

## Strukturen und Eigenschaften des Holzes

Von Edgar Denninger, Stuttgart

Holz ist mengenmäßig gesehen das weitaus häufigste Naturprodukt (Cellulose die häufigste organische Verbindung), denn nach Schätzungen wiegt die ganze heutige Pflanzenwelt insgesamt mehr als 2 000 mal soviel wie die gegenwärtig lebenden Tiere und Menschen zusammengenommen.

Holz ist einer der ältesten Werkstoffe, der benutzt wird. Der Mensch hatte wohl sehr bald erkannt, daß sich die Hölzer der verschiedenen Baumarten in vielen Eigenschaften wesentlich voneinander unterscheiden, ja, daß selbst Holz ein und derselben Baumart, je nach seiner Herkunft von dünnen oder dicken Baumstämmen, verschiedene Eigenschaften aufweist.

Mit Recht kann aus dem vielfältigen Verhalten des Holzes auf dessen sehr komplizierten Aufbau geschlossen werden. So läßt bekanntlich der Querschnitt eines Holzstammes an den sogenannten Jahresringen erkennen, daß sein Wachstum nicht stetig, sondern in Perioden vor sich ging. Einem schnellen Aufbau von weitleumigen Jahresringen im Frühjahr, der zu dem hellen Frühholz führt, folgt im Spätsommer eine langsamere Wachstumsperiode mit dichteren und oft auch dunkel gefärbten Jahresringen.

Dem hochkomplizierten strukturellen makro- und mikroskopischen Aufbau entspricht ein chemischer in den submikroskopischen und molekularen Dimensionen. Dennoch wird dieser in seiner Zusammensetzung und seinen Funktionen so komplizierte und bis jetzt noch weitgehend unaufgeklärte organische Werkstoff Holz nur von den vier Elementen: Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und in wenigen Prozenten von Stickstoff aufgebaut.

In erster Linie sind es die besonderen Eigenschaften des Elementes Kohlenstoff, die schon im molekularen Bereich die Bauprinzipien der Holzzellen und der sich aus ihnen aufbauenden Fibrillen und Gewebe erkennen lassen. So hat z. B. das Element Kohlenstoff wie kein anderes die Fähigkeit, sich mit seinesgleichen zu langen Ketten von Kohlenstoffatomen aneinanderzuschließen. Von der Mitte eines Tetraeders aus entfaltet es in Richtung nach dessen Ecken hin vier gleichwertige Valenzen oder Bindekräfte, die sowohl andere Atome, wie etwa Wasserstoff und Sauerstoff, aber auch wesensgleiche

Kohlenstoffatome binden können. In langen Ketten, die unverzweigt oder verzweigt sein können, werden an die noch freierwerdenden Valenzen in erster Linie Wasserstoff und Sauerstoff angelagert. So entstehen die im Modell bereits als lange Fäden erscheinenden Kohlenwasserstoffe (z. B.  $C_{21}H_{42}$ ) oder, wenn Sauerstoff hinzukommt, die sogenannten Kohlehydrate. Zu ihnen gehören auch die aufbauenden Moleküle der Holzsubstanz, nämlich die Cellulose. Die langen Kettenmoleküle der Cellulose (Abb. 1) und die kürzeren der Hemicellulose bilden die Gerüstsubstanzen der Holzfasern und sind im wesentlichen für die Festigkeits- und Elastizitätseigenschaften der Holzstruktur bestimmend.

Das in das Cellulosegerüst eingelagerte Lignin, der sogenannte Holzstoff, eine Substanz, die sich vom Benzol ableitet und deren chemische Konstitution noch nicht völlig geklärt ist, dient als Kitt und zur Versteifung des Cellulosegerüsts. Es erhöht die Naßfestigkeit des Holzes und verkrustet beim Trocknen mit der Cellulose so fest, daß es von ihm nur durch Einwirkung von starken Laugen gelöst werden kann. Bei Wasserzugabe quillt es auf und bedingt so weitgehend auch die elastischen und plastischen Eigenschaften des Holzes. Diese drei Hauptsubstanzen des Holzes bilden sogenannte Groß- oder Makromoleküle mit Molekulargewichten der Holzcellulose von ca. 150 000-200 000 (Rohbaumwolle), der Hemicellulose (Xylon) von ca. 19 000 und des Lignins von ca. 10 000. Ein Cellulosemolekül der Baumwolle ist bereits 1,15 Mikron lang und

