36
<b>9</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>38</b>
9.1	Biegekriechen.....	38
9.2	Kriechvorhersage durch Temperatur-Zeit-Beziehung .....	38
9.3	Biegekriechen an ungeleimten und geleimten Balken .....	38
9.4	Anisotrope linear viskoelastische Modelle .....	38
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>39</b>





# 1 Einleitung

Holz ist ein organischer Stoff, welcher nach seiner Verwendung und Verwertung in Werkstoff und Rohstoff eingeteilt werden kann:

## **Holz als Werkstoff:**

- Ingenieurholzbau (Leimbinder, Kreuzlagenholz, etc.)
- Leichtbauwerkstoff für Schiff- und Flugzeugbau
- Innenausbau und Möbelbau
- Musikinstrumentenbau

## **Holz als Rohstoff:**

- Holzwerkstoff (Mehrschichtplatten, Spanplatten, Faserplatten, Flüssigholz, etc.)
- Papier- und Verpackungsindustrie
- Energielieferant

Holz ist ein organisches Material, welches viele positive Eigenschaften aufweist. Diese werden nachfolgend in den verschiedenen Bereichen zusammengefasst:

## **Ökonomischer Bereich:**

Holz ist ein unbegrenzter, leicht erschließbarer und günstiger Rohstoff. Durch seine Verarbeitung vor Ort benötigt er kurze Transportwege und die erzielte Wertschöpfung bleibt regional gebunden.

## **Technischer Bereich:**

Aufgrund des günstigen Festigkeits-Masse-Verhältnisses von Holz ist dieses vorteilhaft als Konstruktionswerkstoff einsetzbar. Allerdings stellt der Werkstoff Holz, wegen seiner gewachsenen Struktur entsprechende technische Anforderungen für seine gezielte Verwertbarkeit.

In der nachfolgenden Tabelle 1-1 wird das Festigkeit/Dichte-Verhältnis von Holz im Vergleich zu anderen Werkstoffen als Reißlänge angeführt.

Tabelle 1-1: Reißlänge von verschiedenen Werkstoffen

Werkstoff	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Reißlänge [km]
Stahldraht	2450	32,0
Baustahl	360	4,7
Kupferdraht	200	2,4
Flachs	590	40,0
Zellstofffaser (Nadelholz)	440	35,0
Nadelholz	49 bis 147	11 bis 30
Laubholz	20 bis 255	7 bis 30

### **Ökologischer Bereich:**

Durch seine energieschonende Gewinnung, Verarbeitbarkeit und Rückführung in den natürlichen Kreislaufprozess ist Holz ein besonders umweltfreundlicher Werkstoff. Auch seine energetische Verwertung ist klimaschonend und macht ihn zu einem zukünftigen Wertstoff mit enormem Potential.

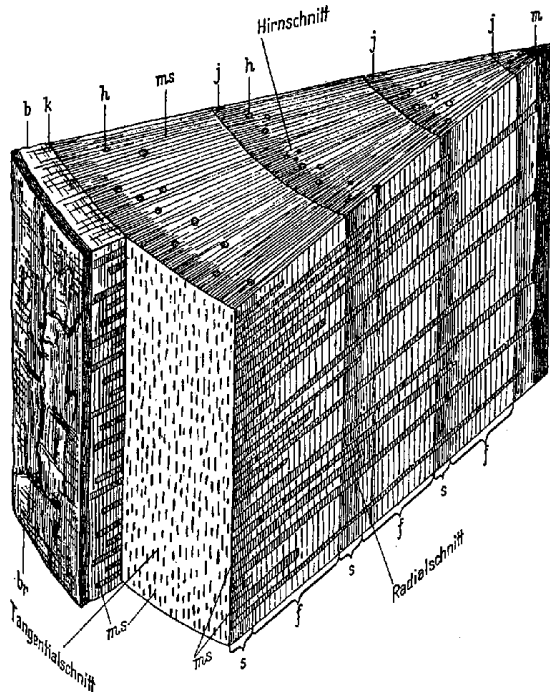
## **2 Anatomie des Holzes**

Die Anatomie des Holzes beschreibt die Struktur, die Zellen und deren Zusammenwirken im Holz. Holz ist ein inhomogener und anisotroper Stoff mit keinem einheitlichen Gefüge. Er ist aus Zellen aufgebaut, deren Wachstum geprägt ist durch seine Aufgabe als Tragstruktur für den Baum (Astigkeit, Abholzigkeit, etc.) und Umwelteinflüsse (Jahrringe, Holzfehler, etc.).

## 2.1 Makroskopischer Aufbau des Holzes

Dem Holzstamm kann näherungsweise ein Zylinderkoordinatensystem zugrunde

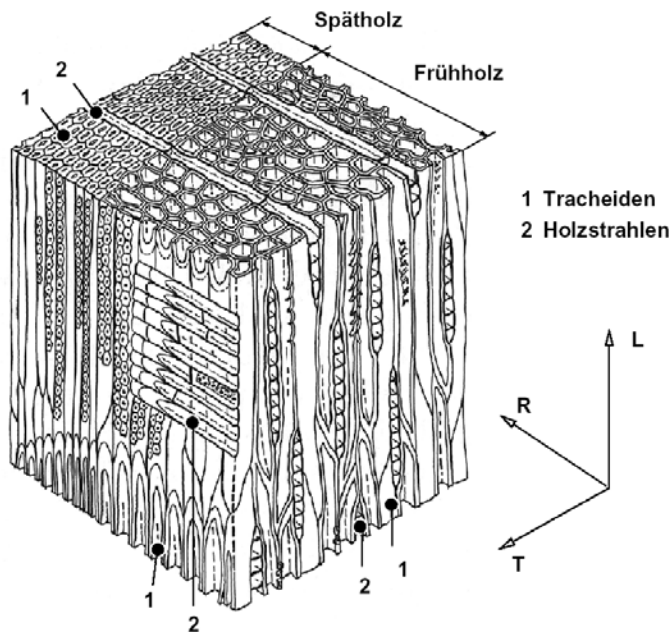
gelegt werden. Dabei wird die Wuchsrichtung durch die Längsachse abgebildet. Durch dieses Koordinatensystem können drei aufeinander senkrecht stehende Schnittebenen beschrieben werden.



1. Querschnitt (Hirnschnitt), der normal zur Längsachse liegt.
2. Radialschnitt, der durch die Längs- und Radialachse beschrieben wird.
3. Tangentialschnitt, der durch die Längs- und Tangentialachse bestimmt wird.

In ausreichendem Abstand zur Markröhre kann die Struktur näherungsweise durch ein kartesisches Koordinatensystem beschrieben werden. Die zugehörigen Achsen werden dabei als Längs-, Radial- und Tangentialachsen bezeichnet.

Abb. 2-1: Makrostruktur von Nadelholz, [7] S.1



Der Aufbau des Baumstammes in radialer Richtung nach außen gehend wird durch die Markröhre, die Holzmasse (Kernholz und Splintholz), das Kambium (Dickenwachstum), den Bast (Innenrinde) und die Borke (Außenrinde) beschrieben. Zusätzlich verlaufen in radialer Richtung Markstrahlen als Transportkanäle. Die Holzmasse wird durch die zylinderschalenartig gewachsenen Jahrringe gebildet. Die Jahrringe entstehen durch die Frühholz- und Spätholz-bildung, wobei die im Kernholz liegenden Jahrringe aus abgestorbenen Zellen bestehen.

Abb. 2-2: Mikrostruktur von Nadelholz, [4]

Das im Splintbereich liegende Frühholz besteht aus dünnwandigen, großvolumigen Zellen und dient primär dem Stoffwechseltransport. Das Spätholz im Splintbereich besteht hingegen aus dickwandigen, kleinvolumigen Zellen und dient primär der tragenden Struktur des Baumes.

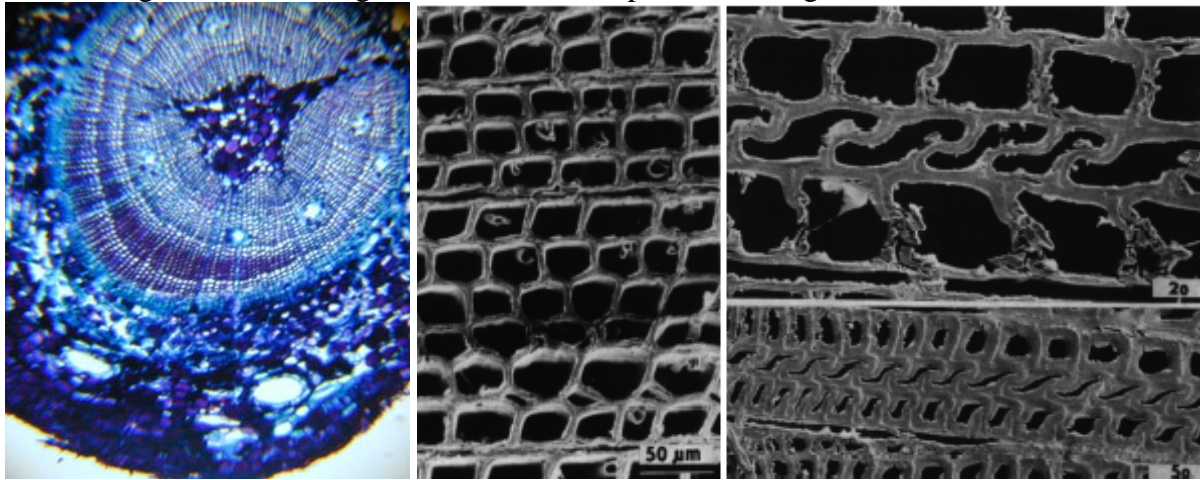


Abb. 2-3: Querschnitt durch Kiefernholz [Autor]; Zellstruktur [4]

## 2.2 Mikroskopischer Aufbau des Holzes

Die Holzzellen, auch Holzfasern genannt, werden in die drei typischen Zellarten, tracheale, parenchymatische und prosenchymatische Zellen, eingeteilt.

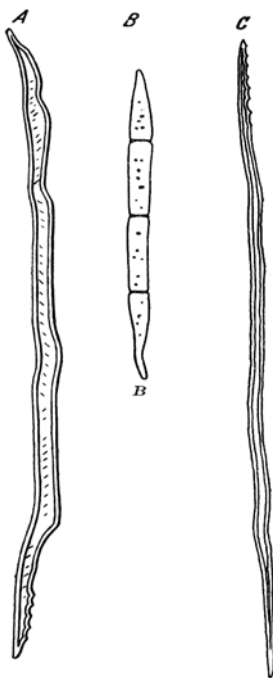


Abb. 2-4: A Tracheide, B Parenchymzelle und C Sklerenchymfaser, [7] S.10, S.15

1. **Tracheiden:** Sie sind die Urform der Holzzelle und dienen dem Stoffwechseltransport. Sie sind röhren- oder faserförmig und stets geschlossen. Im Frühholz sind sie dünnwandig und weitlumig, im Spätholz dagegen sind sie dickwandig und englumig.
2. **Parenchymzellen:** Sie dienen zur Speicherung von Reservestoffen (Stärke, Fette, Harze, Polysaccharide, etc.) und sind meist länglich und dünnwandig. Ihre Zellenform ist weitgehend verschieden.
3. **Sklerenchymgewebe:** Es besteht aus schmalen, langen und zugespitzten Sklerenchymfasern. Diese Hartfasern kommen nur im Laubholz vor und bilden dort die Hauptmasse des Holzkörpers. Es wird angenommen, dass sich die Fasern aus den Tracheiden entwickeln.

Der Unterschied zwischen Nadel- und Laubholz kann auf zellulärer Basis deutlich beschrieben werden.

## 2.2.1 Nadelhölzer

Diese besitzen einen einfachen und regelmäßigen Zellaufbau aus bis ca. 95 % Tracheiden. Die Längstracheiden sind zur Wuchsrichtung ausgerichtet und radial angeordnet. Die Quertracheiden sind radial ausgerichtet und über Hoftüpfel mit den Längstracheiden verbunden. Die radial ausgerichteten Markstrahlen werden überwiegend aus Parenchymzellen gebildet. Zwischen den Zellverbänden gibt es längliche Hohlräume, so genannte Interzellulargänge, die Harz enthalten.

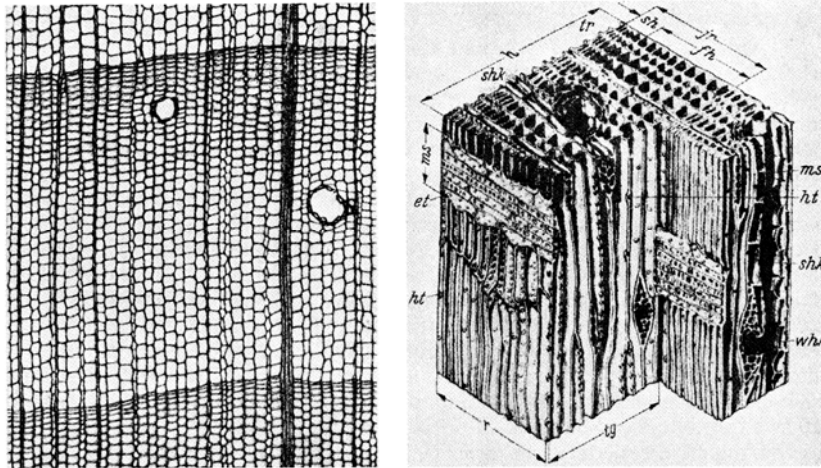


Abb. 2-5: Querschnitt durch Fichtenholz, [7] S.17

## 2.2.2 Laubhölzer

Sie besitzen einen weiter entwickelten und eher regellosen Zellaufbau.

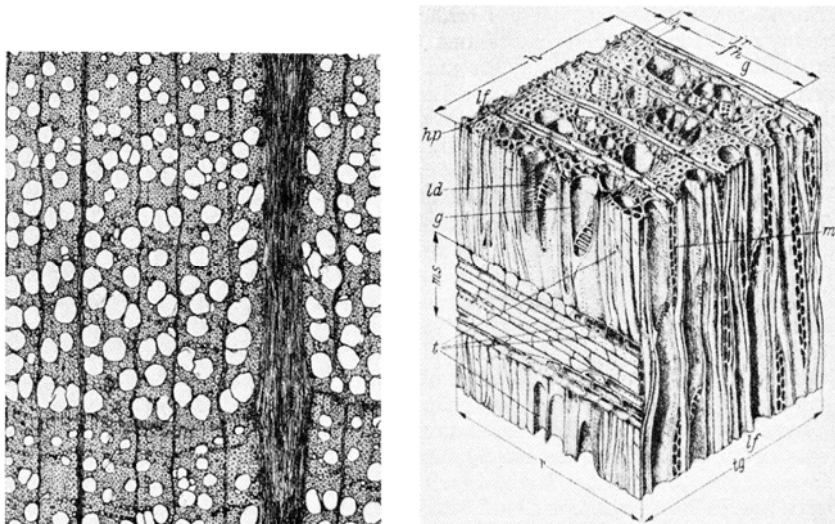


Abb. 2-6: Querschnitt durch Buchenholz, [7] S.17

Die Hauptmasse wird durch Hartfasern (Sklerenchymfasern) und dazwischen liegenden Fasertracheiden gebildet. Wie beim Nadelholz bestehen die radial ausgerichteten Markstrahlen überwiegend aus Parenchymzellen. Das, mit der Stammachse gleichlaufende, dichte Netz der Gefäße begründet sich durch den hohen und plötzlichen Wasserbedarf beim Ausschlag der Blätter. Das strukturiertere und dadurch einfacher beschreibbare Gefüge bei Nadelholz begründet sich durch den geringeren und gleichmäßigen Wasserbedarf des Nadelbaumes.

## 2.3 Submikroskopischer Aufbau des Holzes

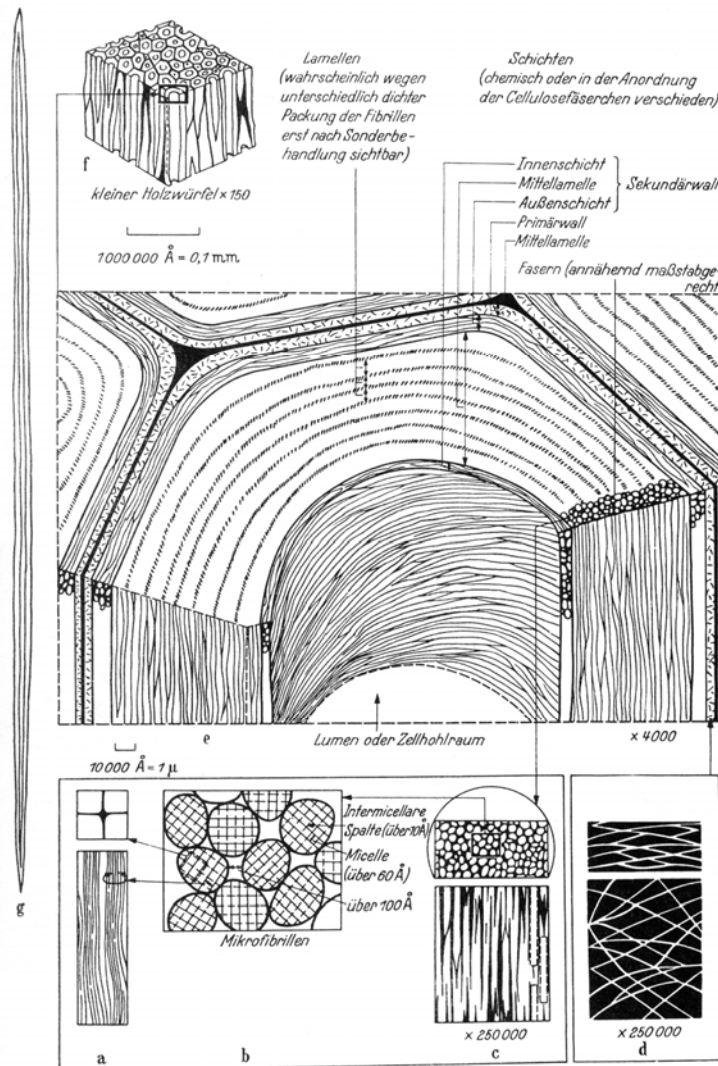


Abb. 2-7: Schema des Zellwandaufbaues, [7] S.121

Die Holzzelle (Holzfaser) besteht aus einer röhrenförmigen Struktur mit einem Zellhohlraum (Lumen) im Inneren und einer umschließenden Zellwand. Die Zellstruktur wird durch Mittellamellen zwischen den Zellen und den Zellen selber, welche aus primärer und sekundärer Wand bestehen, aufgebaut. Sie wird aus Mikrofibrillen und chemischen Bestandteilen (Zellulose, Hemizellulose, Lignin) gebildet.

Die Mikrofibrillen sind lange Bündel aus Zelluloseketten und Hemizelluloseketten und haben eine steife und feste Struktur parallel zu ihrer Ausdehnungsrichtung. Ihre Verteilung und Orientierung bestimmen damit die mechanischen Eigenschaften der Zellstruktur.

### 2.3.1 Mittellamelle oder Interzellulärschicht

Die aus Lignin bestehende Mittellamelle befindet sich zwischen den Zellen und ist isotrop aufgebaut.

### 2.3.2 Primäre Zellwand

Sie besteht aus Cellulose und wird durch wahllos orientierte Mikrofibrillen aufgebaut. Daher ist sie stark isotrop und bildet zusammen mit der Mittellamelle die stark quellbare Mittelschicht.

### 2.3.3 Sekundäre Zellwand

Sie besteht aus Cellulose, Kohlehydraten und Lignin und wird durch drei Schichten (äußere, mittlere und innere Schicht) aufgebaut. Die sekundäre Zellwand dient vornehmlich der mechanischen Festigung.

### 2.3.3.1 Äußere (erste) Schicht, S1

Die erste Schicht besteht aus Mikrofibrillen die nicht ganz regellos angeordnet sind.

### 2.3.3.2 Mittlere (zweite) Schicht, S2

In dieser Schicht sind die Mikrofibrillen dicht gepackt und fast parallel in Faserrichtung angeordnet. Sie ist stark anisotrop und wegen ihrer Dicke ist sie maßgebend für die elastische Eigenschaft.

### 2.3.3.3 Innere (dritte) Schicht, S3

Sie ist in der Dicke und der Orientierung der Mikrofibrillen der äußeren Schicht ähnlich.

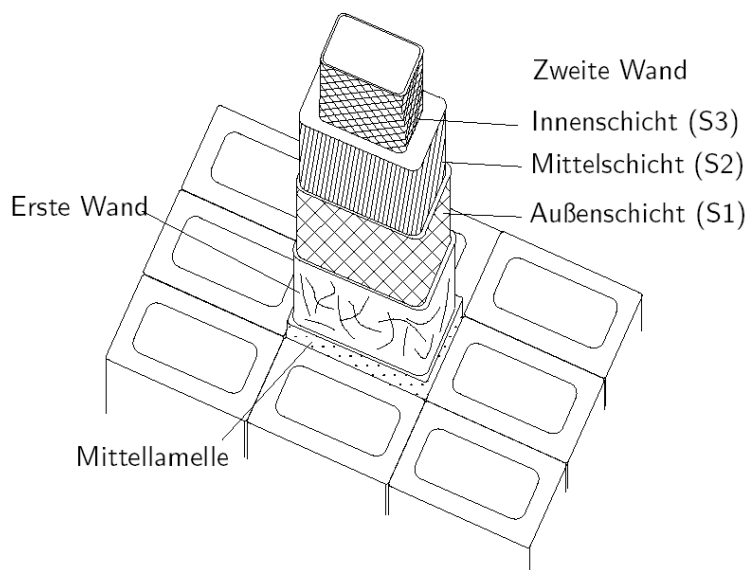


Abb. 2-8: Zellwandaufbau des Holzes, [10]

Der hier beschriebene submikroskopische Aufbau ist derzeit noch nicht zur Gänze geklärt und bedarf noch weiterer Untersuchungen.

## 3 Holzfehler

Unter Holzfehler werden alle Abweichungen von der normalen Struktur, Textur und Farbe verstanden und werden in folgende Arten eingeteilt:

1. Fehler der Stammform: Krummschaftigkeit, Gabelwuchs, Abholzigkeit, Hohlkehligkeit
2. Anatomischer Fehler: Unregelmäßiger Jahrringbau, Rot- bzw. Druckholz, Drehwuchs, Maserwuchs, Harzgallen, Falschkerne, Astigkeit
3. Fehler durch äußere Einwirkungen: Luft-, Strahlen-, Ring-, Hitze- und Frostrisse, Blitzschäden, Schnee- und Sturmschäden (Faserstauchungen), Rinden- oder Sonnenbrand, Überwallungen



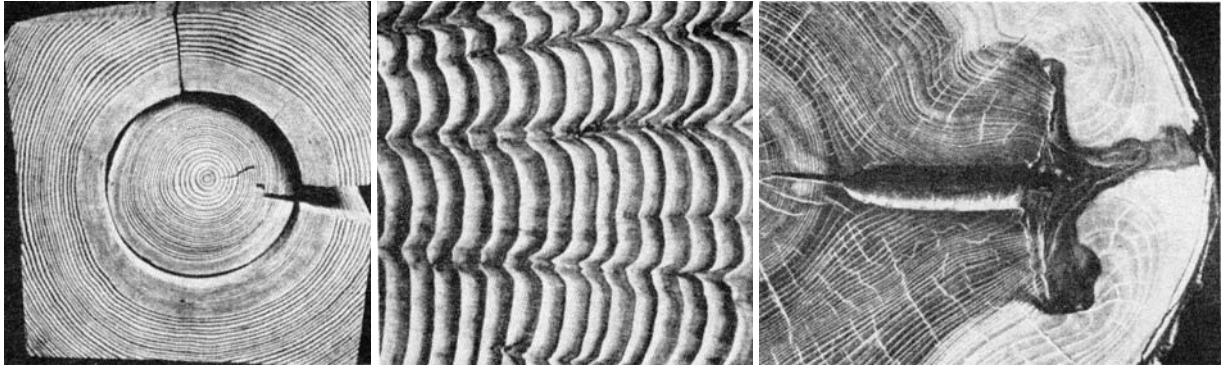


Abb. 3-1: Holzfehler: Kernschale, Maserung und Überwallung (Anbohrung)

## 4 Chemie des Holzes

Die chemischen Elementarteile des Holzes bestehen aus ca. 50% Kohlenstoff, 43% Sauerstoff, 6,1% Wasserstoff und geringem Anteil aus Stickstoff und mineralischen Bestandteilen (z. B. Asche).

Die von der Holzart abhängigen molekularen Hauptbestandteile der verholzten Zellwand sind:

- |                  |            |
|------------------|------------|
| 1. Zellulose     | (40 – 60)% |
| 2. Lignin        | (18 – 41)% |
| 3. Hemizellulose | (6 – 27)%  |

Die Zellulose ist ein Makromolekül und bildet mit den begleitenden Kohlehydraten die Gerüst- und Skelettsubstanz (Holozellulose) der Zellen. Das Lignin ist die Kittsubstanz und bewirkt die Verholzung des Werkstoffes. Die Hemizellulose dient teils als Gerüst- und teils als Reservestoff.

Der Aufbau der Zellwand wird somit durch ein zerklüftetes Zellulosegerüst, welches kristallisierende Bereiche und amorphe Lockerstellen besitzt, beschrieben. Dieses Gerüst ist wiederum in eine Füllmenge aus Lignin und begleitenden Kohlehydraten eingebettet.

## 5 Physik des Holzes

Die physikalischen Eigenschaften umfassen verschiedene Holzdichten, Feuchtigkeitsverhalten (Sorption, Schwinden, Quellen), thermische, elektrische, akustische und Reibungseigenschaften.

### 5.1 Rohdichte

Die Massendichte gibt die Masse eines Stoffes pro Volumeneinheit an. Die Dichte  $\rho$  wird somit aus dem Massegewicht  $m$  und dem Volumen  $V$  gebildet.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5.1)$$

Die Rohdichte wird am feuchten Holz bestimmt. Dabei wird das Gewicht des feuchtigkeithaltigen Holzes einfach durch Wiegen und das Volumen durch Verdrängungsverfahren (Wasser, Quecksilber) bestimmt. Die Rohdichte beeinflusst die Eigenschaften des Holzes maßgeblich und ist wegen dem hygrischen Verhalten des Holzes feuchtigkeitsabhängig. Sie kann in Abhängigkeit von der Feuchtigkeitsgehalt und dem Früh- und Spätholzanteil angegeben werden:

$$r_{u_1} = r_{fu_1} + (r_{su_1} - r_{fu_1}) \cdot s \quad (5.2)$$

- $r_{u_1}$  ... Rohdichte bei der Feuchtigkeitsgehalt  $u_1$
- $r_{fu_1}$  ... Rohdichte des Frühholzes bei der Feuchtigkeitsgehalt  $u_1$
- $r_{su_1}$  ... Rohdichte des Spätholzes bei der Feuchtigkeitsgehalt  $u_1$
- $s$  ... Spätholzanteil

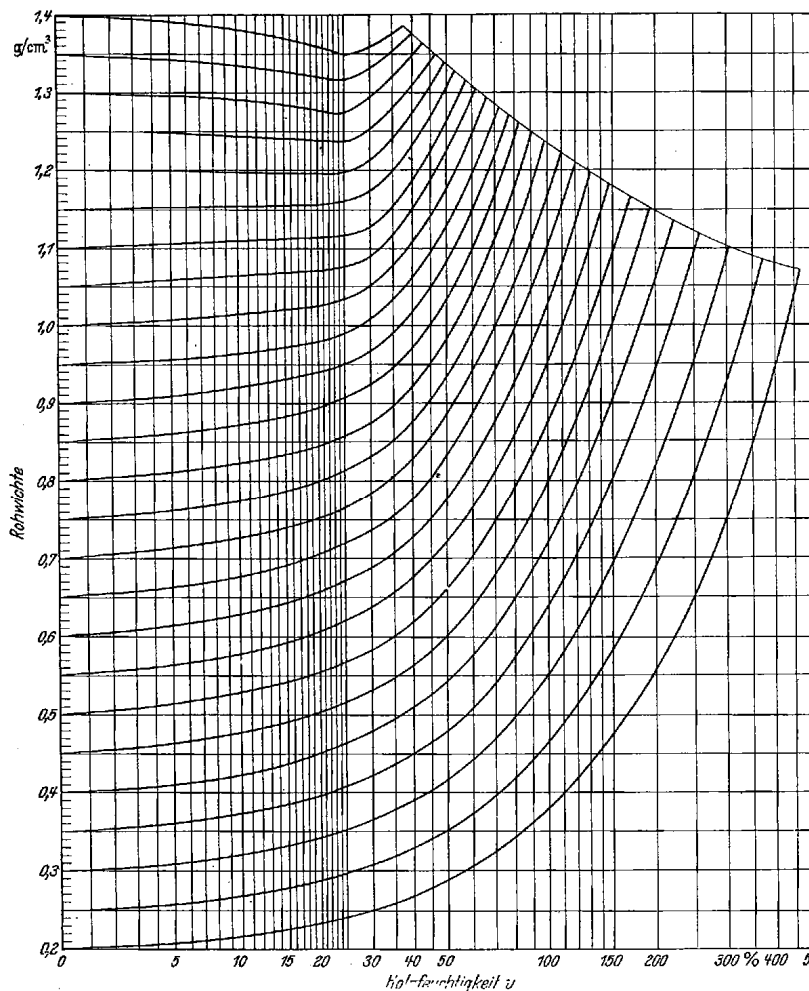


Abb. 5-1: Rohdichte-Feuchtigkeits-Schaubild für Holz, [7] S.337

In Abb. 5-1 ist zu beachten, dass z. B. leichtes Holz (Balsa, reines Frühholz) eine Holzfeuchtigkeitsgehalt  $u$  über 100% und mehr erlangen kann. Weiters wird die alte Bezeichnung „Rohwichte“

$$\gamma = \frac{F_G}{V} = \frac{m \cdot g}{V} = \rho \cdot g$$

angegeben.

## 5.2 Darrdichte

Die Darrdichte wird am darrtrockenen Holz bestimmt. Das Holz ist darrtrocken, wenn es keine Feuchtigkeit mehr besitzt. Dieser Zustand kann nur durch Wärmebehandlung erzeugt werden.

## 5.3 Reindichte

Die Reindichte gibt das Verhältnis zwischen der Masse des darrtrockenen Holzes und dem Zellwandvolumen, d. h. ohne Zellhohlräume, an. Da sie sich auf die Holzzellwand bezieht, beträgt sie unabhängig von der Holzart ca. 1500kg/m<sup>3</sup>.

## 5.4 Raumdichte

Die Raumdichte gibt das Verhältnis zwischen dem Darrgewicht und Volumen im jeweiligen Quellungszustand an. Sie gibt somit an, wie viel wasserfreies Holz in der Raumeinheit im gequollenen Zustand enthalten ist (Trockensubstanz im Frischvolumen).

$$r_{012} = \frac{m_0}{V_{12}} \quad (5.3)$$

$r_{012}$  ...Raumdichte bei 12% Holzfeuchtigkeit

$m_0$  ... Masse des Holzes im darrtrockenen Zustand

$V_{12}$  ... Volumen bei 12% Holzfeuchtigkeit

## 5.5 Holzfeuchtigkeit

Die Veränderung des Feuchtigkeitszustandes von Holz verursacht eine nachhaltige Änderung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Holz. Das als Arbeiten des Holzes benannte Quellen und Schwinden beeinflusst neben der Anisotropie und den Eigenschaftsstreuungen die Anwendbarkeit von Holz beträchtlich.

### 5.5.1 Holzfeuchtigkeit

Der Wasseranteil im Holz wird durch die Holzfeuchtigkeit  $u$  angegeben. Sie bezieht sich auf die Darrmasse und wird in Prozent angegeben.

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} \cdot 100 (\%) \quad (5.4)$$

$m_u$  ... Masse des Holzes im feuchten Zustand

$m_0$  ... Masse des Holzes im darrtrockenen Zustand

## 5.5.2 Sorption des Holzes

Die Aufnahme von kondensierbarem Dampf bei porigen Körpern wird als Sorption bezeichnet. Das Ausmaß der Dampfaufnahme steht dabei in engem Zusammenhang mit den chemischen und physikalischen Eigenschaften des Körpers.

Die Sorption bei Holz wird in drei wesentliche Sorptionsarten eingeteilt:

1. Chemosorption (Molekulare Sorption)
2. Adsorption
3. Kapillarkondensation

### 5.5.2.1 Molekulare Sorption bzw. Chemosorption:

Diese wird durch die molekulare Anziehungskraft zwischen den Molekülen des Gases und des festen Körpers bestimmt. Sie tritt unabhängig von der Holzart bei allen Hölzern auf und überwiegt im Bereich von 0 bis 6% Holzfeuchtigkeit.

### 5.5.2.2 Adsorption:

Darunter versteht man die Verdichtung des Gases oder Dampfes in der Nähe der Oberfläche des festen Körpers, ohne dass dabei eine chemische Wechselwirkung eintritt. Sie wird durch das submikroskopische Kapillarensystem in der Zellwand, welche eine mittlere innere Oberfläche von rund  $2 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{g}$  besitzt, hervorgerufen. Auf Grund der Ähnlichkeit der Erscheinungen bei Adsorption und Chemosorption sind diese nicht scharf von einander abzugrenzen. Sie tritt ebenfalls unabhängig von der Holzart auf und überwiegt im Bereich von 6 bis 15% Holzfeuchtigkeit.

### 5.5.2.3 Kapillarkondensation:

Die Kondensation des Dampfes wird durch Kapillarkräfte in Kapillaren im Bereich bis zur mikroskopischen Weite hervorgerufen. Diese Art der Feuchtigkeitsaufnahme ist sehr stark von der Holzart geprägt und überwiegt im Bereich über 15% Holzfeuchtigkeit.

## 5.5.3 Fasersättigungsfeuchtigkeit und Fasersättigungspunkt

Sie ist jene Feuchtigkeit, bei der das gesamte Mikrosystem der Zellwand maximal mit Wasser gefüllt ist. Das über Sorption bis zur Fasersättigung aufgenommene Wasser wird als gebundenes Wasser bezeichnet und befindet sich in den Micellzwischenräumen und als Dampf in den größeren Zellhohlräumen. Das oberhalb der Fasersättigung eingelagerte Wasser wird als freies Wasser bezeichnet und befindet sich in den größeren Zellhohlräumen, den größeren Kapillaren. Ebenso kommt der Fasersättigung eine wesentliche praktische Bedeutung zu, da die Festigkeitseigenschaften oberhalb der Fasersättigung unabhängig von der Feuchtigkeit sind und unterhalb eine starke und stetige Abhängigkeit davon aufweisen. Die Fasersättigung liegt bei allen Holzarten ungefähr bei 28% Holzfeuchtigkeit.

## 5.5.4 Sorptionsgleichgewicht, Hysterese

Das Sorptionsgleichgewicht von Holz, welches das Gleichgewicht zwischen Luftfeuchtigkeit und Holzfeuchtigkeit beschreibt, liegt bei der Desorption (Wasserentzug) höher als bei der Adsorption (Wasserzufuhr). Der Unterschied zwischen den beiden Sorptionskurven wird als Hysterese bezeichnet. Die Ursache für diese Hysterese wird durch mehrere verschiedene Theorien (auf zellulärer Basis, thermodynamische Betrachtung) beschrieben.

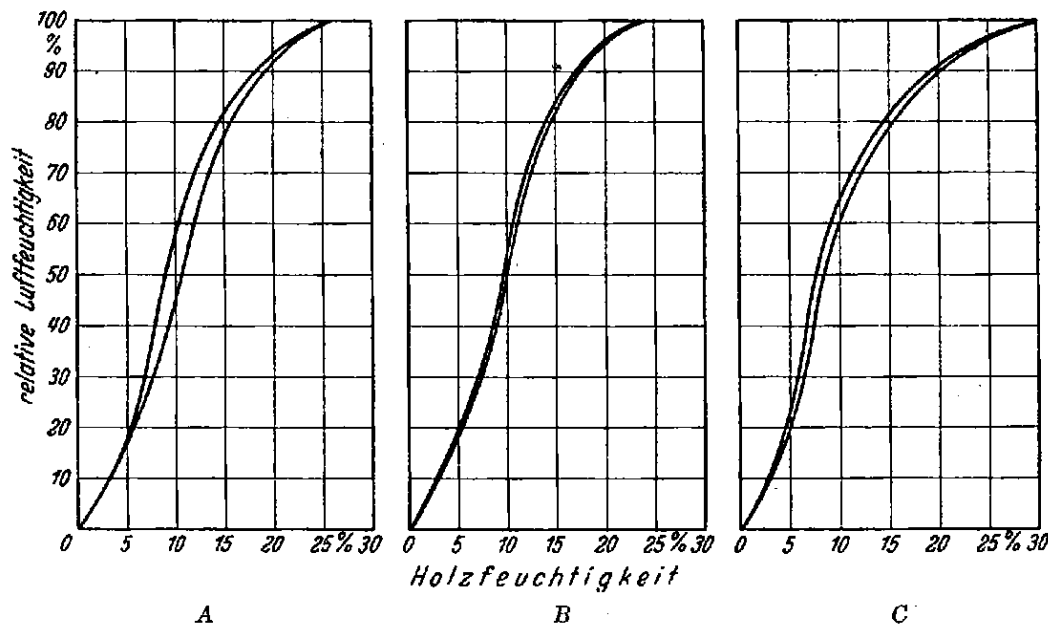


Abb. 5-2: Sorptionsschleifen bei 20°C, A Kiefer, B Eiche, C Rotbuche, [7] S.397

## 5.5.5 Möglichkeiten zur Verringerung der Hygroskopizität

1. Beeinflussung des Gels (feuchtigkeitsempfindliche Fasern) auf physikalischem Wege durch die Behandlung mit hohen Temperaturen (z. B. künstliche Trocknung). Dadurch kommt es zu einer Art Verhornung der feuchtigkeitsempfindlichen Fasern.
2. Abschluss des Gels vom Quellungsmittel durch äußere oder innere Überzüge (Anstrich, Tränkverfahren)
3. Behinderung der Quellung auf mechanischem Wege durch geeignete Formgebung und Einspannung oder Absperren (Lagenholz). Eine durch äußere Krafteinwirkung behinderte Quellung verursacht eine Veränderung des Zellengefüges in dem Sinne, dass der Körper eine dauernde Schrumpfung aufweist.
- 4.

Ein Maß für das Quellen ist die auf das Darrvolumen bezogene Raumquellung  $\alpha_v$ , welche sich vereinfachend aus den drei verschiedenen Längenquellmaßen  $\alpha_r$ ,  $\alpha_t$  und  $\alpha_l$  bilden lässt.

$$\alpha_v = \alpha_r + \alpha_t + \alpha_l \quad (5.5)$$

Die Quellungskurven geben den Zusammenhang zwischen der Quellung in den einzelnen Richtungen und dem Wassergehalt wieder. An den Kurven ist ein proportionaler (linearer) Verlauf

der Quellmaßänderung zwischen 0 und 25% Wassergehalt und das Quellungsmaximum ersichtlich. Die drei Längenquellmaße unterscheiden sich sehr stark und sind in tangentialer Richtung am größten, in radialer geringer und parallel zur Faser klein. Im selben Sinne ist das Schwinden zu betrachten. Die Quellungs- und Schwindungsanisotropie beruht auf dem Zusammenwirken von mehreren Ursachen wie Fließvorgänge im Zellgefüge, anatomische Merkmale, unterschiedliche Gefügedichte und Feinheiten des Feinbaues. Eine in allen Punkten überzeugende, restlos befriedigende Theorie der Quell- und Schwindungsanisotropie liegt noch nicht vor.

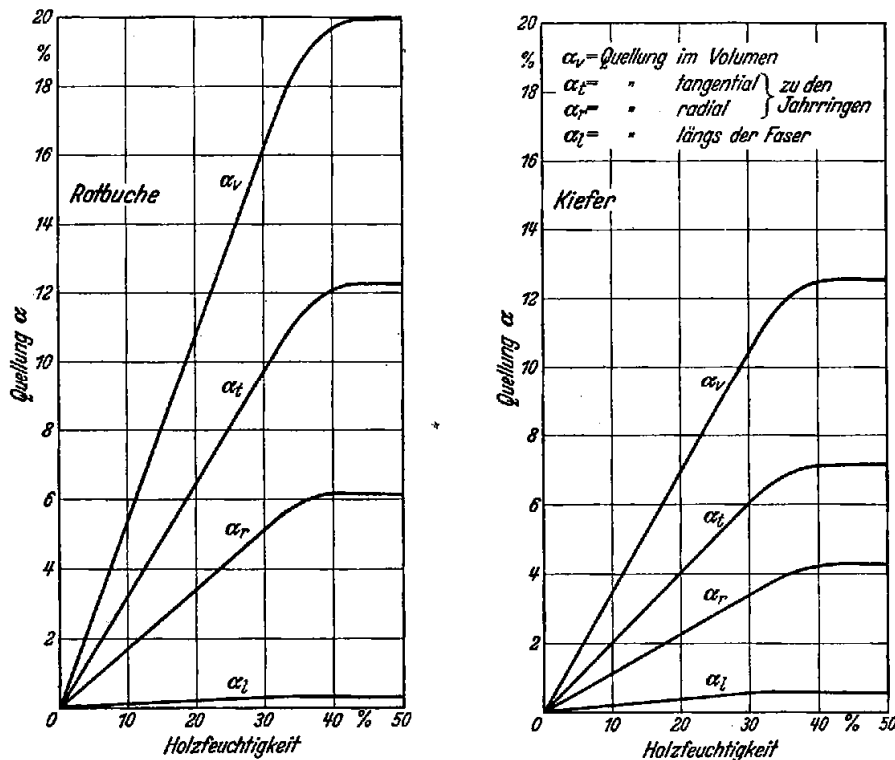


Abb. 5-3: Quellungskurven für Rotbuche und Kiefer, [7] S.416

## 6 Stand der Holzforschung

Holz als Werkstoff wurde mit Anfang des 20. Jahrhunderts von Physikern als anisotroper Festkörper theoretisch und experimentell genauer untersucht. Bis in die Mitte der 40er Jahre wurde Holz und seine aus ihm gewonnenen Werkstoffe in vielen Bereichen bis hin zum Flugzeugbau eingesetzt. Das elasto-mechanische Verhalten von Holz wurde bis zu dieser Zeit auch dem Stand der damaligen Technik entsprechend genau beschrieben. Durch das Aufkommen von neuen Rohstoffen aus der Petrochemie und der Massenproduktion von Metallwerkstoffen, aber auch den neuen Anforderungen aus der Produktentwicklung (Verformbarkeit, Nachgiebigkeit, Festigkeit, etc.) wurde die Forschung und Entwicklung von Holz und Holzwerkstoffen in den darauf folgenden Jahren im Vergleich zu anderen Werkstoffen rudimentär behandelt. Erst durch die Entwicklung neuerer Fertigungsverfahren (z. B. BSH, etc.), durch die Rohstoffknappheit bei Kunststoffen (Holzwerkstoff als Ergänzung oder Ersatz für Kunststoff) und auch durch den Umweltgedanken (umweltschonender Rohstoff) wird Holz als Rohstoff seit den 90er Jahren

wieder interessant. Die heutige Materialforschung konzentriert sich überwiegend auf das zeitliche Verhalten (Kriechen) von Holz unter Umwelteinflüssen (Klima-Belastungs-Interaktion). Auch wird im Bereich der Identifikation der Materialparameter mit neuen theoretischen Ansätzen und numerischen Methoden geforscht. Damit wird ein vollständiger Satz von Materialparametern gesucht um das Verhalten von Holz phänomenologisch mit Hilfe der Kontinuumsmechanik zu beschreiben.

## **7 Elastomechanische Eigenschaften von Holz**

### **7.1 Kontinuumsmechanische Betrachtung**

In der Kontinuumsmechanik werden Materialmodelle entwickelt mit denen die Verformung eines Körpers durch Belastung beschrieben werden kann. Diese Materialmodelle geben das phänomenologische Verhalten eines Stoffes in mathematischer und mechanischer Form wieder. Auf den Werkstoff Holz angewandt bedeutet dies, dass das Materialmodell nicht nur die anisotropen mechanischen Eigenschaften sondern auch ihre Abhängigkeit von der Feuchtigkeit, der Temperatur und deren Kombination berücksichtigen muss. Ein solcher Ansatz für natives Holz scheint zurzeit nicht realisierbar, da dafür zu viele Parameter berücksichtigt werden müssten. Zu den wesentlichen Parametern zählen die Inhomogenität und der klimatische Einfluss (Temperatur, Sorption). Damit ergibt sich die große Streuung der Holzeigenschaften. Der Einfluss der Inhomogenität kann auf die Mikrostrukturelle Ebene begrenzt werden, da für die Makrostrukturelle der Zellverband als verschmiert und gemittelt betrachtet werden kann. Damit kann das Holz als richtungsabhängiger (longitudinal, radial, tangential) homogener und anisotroper Körper betrachtet werden.

### **7.2 Elastische Eigenschaften**

Unter elastischem Materialverhalten wird verstanden, dass sich die Form eines festen Stoffes unter Beanspruchung ändert und bei Wegnahme der Beanspruchung die ursprüngliche Form des Stoffes wieder eingenommen wird. Der Grenzpunkt der Belastung bis zu dem diese reversible Formänderung stattfindet, wird Elastizitätsgrenze genannt. Oberhalb dieses Grenzpunktes bleiben plastische Verformungen im Körper zurück (duktiler Stoffe) oder der Körper bricht (spröde Stoffe).

Da bei Holz keine ausgeprägte plastische Verformung, wie z. B. bei Stahl, vorhanden ist, kann primär nur der elastische Bereich des Holzes genutzt werden. Nur lokal begrenzt kommt es zu plastischer Verformung (Lochlaibung).

Aufgrund der vorhergehenden Betrachtungen und Erkenntnissen, kann der Werkstoff Holz zunächst einmal als linear-elastischer, homogener (richtungsabhängig) und anisotroper Werkstoff betrachtet werden.

Das linear elastische anisotrope Materialgesetz in der verallgemeinerten Hooke'schen Form lautet:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (7.1)$$

$\sigma_{ij}$  Spannungstensor  
 $C_{ijkl}$  Elastizitätstensor  
 $\varepsilon_{kl}$  Verzerrungstensor

bzw.

$$\varepsilon_{ij} = J_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (7.2)$$

mit  $J_{ijkl}$  Nachgiebigkeitstensor

Aufgrund der Symmetrie des Spannungstensors  $T_{ij} = T_{ji}$  und des Verzerrungstensors  $E_{ij} = E_{ji}$  reduziert sich die Anzahl der Komponenten des Nachgiebigkeitstensors auf 36. Nimmt man weiterhin an, dass eine Verzerrungsenergiedichte  $W_F$  existiert, aus der die Spannungen gemäß  $T_{ij} = \partial W_F / \partial E_{ij}$  ableitbar sind, so reduziert sich die Anzahl der Komponenten des Tensors auf 21, d. h. es gilt  $J_{ijkl} = J_{klij}$ . In der Voigt'schen Matrixschreibweise geschrieben lautet nun die Hookesche Beziehung:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_T \\ \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \gamma_{LR} \\ \gamma_{TR} \\ \gamma_{TL} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_T \\ \sigma_L \\ \sigma_R \\ \tau_{LR} \\ \tau_{TR} \\ \tau_{TL} \end{pmatrix} \quad (7.3)$$

T ... Tangential-,      L ... Longitudinal-,      R ... Radial-Richtung  
 $\varepsilon_T$  ... Tangential-,       $\varepsilon_L$  ... Longitudinal-,       $\varepsilon_R$  ... Radial-Dehnung  
 $\gamma_{LR}, \gamma_{TR}, \gamma_{TL}$  ... Gleitungen in den durch T, L und R aufgespannten Ebenen  
 $S_{ij}$  ... Nachgiebigkeitszahlen (Dehnungszahlen)  
 $\sigma_T$  ... Tangential-,       $\sigma_L$  ... Longitudinal-,       $\sigma_R$  ... Radial-Spannung  
 $\tau_{LR}, \tau_{TR}, \tau_{TL}$  ... Schubspannungen in den durch T, L und R aufgespannten Ebenen

Die Nachgiebigkeitsmatrix ist symmetrisch ( $S_{ij} = S_{ji}$ ) und vereinfacht sich noch weiter durch die Annahme dass sich Holz orthotrop (orthogonal isotrop) verhält und dadurch Normalspannungen keine Schubverzerrungen und Schubspannungen keine Normalverzerrungen bewirken. Damit reduziert sich die Nachgiebigkeitsmatrix auf schlussendlich neun unabhängige Komponenten. Die zugehörige Hookesche Beziehung lautet:



$$\begin{pmatrix} \varepsilon_T \\ \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \gamma_{LR} \\ \gamma_{TR} \\ \gamma_{TL} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_T \\ \sigma_L \\ \sigma_R \\ \tau_{LR} \\ \tau_{TR} \\ \tau_{TL} \end{pmatrix} \quad (7.4)$$

Die Zuordnung der kartesischen Hauptachsen im Holz erfolgt in der Holzphysik durch die gewählte Lage der Symmetrieebenen. Die Hauptsymmetrieebenen werden dabei senkrecht zu den Jahrringen gelegt. Dabei entsteht eine Einschränkung in der zx-Ebene, die senkrecht zur Wuchsrichtung steht, in der die Holzdicke schwankt. Auch durch den spiraligen Feinbau der Holzfasern ist das Holz bei exakter Betrachtung triklin aufgebaut. Jedoch kann Holz durch die Kleinheit einiger der 21 Komponenten der Nachgiebigkeitsmatrix innerhalb der Versuchsfehlergrenzen als rhombisch betrachtet werden.

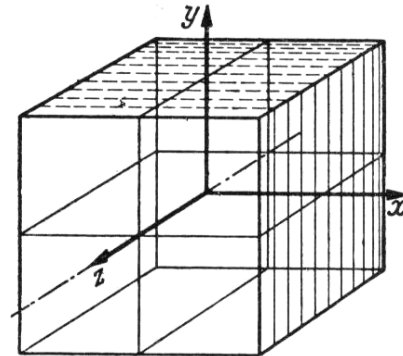


Abb. 7-1: Lage der Symmetrieebenen, [7] S.577

Die Komponenten der Nachgiebigkeitsmatrix können auch mit den Ingenieurkonstanten (E ... Elastizitätsmodul, G ... Schubmodul,  $\nu$  ... Querdehnungszahl) ausgedrückt werden. Die zugehörige Matrix lautet:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_T \\ \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \gamma_{LR} \\ \gamma_{TR} \\ \gamma_{TL} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{TL}}{E_L} & -\frac{\nu_{TR}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_T} & \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{LR}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{RT}}{E_T} & -\frac{\nu_{RL}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_T \\ \sigma_L \\ \sigma_R \\ \tau_{LR} \\ \tau_{TR} \\ \tau_{TL} \end{pmatrix} \quad (7.5)$$

Dabei gilt für die:

## E-Module

$$E_T = \frac{\sigma_T}{\varepsilon_T}, \quad E_L = \frac{\sigma_L}{\varepsilon_L}, \quad E_R = \frac{\sigma_R}{\varepsilon_R} \quad (7.6),$$

## G-Module

$$G_{TL} = \frac{\tau_{TL}}{\gamma_{TL}}, \quad G_{TR} = \frac{\tau_{TR}}{\gamma_{TR}}, \quad G_{LR} = \frac{\tau_{LR}}{\gamma_{LR}} \quad (7.7),$$

## Querdehnungszahlen

$$\frac{\nu_{TL}}{E_L} = \frac{\nu_{LT}}{E_T}, \quad \frac{\nu_{TR}}{E_R} = \frac{\nu_{RT}}{E_T}, \quad \frac{\nu_{LR}}{E_R} = \frac{\nu_{RL}}{E_L} \quad (7.8),$$

wobei der erste Index die Richtung der Hauptbeanspruchung und der zweite Index die Messrichtung der Dehnung bezeichnen.

Die neun unabhängigen Dehnungszahlen der Nachgiebigkeitsmatrix werden somit durch die 3 E-Module, 3 G-Module und 6 Querdehnungszahlen (wovon drei voneinander unabhängig sind) beschrieben. Es ist zu beachten, dass die Dehnungszahlen  $S_{ij}$  der Nachgiebigkeitsmatrix vertauschbar sind ( $S_{ij} = S_{ji}$ ), die Querdehnungszahlen  $\nu_{ij}$  jedoch nicht vertauschbar sind ( $\nu_{ij} \neq \nu_{ji}$ ).

Wie bereits oben angedeutet, ist die Hooke'sche Beziehung auch durch die Steifigkeitsmatrix darstellbar. In Matrix-Schreibweise bedingt dies die Beziehung:  $[C] = [J]^{-1}$ . Dazu muss die Nachgiebigkeitsmatrix positiv definit ( $\det[J] > 0$ ) und weiters die Diagonalglieder  $> 0$  sein.

## 7.3 Orientierung des Werkstoffes Holz

Die oben angegebenen Steifigkeitszahlen bzw. Dehnungszahlen gelten nur wenn sich diese auf das eingeführte Koordinatensystem für Holz (T, L, R) beziehen. Werden die Spannungen und Dehnungen in einem zu T, L, R beliebig verdrehtem Koordinatensystem T', L', R' gemessen, so müssen diese transformiert werden. Die Lage von T, L, R gegenüber T', L', R' wird als Orientierung des Holzes bezeichnet [7]. Die Änderung der Dehnungen in Abhängigkeit von der Orientierung kann durch Dehnungsflächen bzw. Deformationskörpern gezeigt werden.

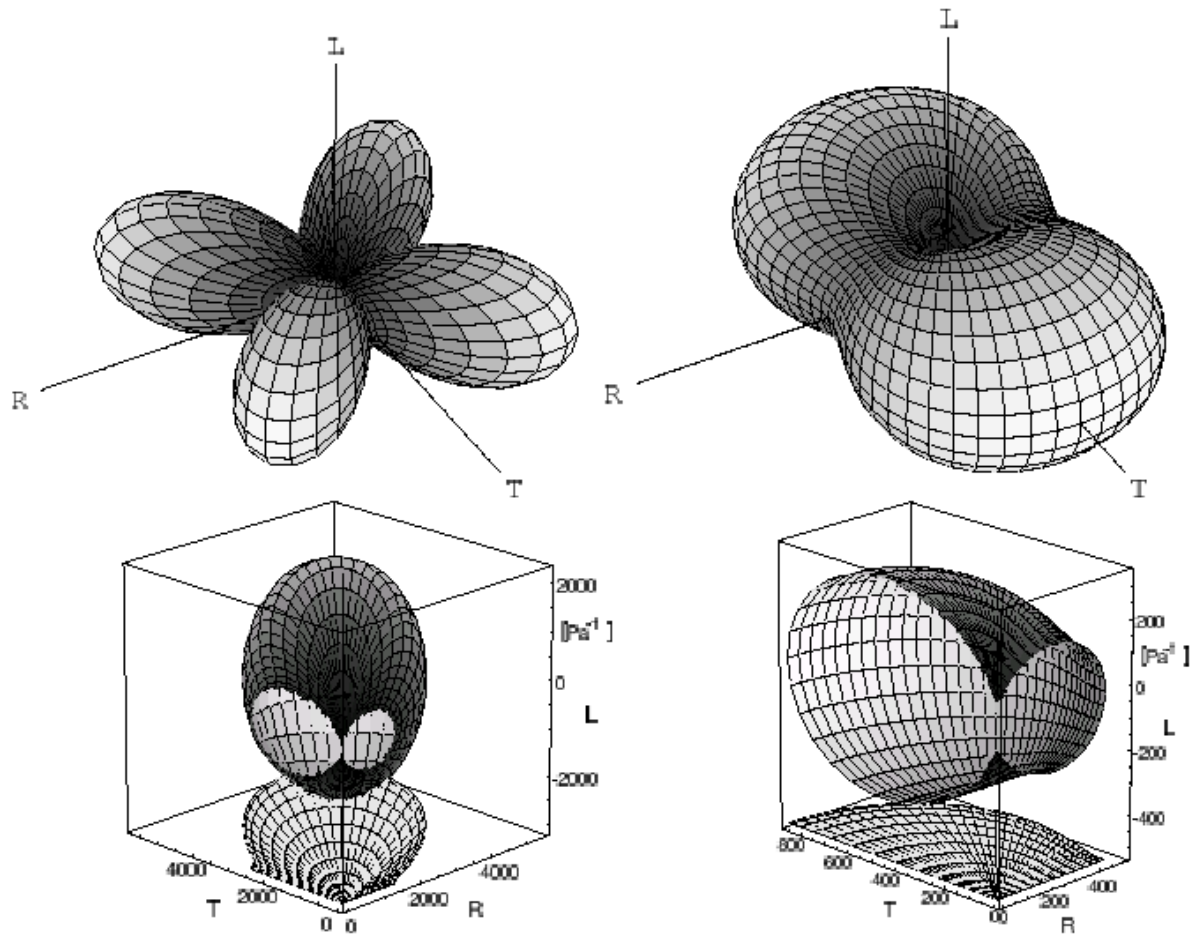


Abb. 7-2: Deformationskörper für Zug, links Fichte und rechts Buche

Abb. 7-2 zeigt sehr deutlich die Anisotropie von Nadelholz am Beispiel Fichte. Die größte Deformation tritt bei Zugbelastung unter  $45^\circ$  zu den Hauptachsen R und T auf, verursacht durch den geringen Schubmodul  $G_{TR}$ . Bei Buche, Abb. 7-2, tritt die größte Deformation bei Zugbelastung in Tangenten-Richtung auf. Weitere Betrachtungen können der Dissertation von Grimsel [2] entnommen werden.

## 7.4 Querkontraktionszahlen von Holz

Beim anisotropen Körper Holz sind bei Zugrundelegung eines rhombischen Systems 6 Querkontraktionszahlen zu bestimmen. Davon sind, wie oben bereits angemerkt, drei voneinander unabhängig. Die dafür geforderte theoretische Beziehung lt. Kap. 7.2 ist gut erfüllt.

## 7.5 Kompressibilität von Holz

Für Holz als anisotropen Körper gilt die Kompressibilitätsbedingung, die besagt, dass das Volumen eines Körpers bei hydrostatischem Druck entweder gleich bleibt oder verringert, jedoch nicht vergrößert wird.

Die Kompressibilität  $\chi$  ergibt sich aus (7.4) durch die Bildung der volumetrischen Verzerrungen:

$$\varepsilon_T + \varepsilon_L + \varepsilon_R = S_{11} + S_{22} + S_{33} + 2(S_{12} + S_{13} + S_{23}) = \chi > 0 \quad (7.9)$$

Analog zum isotropen Werkstoff gilt somit für die Poisson'sche Konstante  $\mu_k$ :

$$\mu_k = -\frac{S_{12} + S_{13} + S_{23}}{S_{11} + S_{22} + S_{33}} < 0,5 \quad (7.10)$$

## 7.6 Elastische Hysterese

Bei lang andauernder Belastung kommt es zu einer Zunahme der gesamten und bleibenden Verformungen. Man spricht deshalb von einer starken elastischen Nachwirkung bei Holz. Die elastische Hysterese beschreibt die inelastische Verformung, welche neben der elastischen Formänderung auftritt. Die Innenfläche der Hysteresisschleife stellt ein Maß für die während eines Zyklus umgewandelte Formänderungsenergie in Wärme dar. Sie ist auch ein Ausdruck für die Werkstoffdämpfung, welche Schwingungen im Körper ohne den Einfluss äußerer Dämpfung abklingen lässt.

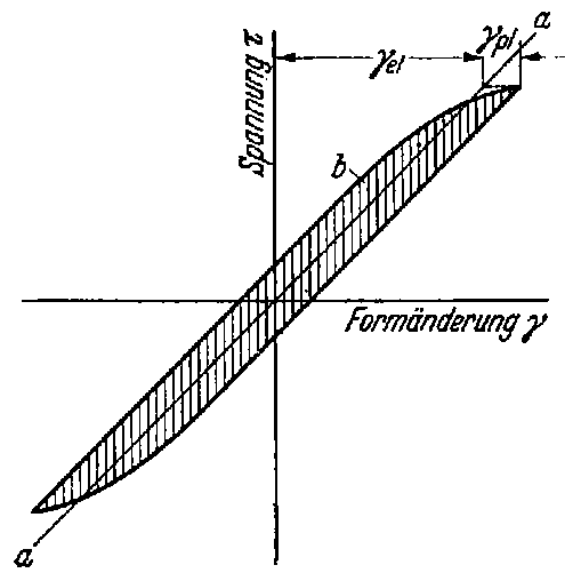


Abb. 7-3: Spannungs-Formänderungsdiagramm, [7] S.587

## 7.7 Bestimmung der elastischen Konstanten und Festigkeiten

Ein wesentlicher Teil der Holzforschung erfolgte in den 40er Jahren, wo dieser Werkstoff auch im Flugzeugbau eingesetzt wurde (Junkers-Flugzeugbau).

Um eine Vergleichbarkeit der mechanischen Eigenschaften von Holz zu gewährleisten, werden die Materialprüfungen nach Normen durchgeführt. Im europäischen Raum werden daher in erster Linie europäische Normen (Eurocodes) und bei Fehlen solcher in zweiter Linie nationale Normen in den Ländern angewandt. Es ist generell bei Normen zu beachten, dass diese aus ökonomischen Gründen nicht immer exakt sondern konservativ (praxisgerecht) das physikalische und mechanische Verhalten wiedergeben.

Die elastischen Konstanten und Festigkeiten für Holz werden aus verschiedenen Werkstoffversuchen gewonnen. Dazu werden Zug-, Druck-, Biegeversuche und Schubversuche durchgeführt. Der Elastizitätsmodul wird dabei als reziprokes Maß für die Größe der elastischen Formänderung zufolge Zug- Druck- und Biegebeanspruchung definiert. Die Festigkeit wird aus der Bruchlast und der entsprechenden Widerstandsgröße der Probe ermittelt und als Bruchspannung angegeben.

### 7.7.1 Zugversuch

Die zuständige deutsche Norm ist die DIN EN 408. Sie beschreibt die Ermittlung der Zugfestigkeit und des Zug-E-Moduls ( $E_z$ ) exakt im Sinne der Mechanik.

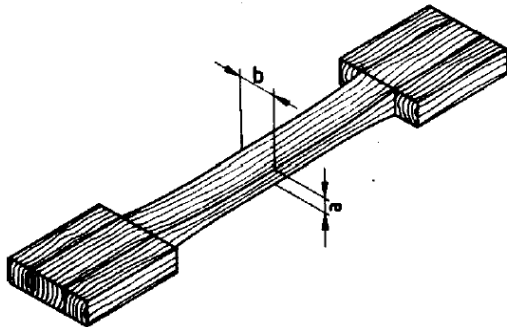


Abb. 7-4: Zugprobe

### 7.7.2 Druckversuch

Die zuständige deutsche Norm ist ebenfalls die DIN EN 408. Auch sie beschreibt die Ermittlung der Druckfestigkeit und des Druck-E-Modul ( $E_D$ ) exakt im Sinne der Mechanik.

### 7.7.3 Biegeversuch

In der vereinfachten Annahme der Balkenbiegung nach EULER-BERNOULLI wird der Querschnitt des Biegebalkens auf Zug und Druck belastet. Da sich der Zug-E-Modul ( $E_z$ ) und der Druck-E-Modul ( $E_D$ ) jedoch unterscheiden findet eine nichtlineare Verteilung der Spannungen über den Querschnitt statt, siehe Abb. 7-5 und Abb. 7-6. Die Schubdeformation wird bei der Euler-Bernoulli-Theorie vernachlässigt womit die Biegedeformation nicht exakt im Sinne der Kontinuumsmechanik beschrieben wird. Da weiters der Biegebalken die am meisten eingesetzte statische Struktur im Baubereich ist, wird das mechanische Verhalten des Biegebalkens als ein gesamtes verschmiertes mechanisches Verhalten, oder einfach als Bauteilverhalten, betrachtet. Der Versuch wird in der DIN EN 480 beschrieben.

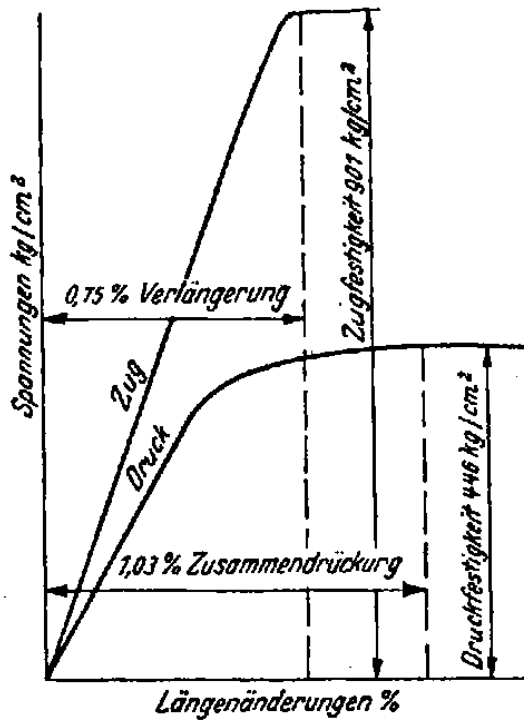


Abb. 7-5: Spannungs-Dehnungsdiagramm für Zug und Druck, [7] S.779

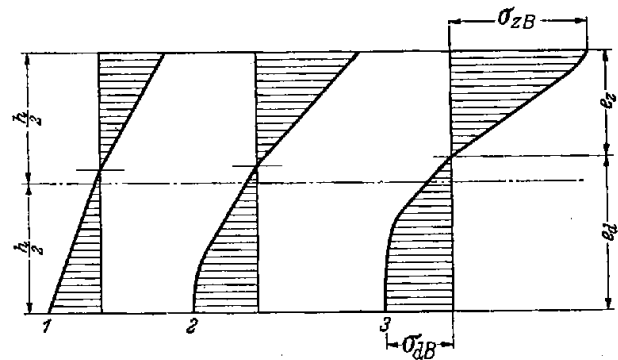


Abb. 7-6: Biegezugspannung an drei verschiedenen Zustandspunkten, [7] S.779

Mit den bisher beschriebenen Versuchen (Zug- und Druckversuch) und mit entsprechender Messtechnik lassen sich die Dehnungszahlen ( $S_{11}, S_{22}, S_{33}$ ) und Querdehnungszahlen ( $S_{12}, S_{13}, S_{23}$ ) in den drei Koordinatenrichtungen einfach und genau messen.

Viel schwieriger ist die Messung der drei Schubmodule ( $G_{LR}, G_{TR}, G_{TL}$ ) am Werkstoff Holz. Für den inhomogenen (Jahrringe) anisotropen Werkstoff Holz gilt nämlich nicht wie für homogene anisotrope Stoffe, dass der Schubmodul mit dem Drillungsmodul, welcher durch Verdrehversuche gewonnen wird, identisch ist.

Die bei homogenen isotropen Werkstoffen gängige und einfache Schubmodulmessung an kleinen schmalen Quadern liefert für Holz nur für  $G_{TR}$  angenäherte Werte. Die beiden anderen Schubmodule können damit jedoch nicht ausreichend genau gemessen werden.

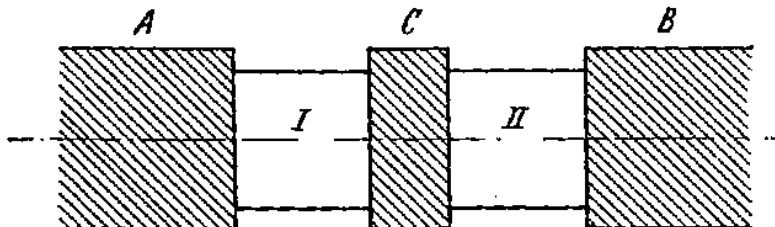


Abb. 7-7: Schubversuch für isotrope Werkstoffe, [7] S.596

Weitere Verfahren wären die unmittelbare Messung der Gleitzahlen eines Würfels aus rhombischem Stoff nach Horig [5] und Verdrehversuche mit anschließender mathematischer Aufarbeitung nach Horig [6] oder Grimsel [4].

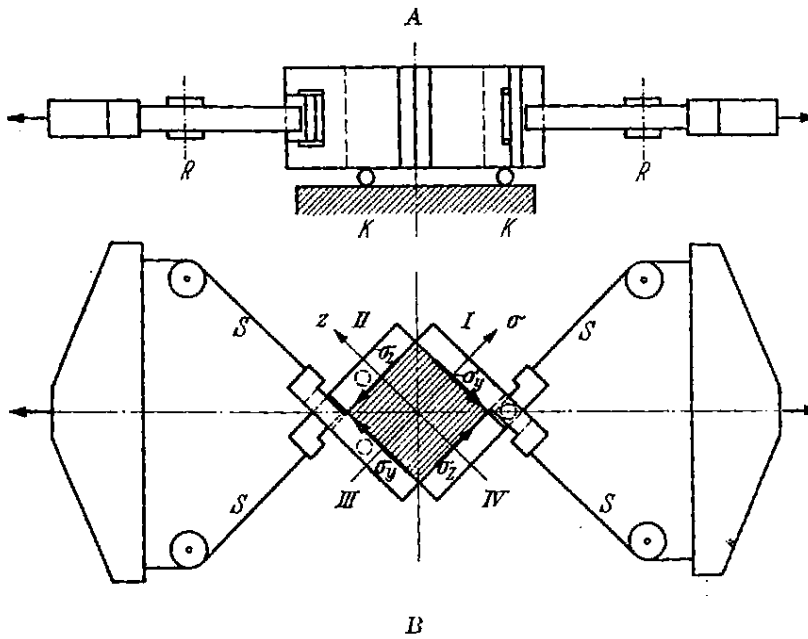


Abb. 7-8: Schubversuch für rhombische Stoffe, [7] S.596

Die Ermittlung der Schubmodule, nach Ylinen [12], durch einen Gelenkrahmen, in den die Flachprobe eingeleimt wird (Abb. 7-9), stellt ein sehr einfaches Messverfahren dar. Der auf die Probe gezeichnete Kreis geht bei Schubbelastung in eine Ellipse über. Aus der dabei auftretenden geometrischen Veränderung kann der Schubmodul berechnet werden. Die zusätzliche Verformung der Scheibe durch Biegung verursacht einen Fehler beim Schubmodul von höchstens 2%.

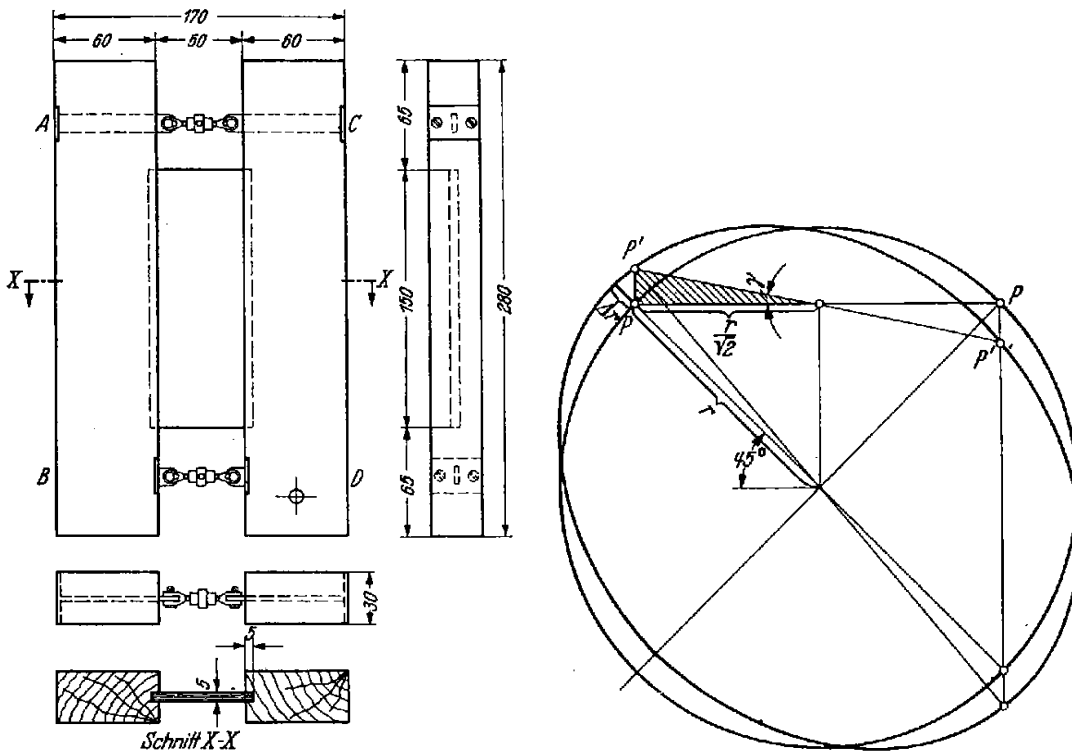


Abb. 7-9: Gelenkrahmen zur Schubmodulbestimmung, [7] S.597

## 7.8 Elastische Kennwerte

Tabelle 7-1: Elastizitätszahlen unterschiedlicher Hölzer [4]

Holzart	Elastizitätszahlen			Elastizitätsmoduln				Anisotropie	Dichte
	$s_{11}$	$s_{44}$	$-s_{23}$	$E_t$	$G_{lr}$	$\nu_{lr}$	$\nu_{rl}$	$E_l/E_t$	$\rho$
	$s_{22}$	$s_{55}$	$-s_{13}$	$E_l$	$G_{tr}$	$\nu_{tr}$	$\nu_{rt}$	$E_r/E_t$	
	$s_{33}$	$s_{66}$	$-s_{12}$	$E_r$	$G_{tl}$	$\nu_{tl}$	$\nu_{lt}$	$\frac{s_{11}+s_{33}+s_{55}+2s_{13}}{4s_{22}}$	
	[Pa <sup>-1</sup> ]			[MPa]   -					g/cm <sup>3</sup>
Laubhölzer									
Balsa	9260	3140	47.4	108	318	.0145	.304	59.4	0.20
<i>Ochroma</i>	156	29800	2190	6410	33.6	.67	.237	2.83	
<i>boliviana</i> Row.	3270	4830	79.8	306	207	.512	.00862	60.8	
Eiche	1015	760	55	985	1320	0.12	0.32	5.9	0.67
<i>Quercus</i>	172	2500	300	5810	400	0.656	0.296	2.22	
<i>robur</i> L.	457	1280	87	2190	781	0.506	0.0857	4.9	
Mahagoni	1340	1000	26.6	746	1000	.0331	.309	15.6	0.50
<i>Swietenia</i>	86.1	3070	463	11600	326	.576	.346	1.67	
<i>macrophylla</i> King	804	1310	45.7	1240	763	.531	.0341	12.5	
Rotbuche	862	610	32	1160	1640	.0731	.448	12.1	0.72
<i>Fagus</i>	71.4	2150	310	14000	465	.708	.36	1.97	
<i>sylvatica</i> L.	438	929	37	2280	1080	.518	.0429	9.91	
Walnuß	1560	1020	42.9	641	980	.052	.489	17.8	0.59
<i>Juglans</i>	87.6	4270	585	11400	234	.709	.375	1.89	
<i>regia</i> L.	824	1400	55.7	1210	714	.635	.0357	15.7	
Nadelhölzer									
Fichte	2500	1590	27	400	628	.0188	.438	40.6	0.44
<i>Picea abies</i>	61.6	27000	600	16200	37	.419	.24	1.75	
Karst.	1430	1290	33	699	775	.535	.0132	121	
Kiefer	1720	563	28	581	1780	.0315	.465	28.6	0.54
<i>Pinus</i>	60.2	14800	540	16600	67.6	.607	.314	1.93	
<i>sylvestris</i> L.	890	1460	27	1120	685	.449	.0157	67.8	
Sitkafichte	1960	1310	31.5	510	763	.0289	.372	23.2	0.39
<i>Picea</i>	84.6	25200	480	11800	39.7	.44	.245	1.8	
<i>sitchensis</i> Carr.	1090	1360	39.5	917	735	.467	.0202	80.6	



Durch einen Vergleich der elastischen Kennwerte untereinander, lässt sich die anisotrope Materialeigenschaft von Holz gut abbilden. Die E- und G-Module und Querkontraktionszahlen weisen folgende Größenverhältnisse auf:

Elastizitätsmodul:	$E_T$	:	$E_R$	:	$E_L$						
Nadelholz:	1	:	1,7	:	20						
Laubholz:	1	:	1,7	:	13						
Schubmodul:	$G_{TL}$	:	$G_{LR}$	:	$G_{TR}$						
Nadelholz:	1	:	1	:	0,1						
Laubholz:	1	:	1,3	:	0,4						
Querkontraktion:	$\nu_{TL}$	:	$\nu_{RL}$	:	$\nu_{TR}$	:	$\nu_{LR}$	:	$\nu_{LT}$	:	$\nu_{RT}$
Nadelholz:	1	:	1,6	:	8,9	:	11,7	:	15,8	:	17,1
Laubholz:	1	:	1,7	:	8,4	:	11,4	:	12,1	:	16,5

## 7.9 Dynamische Elastizitätsmodule

Die Bestimmung der E-Module ist auch mit Hilfe der Schwingungslehre möglich. Die dabei erhaltenen E-Module haben aber stets höhere Werte als aus statischen Versuchen. Dies wird mit der Hysterese und der statischen Nachwirkung, da stets elastische und geringe plastische Dehnungen im statischen Verfahren auftreten, begründet. Mit dem dynamischen Verfahren können jedoch keine Querdehnungszahlen bestimmt werden.

Tabelle 7-2: Biege-E-Modul von Kiefernholz, statisch und dynamisch bestimmt, [7] S.593

Holzfeuchtigkeit %	Temperatur °C	Biege-Elastizitätsmodul $E_B$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	
		statisch	dynamisch
9	+22	130000	133000
9	-40	145000	150000
20	+22	113000	114000
20	-17	130000	135000
30	+22	108000	109000
30	-17	138000	140000
50	+22	109000	110000
50	-40	167000	175000

# 7.10 Abhängigkeit der elastischen Eigenschaften

## 7.10.1 Einfluss der Rohdichte

Aus Großzahluntersuchungen ist eine Abhängigkeit der Dehnungszahlen von der Rohdichte und somit vom Feuchtigkeitsgehalt feststellbar. Analog zur Rohwichte (5.2) können die E-Module ( $E_{Zug}, E_{Druck}, E_{Biegung}$ ) in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit und dem Spätholzanteil beschrieben werden.

$$E_{u_2} = E_{fu_2} + (E_{su_2} - E_{fu_2}) \cdot s \quad (7.11)$$

$E_{u_2}$  ... E-Modul bei der Feuchtigkeit  $u_2$

$E_{fu_2}$  ... E-Modul des Frühholzes bei der Feuchtigkeit  $u_2$

$E_{su_2}$  ... E-Modul des Spätholzes bei der Feuchtigkeit  $u_2$

$s$  ... Spätholzanteil

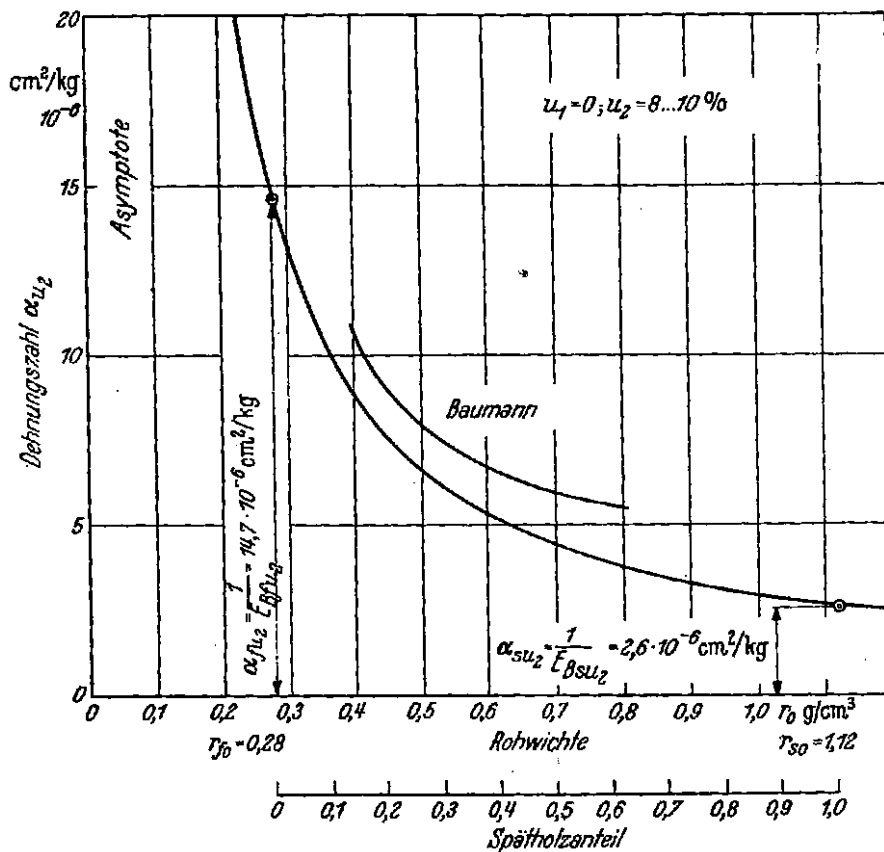


Abb. 7-10: Einfluß der Rohdichte und dem Spätholzanteil auf die Dehnungszahl

$$\alpha_{u_2} = \frac{1}{E_{Bu_2}}, \quad [7] \text{ S.599}$$

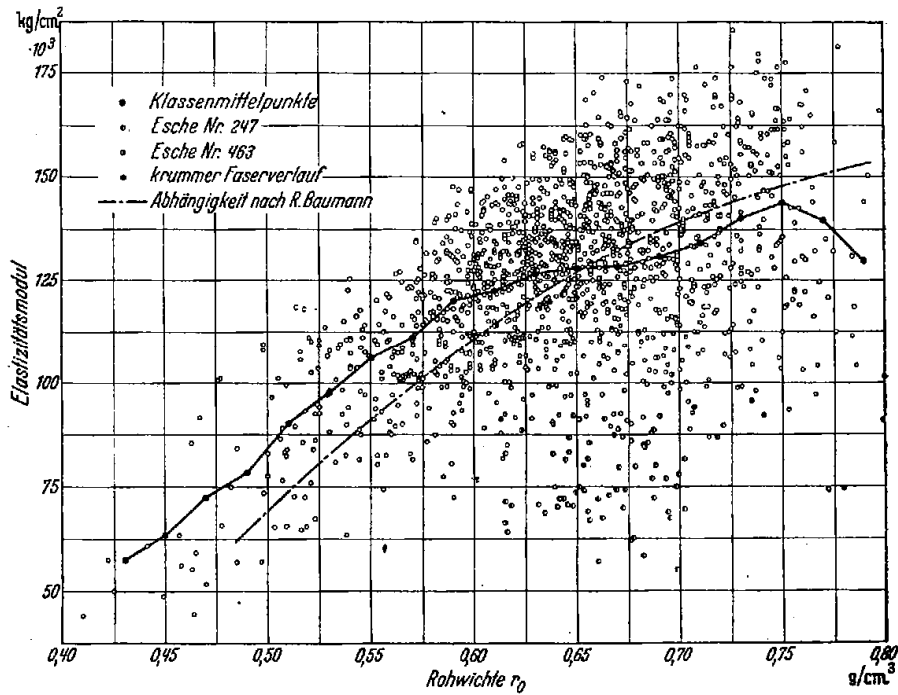


Abb. 7-11: Zusammenhang zwischen E-Modul und Rohdichte, Eschenholz, [7] S.601

## 7.10.2 Streuung der E-Module

Durch die Vorsortierung nach Sortierklassen kann die Streuung der E-Module eingeschränkt werden. Eine Vorsortierung kann aus visueller oder maschineller Sortierung (Erkennung von Holzfehler) bestehen. Für Brett-schichtholz (BSH), auch Leimbinder genannt, kann durch die Bestimmung des  $E_B$  der einzelnen Brettes der  $E_{BSH}$  für den fertigen Balken bestimmt werden.

Die elastischen Konstanten werden aus einer größeren Probenzahl statistisch ausgewertet.

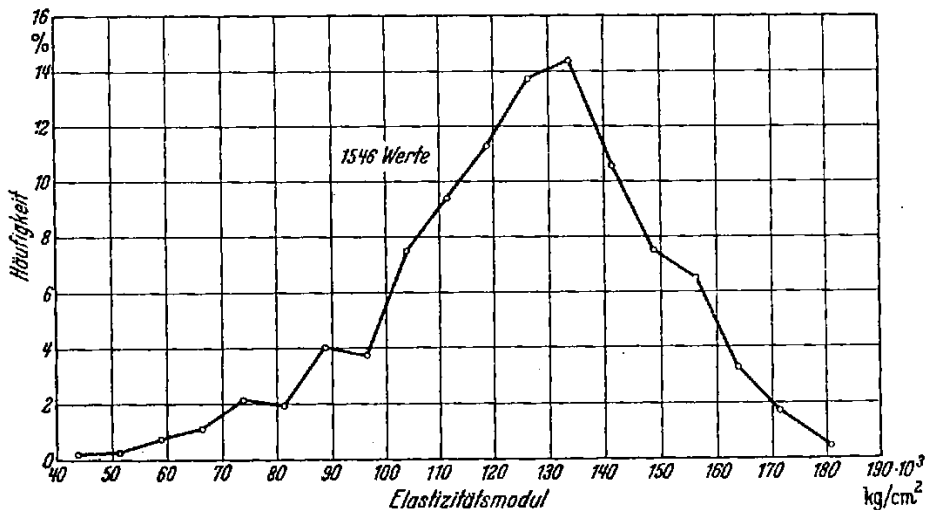


Abb. 7-12: Häufigkeitsverteilung des E-Moduls von Eschenholz, [7] S.602

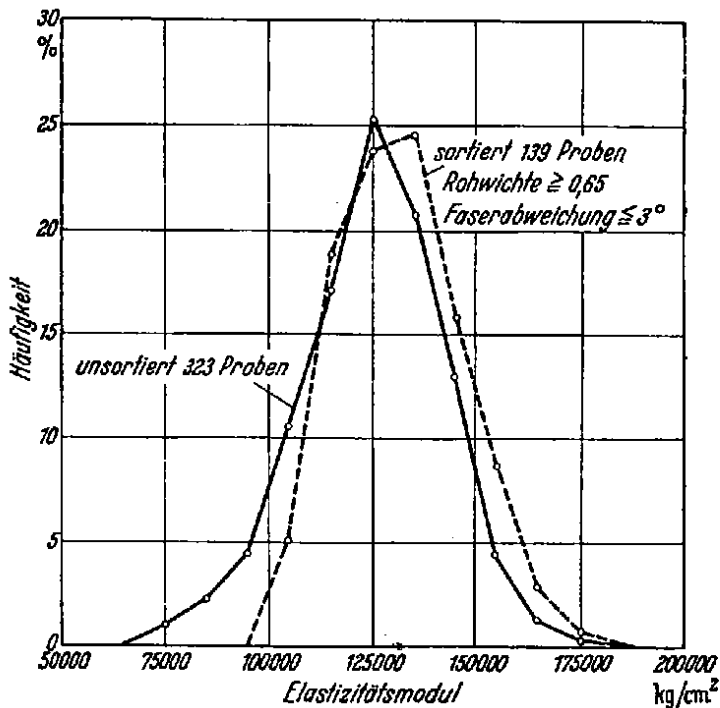


Abb. 7-13: Häufigkeitsverteilung E-Modul-Eschenholz, sortiert und unsortiert, [7] S.603

### 7.10.3 Einfluss der Ästigkeit

Äste im Werkstoff Holz haben einen großen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Durch tote Äste im Holz kommt es zu einer Schwächung des Querschnittes, die sich besonders bei Zugbelastung auswirkt. Aber auch verwachsene Äste verändern die mechanischen Eigenschaften, da sie lokal, wegen des feineren Jahrringaufbaues, nicht nur die Rohdichte und den E-Modul beeinflussen sondern auch den geradlinigen Faserverlauf stören. Daher werden im Ingenieurbau und in der Materialprüfung Äste im Holz entsprechend ausgesondert.

### 7.10.4 Holzfeuchtigkeit

Die Holzfeuchtigkeit hat einen außerordentlich großen Einfluss auf die elastischen Eigenschaften. Es wird dabei zwischen dem Einfluss unter konstantem und wechselndem Klima unterschieden. Speziell das wechselnde Klima und damit das mechano-sorptive Kriechen stellt z. Z. eine der großen Herausforderung für die Materialforschung dar. Auf das Phänomen des mechano-sorptiven Kriechens wird später noch genauer eingegangen.

In Kurzzeitversuchen ist ein Abfall der E-Module bis zum Fasersättigungspunkt feststellbar. Über dem Fasersättigungspunkt bleibt der E-Modul konstant bzw. nimmt er schwach wieder zu.

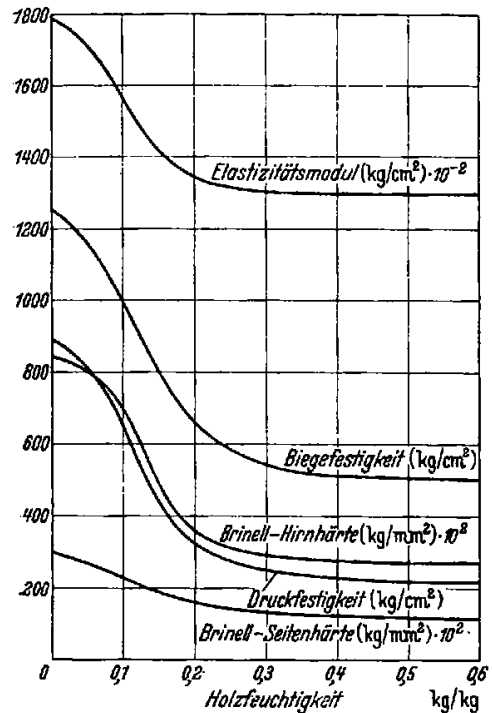
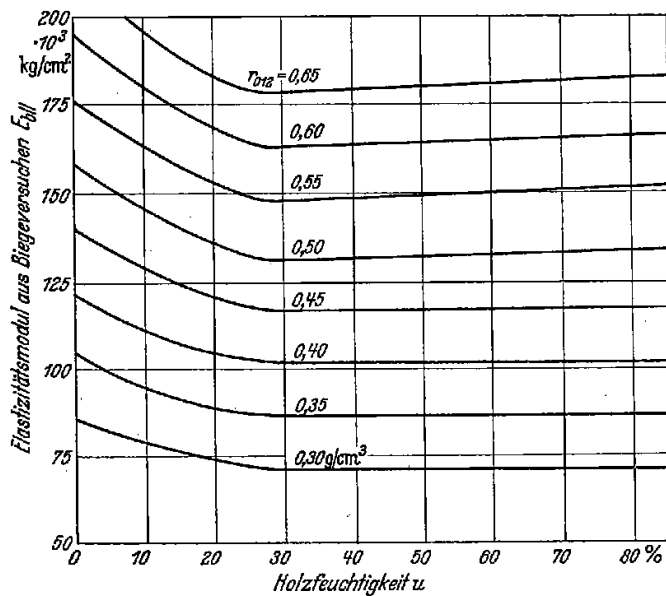


Abb. 7-14: Zusammenhang zwischen Holzfeuchtigkeit und E-Modul bei verschiedener Raumdicthe bzw. zwischen Holzfeuchtigkeit und Festigkeit, Kiefernholz, [7] S.608 und S.395

## 7.10.5 Temperatur

Durch die Temperatur werden nicht nur das Klima und damit die Holzfeuchtigkeit sonder auch direkt das elastische Verhalten von Holz beeinflusst. Die elastischen Eigenschaften werden dabei durch die thermische Expansion und damit verbundene Gitteränderung und durch die molekulare Wärmebewegung beeinflusst.

Mit zunehmender Temperatur, in der Regel ab ca. 20°C, kann eine Abnahme der E-Module festgestellt werden. Vor allem senkrecht zur Faser findet eine starke Abnahme statt.

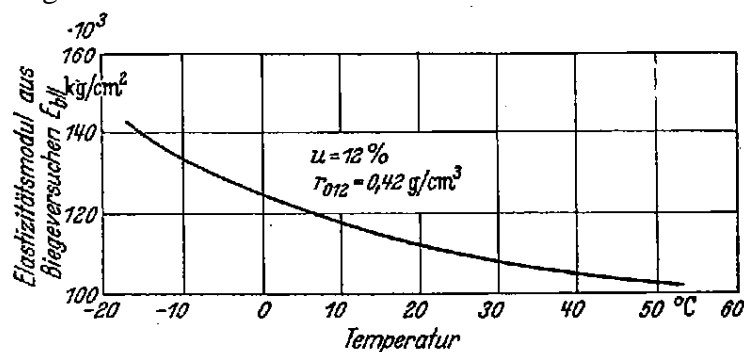


Abb. 7-15: Zusammenhang Biege-E-Modul und Temperatur, Kiefernholz, [7] S.609

Auch die Festigkeit nimmt mit zunehmender Temperatur ab. Die Festigkeit reduziert sich bei 100°C im Vergleich zu 20°C nach Niemz [9] wie folgt:

Tabelle 7-3: Festigkeitsabnahme unter Temperatureinfluss [9]

<b>Festigkeitsart</b>	<b>Bauteilabmessung</b>	<b>Kleine Probe</b>
Zugfestigkeit	92%	49%
Druckfestigkeit	56%	89%
Biegefestigkeit	72%	45%

Besonderen Brandschutz bieten Holzstrukturen im Vergleich zu Stahlstrukturen. Da Holz eine geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt und bei Beflammung eine dämmende Holzkohleschicht bildet hat Holz einen höheren Feuerwiderstand als Stahl, welcher mit zunehmender Temperatur zu fließen beginnt und keinen Widerstand mehr leisten kann. Das Resttragvermögen von Holzstrukturen, welches durch die verbleibende innere Querschnittsstruktur abgebildet wird, ist daher wesentlich größer im Vergleich zu Stahl, bei dem der gesamte Querschnitt plastifiziert ist.

## 7.11 Holzvergütung

Unter Holzvergütung bei Vollholz werden künstliche Maßnahmen verstanden, die eine Erhöhung der Holzeigenschaften zur Folge haben.

### 7.11.1 Pressvollholz

Das Pressvollholz, welches aus Vollholz unter hohem Druck und Temperatur erzeugt wird, besitzt eine höhere Rohdichte und somit höhere mechanische Eigenschaften als das unverdichtete Ausgangsmaterial.

### 7.11.2 Formvollholz

Der Ursprung dieser Vergütung liegt in der industriellen Buchenholzverarbeitung im 19. Jahrhundert (Thonet Bugholzmöbel). Bei Bugholz wird das gedämpft bzw. gekochte Buchenholz in einer Vorrichtung verformt und abgekühlt. Nach Abkühlung bleibt die Form erhalten. Wesentlich ist bei diesem Verfahren, dass über den gesamten Querschnitt keine Zugspannungen sondern nur Druckspannungen auftreten. Dies wird mit einer speziellen Vorrichtung, in der Metallaschen die Biegezugspannungen übernehmen, gewährleistet. Somit unterliegt der Holzquerschnitt einer reinen Stauchung und das Holz lässt sich ohne Zerstörung verformen.

Dieses Verfahren kann in leicht abgewandelter Form auch auf Nadelholz angewandt werden. Der Unterschied und somit Vorteil gegenüber dem Pressvollholz liegt darin, dass durch den Wasserdampf die Wärme rascher und tiefer in das Holz eindringt und somit das Holz über einen größeren Teil des Querschnittes vergütet werden kann.

### 7.11.3 Metallholz

Diese Vergütung erfolgt durch das Tränken von Vollholz in tiefschmelzenden Metallen und Legierungen. Sie wird zur Verbesserung der Oberflächenbeschaffenheit von Holz (Rauigkeit) angewandt. Metallholz wird im Lagerbau als Gleitlager eingesetzt. Die elastischen Eigenschaften werden dadurch unwesentlich verändert.

# 8 Rheologisches Verhalten von Holz

Unter rheologischem Verhalten wird das zeitabhängige Materialverhalten verstanden, welches durch ein Fließverhalten des Werkstoffes gekennzeichnet ist. In der Materialmechanik drückt sich dieses Verhalten durch das Kriechen und die Spannungsrelaxation aus. Dieses Langzeitverhalten eines Werkstoffes wird speziell im Ingenieurbau bei Holz (aber auch bei Beton) unter vorwiegend statischer Dauerbeanspruchung berücksichtigt. Weniger Bedeutung kommt der Spannungsrelaxation, worunter die Abnahme der Spannung über die Zeit bei konstanter Verformung verstanden wird, zu. Eine höhere Bedeutung hat das Kriechen, worunter die Zunahme der Verformung über die Zeit bei konstanter Spannung verstanden wird, da dieses Auswirkungen auf die Gebrauchstauglichkeit einer Struktur hat. Es ist jedoch zu beachten, dass das Kriechen in den Bemessungsnormen sehr grob berücksichtigt wird, da die exakte mechanische Beschreibung von vielen Parametern (Belastungsart, -grad, Feuchtigkeit, Temperatur, Wechselklima) abhängig ist. Der Aufwand bei der Bemessung alle Parameter zu berücksichtigen wäre, gemessen am Ergebnis und Nutzen, viel zu hoch.

## 8.1 Kriechen von Holz

Aufgrund des anisotropen und feuchtigkeitsabhängigen mechanischen Verhaltens von Holz wird dieses von folgenden Faktoren beeinflusst.

### 8.1.1 Belastungsart

Abhängig von der Belastungsart (Zug, Druck, Biegung, Schub und Torsion) ist das Kriechverhalten von Holz unterschiedlich. Am geringsten ist das Kriechen unter Zugbelastung in Faserrichtung. Größer ist das Kriechen unter Biegebelastung und weiter unter Druck in Faserrichtung. Am größten ist das Kriechen unter Schub- und Torsionsbelastung. Nach Gressel [2] ist senkrecht zur Faser (T, R) Druckkriechen auch größer als Zugkriechen.

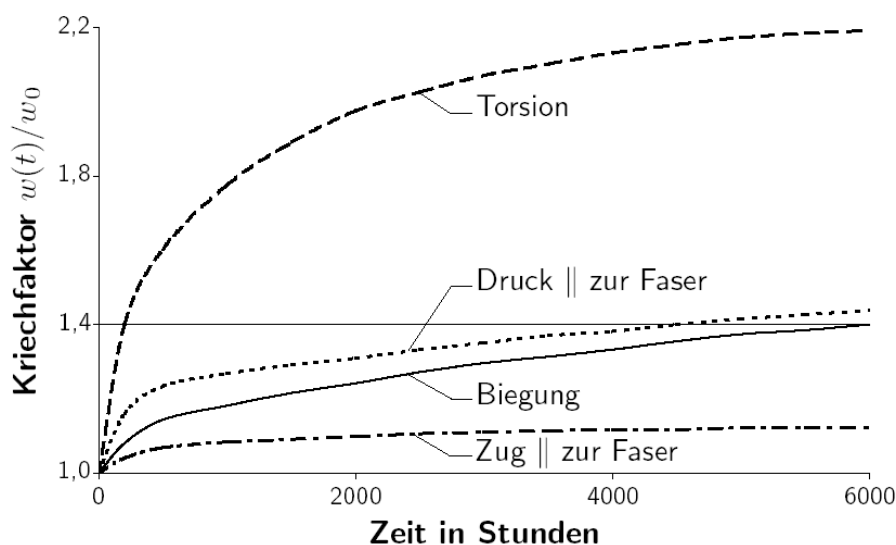


Abb. 8-1: Einfluss der Belastungsart auf die Kriechverformung, [10]

In Abb. 8-1 werden die am häufigsten vorkommenden Belastungsarten, nämlich parallel zur Faser, miteinander verglichen. Analog dazu kann das Kriechen in den anderen Hauptrichtungen (R, T) in ähnlicher Weise abhängig von der Belastungsart angenommen werden. Zahlreiche genauere Untersuchungen dazu sind bis jetzt noch nicht in großem Umfang vorhanden.

Wegen der großen Bedeutung von Biegebalken im Holzbau wurden Kriechversuche unter Biegebeanspruchung bis jetzt am häufigsten durchgeführt. Ebenso kennen die Bemessungsnormen nur die Berücksichtigung des Kriechens bei Biegebalken, und zwar in der Form, dass der Biege-E-Modul aus dem statischen Kurzzeitversuch (Kurzzeitmodul) entsprechend abgemindert wird. Dies stellt eine sehr grobe Näherung des tatsächlichen Kriechverhaltens dar.

### 8.1.2 Belastungsgrad

Der Belastungsgrad, welcher das Verhältnis zwischen aufgebrachtter Belastung und Bruchlast angibt, hat ebenso einen entscheidenden Einfluss auf das Kriechen. Nach Gressel [3] kann bis zu einem Belastungsgrad von 50% lineares viskoelastisches Verhalten bei Fichte im Innenklima angenommen werden. Die Grenze für lineares viskoelastisches Verhalten bei Vollholz liegt, abhängig von der Belastungsart und dem Feuchtigkeitsgehalt, in einem Belastungsgrad-Bereich von ca. 30 bis 80%. Aufgrund dieser großen Streuung ist die Grenze für das lineare viskoelastische Verhalten, und das davon abhängige Boltzmann'sche Überlagerungsprinzip, einsatzgerecht zu bestimmen und zu berücksichtigen.

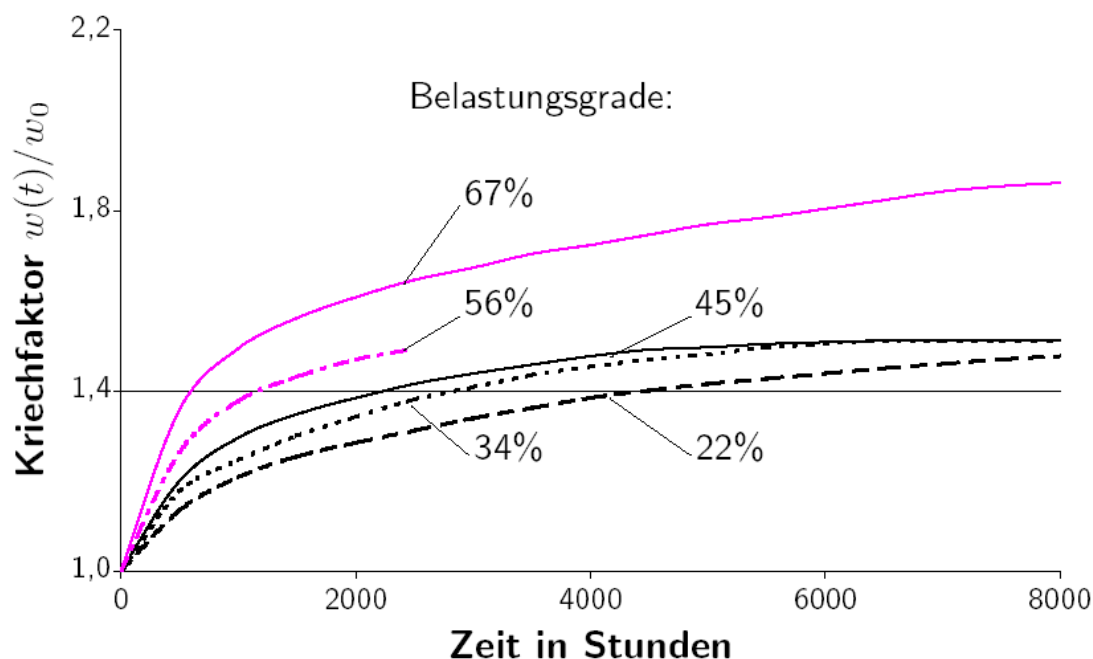


Abb. 8-2: Einfluss des Belastungsgrades auf die Kriechverformung, [10]

### 8.1.3 Feuchtigkeit

Das Kriechverhalten von Holz wird besonders durch den Feuchtigkeitsgehalt des Holz und des Umgebungsklimas beeinflusst. Ausgehend vom geringsten Kriechen bei relativ trockenem Innenklima nimmt das Kriechen mit zunehmender Feuchtigkeitsbelastung zu.



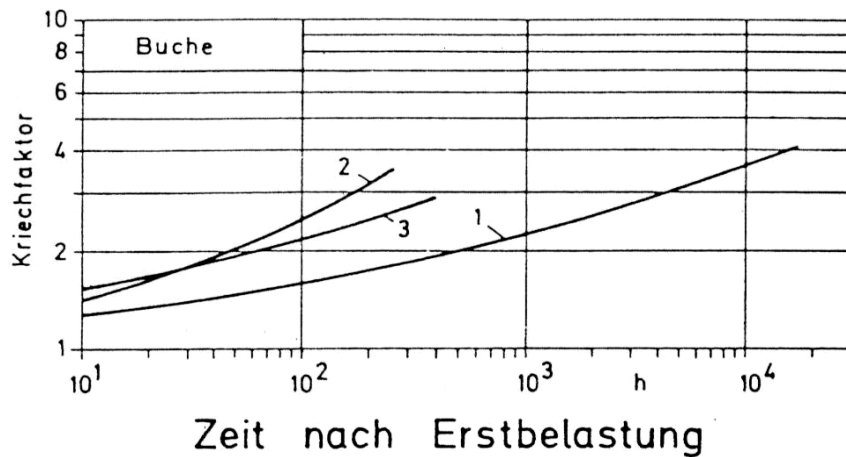


Abb. 8-3: Einfluss der Klimabeanspruchung auf den Kriechfaktor  $f_t / f_0$  von Buche; Belastungsgrad 33 %, 1 = natürliches Außenklima unter Dach, 2 = Wechselklima 20°C/95% rel. LF – 20°C/25 rel. LF und 3 = konstantes Feuchtigkeitsklima 20/95, [3]

In Abb. 8-3 ist der zunehmende Kriechfaktor im Fall 2 (Wechselklima) bei längerer Beobachtung erkennbar.

### 8.1.4 Temperatur

Ebenfalls wie bei Feuchtigkeit nimmt das Kriechen mit zunehmender Temperatur zu. In der Regel wird der Temperatureinfluss durch den Feuchtigkeitseinfluss überlagert und kann dadurch kaum getrennt berücksichtigt werden.

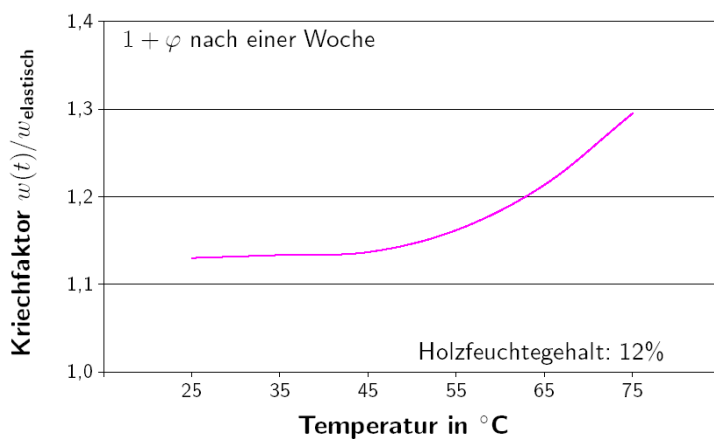


Abb. 8-4: Einfluss der Temperatur auf die Kriechverformung, [10]

### 8.1.5 Wechselklima

Das Wechselklima, worunter die Veränderung des Feuchtigkeitsgehaltes verstanden wird, hat den größten Einfluss auf das Kriechen. Dieses Kriechen unter mechanischer Belastung und Wechselklima wird als mechano-sorptives Kriechen bezeichnet. Der Einfluss besteht darin, dass das Kriechen bei Wechselklima, abhängig von den Feuchtigkeitsschwankungen, sehr viel größer ist als bei Konstantklima. Das mechano-sorptive Kriechen ist gekennzeichnet durch:

1. Keine Abhängigkeit von der Zeit sondern nur vom Wechsel der Holzfeuchtigkeit.

2. Sowohl bei Sorption als auch bei Desorption nimmt das Kriechen, im Vergleich zum Kriechen bei konstanter Feuchtigkeit, deutlich zu.

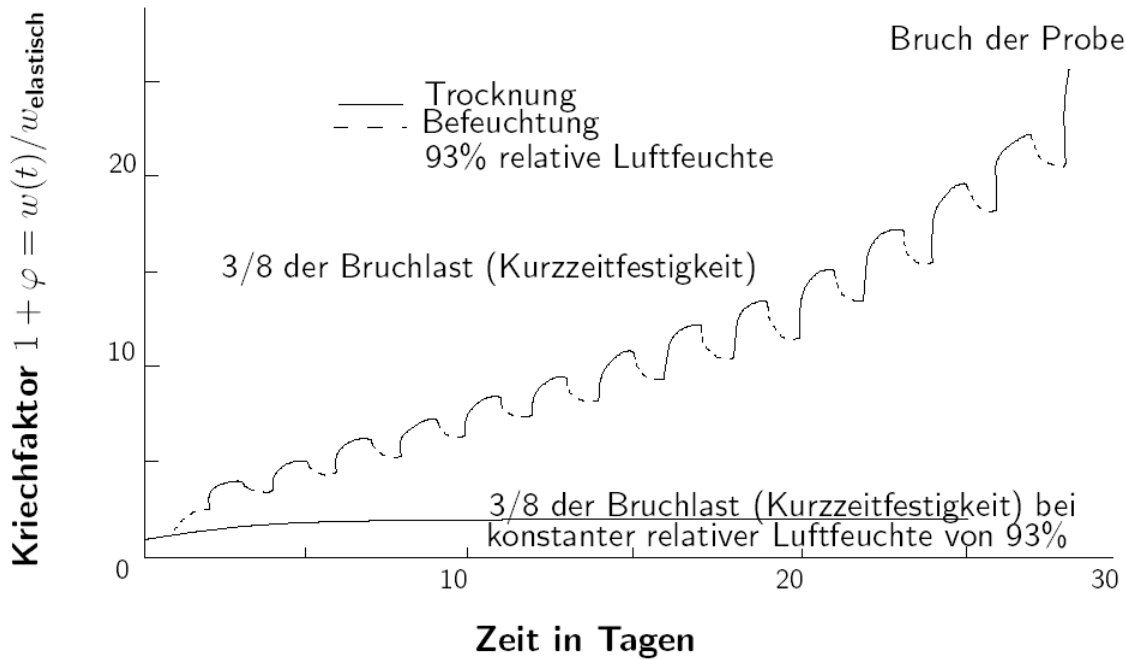


Abb. 8-5: Einfluss der Feuchtigkeitsänderung auf die Kriechverformung, [10]

## 8.2 Kriechen im submikroskopischen Bereich

Für das Kriechen im submikroskopischen Bereich gibt es zwei Theorien, die auf molekularer Basis aufbaute und die durch den Zellwandaufbau bedingte.

1. Auf molekularer Basis [8] wird angenommen, dass das Kriechen durch das Brechen von Wasserstoffbindungen und das Wiederherstellen dieser Verbindungen zwischen den Zelluloseketten verursacht wird.

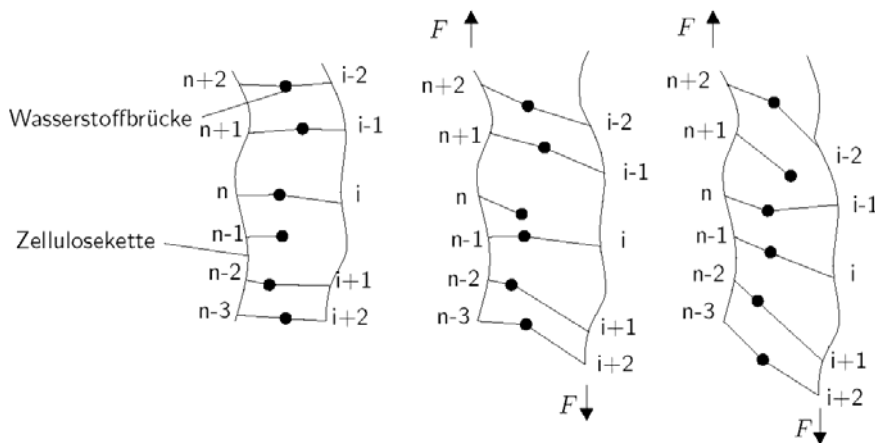


Abb. 8-6: Kriechvorgang durch Verschiebung der Zelluloseketten, [10]

2. Die auf den Zellwandaufbau beruhende Theorie [1] stützt sich auf ein angenommenes Gel in der mittleren Schicht (S2), das sich hygrisch, viskos und stark quellend und schwindend verhält.

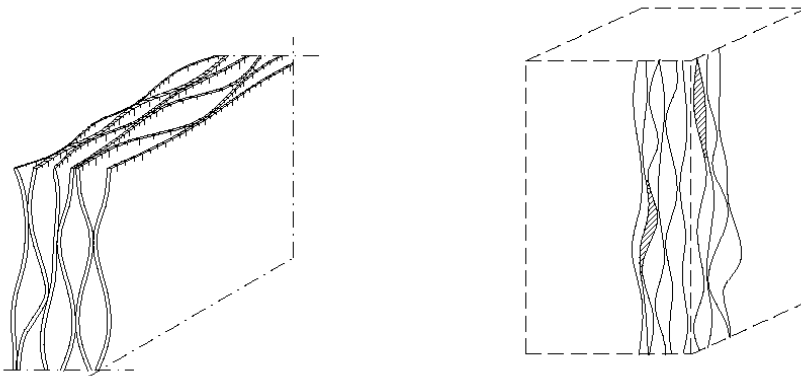


Abb. 8-7: Zellwandaufbau mit Gel, [10]

## 8.3 Rheologische Werkstoffmodelle für Holz

Um, z. B. die oben aufgezeigten, Kriecheigenschaften eines Werkstoffes mechanisch zu beschreiben sind entsprechende Werkstoffmodelle erforderlich. Sie geben dabei das elastische und viskose Verhalten eines Stoffes wieder und sind für linear und nichtlinear viskoelastische Werkstoffe entwickelt worden.

### 8.3.1 Linear viskoelastisches Materialverhalten

Einem Material kann lineares viskoelastisches Verhalten unterstellt werden, wenn bei Kriechversuchen für verschiedene Belastungsspannungen die gleiche Nachgiebigkeitsfunktion gefunden wird. Analog dazu müssen Relaxationsversuche bei verschiedenen Belastungsdehnungen auf die gleiche Relaxationsfunktion führen. Dies konnte für Holz bis zu gewissen Belastungsgraden, siehe 8.1.2, nachgewiesen werden.

Die Voraussetzungen für die lineare Viskoelastizität sind kleine Deformationen, wodurch ein linearer Verzerrungstensor ( $grad \mathbf{u} = \partial u_i / \partial x_j \mathbf{e}_i \otimes \mathbf{e}_j$ ) Berücksichtigung findet, und ein lineares Materialverhalten für den elastischen ( $\sigma = E \cdot \varepsilon$ ) und inelastischen ( $\sigma = \eta \cdot \dot{\varepsilon}$ ) Dehnungsanteil. Der elastische Anteil wird durch das Hookesche Gesetz und der inelastische Anteil durch eine geschwindigkeits-/ratenabhängige ( $\dot{\varepsilon}$ ) und viskose ( $\eta$ ) Beziehung beschrieben. Mit diesen Annahmen ist das Superpositionsprinzip von Boltzmann gültig, welches die Überlagerung von Materialantworten zufolge zeitlich verschiedener Belastungen und unterschiedlicher Belastungsgrößen erlaubt.

### 8.3.2 Kriechen bei konstantem Klima

Die Beschreibung des Kriechens bei konstantem Klima ist wie bei anderen Werkstoffen mit den Materialmodellen von Maxwell und Kelvin oder mit Gedächtnisintegralen und inneren Variablen möglich.

Als Beispiel wird das Kriechen an einer Zugprobe aus Fichtenholz in radialer Richtung näher betrachtet. Als Werkstoffmodell wird eine Kelvin-Kette als fünf Parametermodell gewählt.

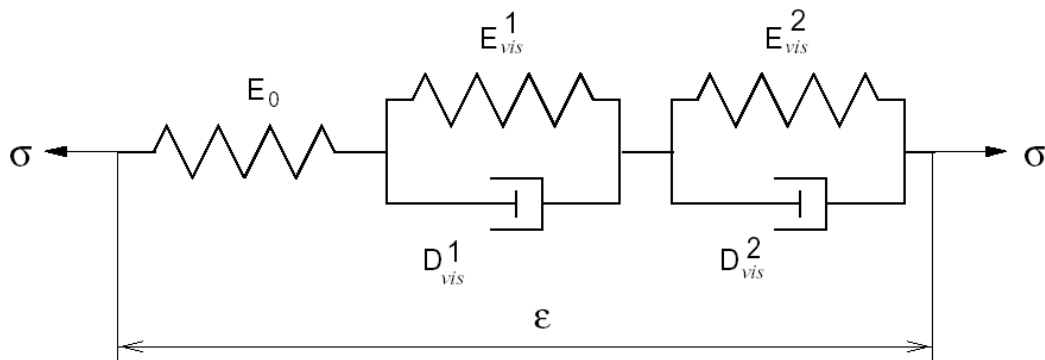


Abb. 8-8: Viskoelastisches Materialmodell mit fünf Parametern, [4]

Mit diesem Modell wird bei der Approximation der Kriechkurve ein Fehler von 12% erzeugt. Der Fehler kann durch eine höhere Anzahl von Kelvin-Elementen im Modell noch verringert werden.

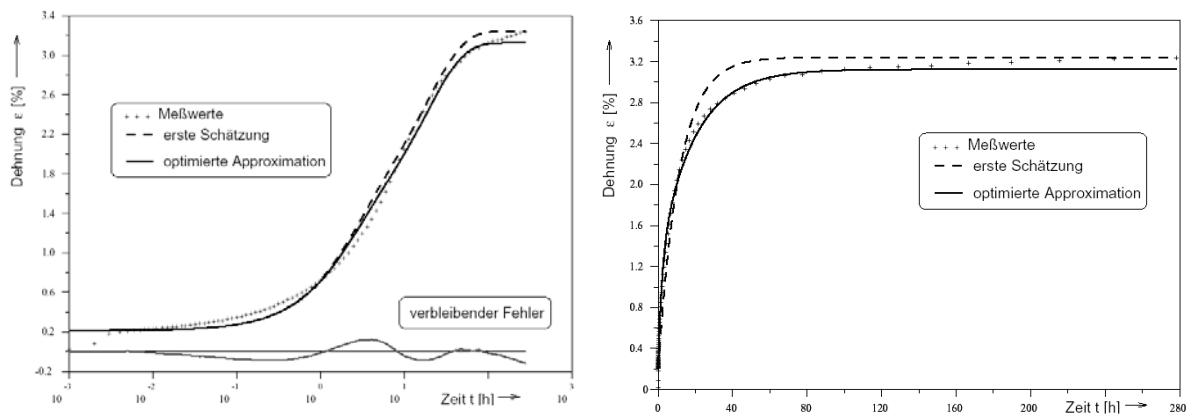


Abb. 8-9: Approximierte Kriechkurven, [4]

### 8.3.3 Verallgemeinertes Werkstoffmodell

Nach Grimsel [4] ist das Verformungsverhalten von Holz eine explizite Funktion der:

- mechanischen Spannungen  $\sigma$
- Feuchtigkeit  $X$
- Temperatur  $T$  und
- Zeit  $t$

Die auftretenden nichtlinearen Effekte von Spannungen, Feuchtigkeit und Temperatur sind im Allgemeinen vernachlässigbar.

Somit ist die Gesamtdehnung  $\varepsilon = \varepsilon(t, T, X)$  eine Funktion der Zeit, Temperatur und Feuchtigkeit. Sie besteht aus

- einem elastischen Anteil  $\varepsilon_{el}$
- einem plastischen Anteil  $\varepsilon_{pl}$
- einem viskoelastischen Anteil  $\varepsilon_{vis}$
- einem mechano-sorptiven Anteil  $\varepsilon_{ms}$
- der thermischen Ausdehnung  $\varepsilon_T$  und
- der feuchtigkeitsbedingten Schwindung  $\varepsilon_X$

und lässt sich darstellen durch:

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{vis} + \varepsilon_{ms} + \varepsilon_T + \varepsilon_X \quad (8.1)$$

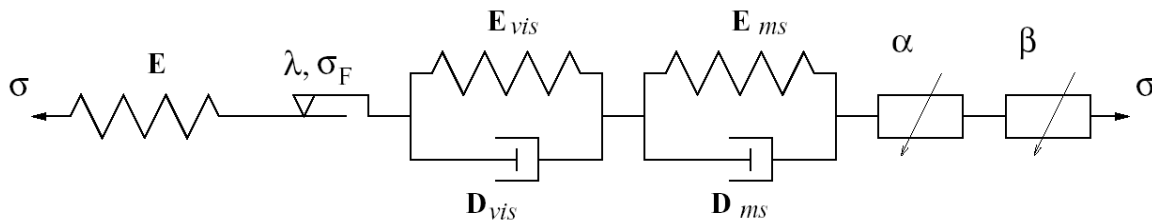


Abb. 8-10: Phänomenologisches Werkstoffmodell, [4]

Das zugehörige phänomenologische Werkstoffmodell berücksichtigt die o. a. Dehnungsanteile, durch folgende Ansätze:

elastischer Anteil:

$$\varepsilon_{el} = E_{el}^{-1}(T, X) \cdot \sigma(t)$$

plastischer Anteil:

$$\frac{\partial \varepsilon_{pl}}{\partial t} = \begin{cases} 0 & \text{für } \sigma(t) < \sigma_F \\ \lambda \sigma & \text{für } \sigma(t) = \sigma_F \end{cases}$$

viskoelastischer Anteil:

$$\frac{\partial \varepsilon_{vis}}{\partial t} = D_{vis}^{-1}(T, X) \cdot (\sigma(t) - E_{vis}(T, X) \cdot \varepsilon_{vis})$$

mechano-sorptiver Anteil:

$$\frac{\partial \varepsilon_{ms}}{\partial X} = D_{ms}^{-1}(T, X) \cdot (\sigma(t) - E_{ms}(T, X) \cdot \varepsilon_{ms})$$

thermischer Anteil:

$$\varepsilon_T = \alpha(T, X) \cdot (T - T_0)$$

feuchtigkeitsbedingter Anteil:

$$\varepsilon_X = \beta(T, X) \cdot (X - X_0)$$

In dieser Form sind alle Parameter Funktionen der Temperatur  $T$  und Feuchtigkeit  $X$ .

### 8.3.4 Mechano-sorptives Kriechen

Mit diesem verallgemeinerten Werkstoffmodell kann, mit der Vereinfachung konstante Temperatur und Belastung, unterhalb der Plastizitätsgrenze das mechano-sorptive Kriechen beschrie-

ben werden. In Abb. 8-11 wird das qualitative Materialverhalten des Modells mit dimensionslosen Parametern gezeigt.

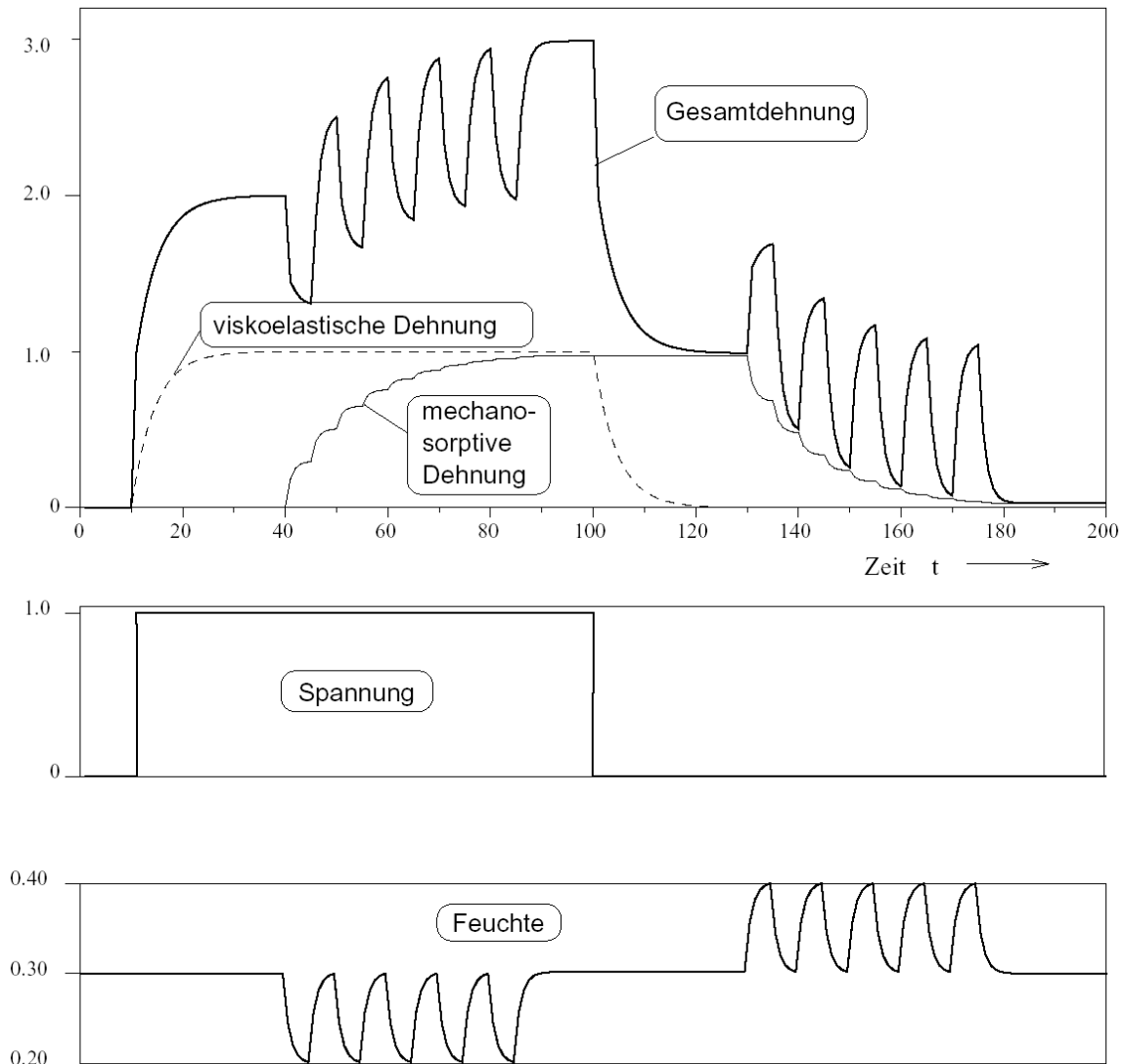


Abb. 8-11: Phänomenologie des mechano-sorptiven Kriechens, [4]

Zeit	Spannung	Feuchte	Dehnung
t=10	$\sigma = 1$	$X = 0,3$	spontane elastische Dehnung $\varepsilon = 1$ mit anschließendem Kriechen $\varepsilon = 2$
t=40	$\sigma = 1$	$X = 0,3 \leftrightarrow 0,2$	sofortiges Schwinden und Quellen mit zusätzlichem mechano-sorptiven Kriechen (=Dehnungszunahme während des Feuchtigkeitszyklus)
t=90	$\sigma = 1$	$X = 0,3$	trotz des Ausgleichs aller Schwind- und Quellvorgänge ist das Kriechen auf $\varepsilon = 3$ angestiegen
t=100	$\sigma = 0$	$X = 0,3$	Abnahme der Dehnung um den elastischen Anteil mit anschließendem Abklingen der viskoelastischen Dehnung bis zur akkumulierten mechano-sorptiven Dehnung
t=130	$\sigma = 0$	$X = 0,3 \leftrightarrow 0,4$	Abnahme der akkumulierten mechano-sorptiven Dehnung bis $\varepsilon = 0$

# **9 Ausblick**

## **9.1 Biegekriechen**

Aufgrund der unterschiedlichen Druck- und Zug-E-Module kommt es nicht zu einem linearen Spannungsverlauf nach Navier. Nach E. Suenson [11] kann der angenäherte Spannungsverlauf durch eine Parabel, im Druckbereich, und eine Gerade im Zugbereich angenähert werden. Analog dieser Näherung soll das Biegekriechen durch gemessene Kriechmodule für Zug und Druck nachgebildet werden.

## **9.2 Kriechvorhersage durch Temperatur-Zeit-Beziehung**

An darrtrockenem Holz soll mit dieser Beziehung die Kriechvorhersage untersucht werden. Auch soll darauf aufbauend die Beziehung um den Feuchtigkeitsanteil erweitert und untersucht werden.

## **9.3 Biegekriechen an ungeleimten und geleimten Balken**

Mit diesem Versuch soll der Einfluss von Leimfugen auf das Kriechverhalten gezeigt werden. Dazu werden Balken mit extremalen Feuchtigkeitszuständen (darrtrocken, fasergesättigt) untersucht.

## **9.4 Anisotrope linear viskoelastische Modelle**

Ausgehend von den Ansätzen der eindimensionalen linear viskoelastischen Modelle werden diese in dreidimensionale Modelle übergeführt. Dazu wird das anisotrope linear elastische Verhalten zunächst mit dem isotropen linear viskoelastischen Materialverhalten und weiter, stufenweise bis zum anisotropen linear viskoelastischen Verhalten erweitert.

## 10 Literaturverzeichnis

- [1] Boyd, *An anatomical explanation for visco-elastic and mechano-sorptive creep in wood, and effects of loading rate on strength*, In: *New perspectives in wood anatomy*, Den Haag, 1982, S.171-222
- [2] Gressel, P.: *Erfassung, systematische Auswertung und Ergänzung bisheriger Untersuchungen über das rheologische Verhalten von Holz und Holzwerkstoffen – Ein Beitrag zur Verbesserung des Formänderungsnachweises nach DIN 1052 „Holzbauwerke“*. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Fridericiana Karlsruhe, 1993
- [3] Gressel, P.: *Kriechverhalten von Holz und Holzwerkstoffen*. In: *bauen mit holz*, 1994, S.216-223
- [4] Grimsel, M.: *Mechanisches Verhalten von Holz*. Dissertation, 1998
- [5] Hörig, H.: *Annalen der Physik*. 5. Folge, Bd. 43, 1943
- [6] Hörig, H.: *Ingenieur Archiv*. Bd. 7, 1936
- [7] Kollmann, F.: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. (Bd.1), 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1982
- [8] Morlier und Palka, *Creep in Timber Structures*, Rilem Publications, 1994
- [9] Niemz, P., *Physik des Holzes*. ETH-Zürich, 2004
- [10] Schänzlin, J.: *Zum Langzeitverhalten von Brettstapel-Beton-Verbunddecken*, Dissertation, 2003
- [11] Suenson, E., *Holz als Roh- und Werkstoff*, (Bd.4), 1941, S. 305
- [12] Ylinen, A.: *Holz als Roh- und Werkstoff*, Bd. 5, 1942



**Beiträge zur Materialtheorie**

**Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Lion**

**Universität der Bundeswehr München**

**ISSN 1862-5703**

---

In dieser Reihe sind bisher folgende Hefte erschienen:

1/07      RETKA, J., HÖFER, P.  
Numerische Simulation aushärtender Klebstoffe