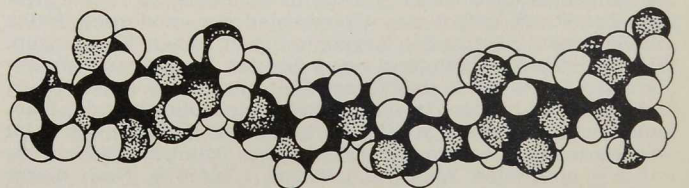


Abb. 1

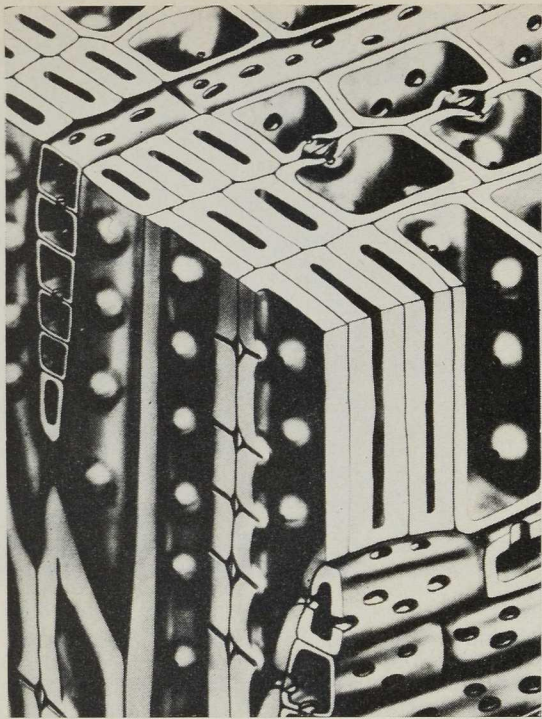
Modell eines Molekülfadens der Cellulose



## Zellenaufbau der Nadelhölzer

links Hoftüpfel in den Tracheiden. Dreizeiliges Band von schmalen und dickwandigen Späthholzzellen.

Unten rechts und links oben: Markstrahlen.



zeigt bei der Röntgenstrukturanalyse eine lange, unverzweigte, fadenartig gerade gestreckte Form. Solche Faden-Makromoleküle verschiedener Länge fügen sich parallel zu nunmehr mikroskopisch sichtbaren Fibrillen zusammen, die in die Schichten der Zellwände eingebaut sind. Als Kittsubstanz ist zwischen ihnen das Lignin eingelagert. Die Zellengruppen bauen als nächsthöhere Elemente die Gewebe auf. Je nach ihrer Funktion im Stamm unterscheidet man drei Hauptgewebe:

1. Das **Festigkeitsgewebe**: Es besteht bei Nadelhölzern (Abb. 2) aus den *Tracheiden*, die, je nachdem sie sich aus Frühholz oder Späthholzzellen zusammensetzen, großlumig und dünnwandig oder schmal und dickwandig sind. Sie dienen gleichzeitig als Gefäßzellen zum Transport von Wasser und Nährstofflösungen, die durch die *Hoftüpfel* auf osmotischem Wege im Stamme weitergeleitet werden.

Die dickwandigen Späthholzzellen dienen in erster Linie der Festigkeit. Bei den Nadelhölzern kann also ein und dieselbe Zellart zwei Funktionen ausüben: als Frühholzzelle Transport der Nahrungssäfte und als Späthholzzelle Festigung des Stammes. Manche Nadelhölzer haben außerdem besondere Harzkanäle, die zwischen den Gefäßzellen liegen.

Die **Laubholzbäume** (Abb. 3) haben lange Faserzellen von kleinem Durchmesser und großer Wanddicke ausgebildet, die scharf ineinander verkeilt und bündelartig zusammengefaßt sind. Sie werden auch als *Libriformfasern* bezeichnet.

2. Als **Leitungsgewebe** dienen den Laubholzbäumen weiträumige Gefäßzellen mit zurückgebildeten Trennwänden, die als *Doppelwulste* oder als *Spiralwulste* den Gefäßen besondere Festigkeit verleihen. Der Wasser- und Nährstoffaustausch geschieht durch *Tüpfel*, die bei einigen Arten als *Hoftüpfel* ausgebildet sind. Umgeben werden die Leitgefäße von dünnwandigen Speicherzellen von annähernd prismatischer Form.

3. Das **Speichergewebe** — oder *Parenchymgewebe* — wird bei den Laubholzbäumen von den obengenannten Speicherzellen gebildet und außerdem von den radial verlaufenden *Markstrahlen* sowie von der in der Mitte des Stammes liegenden *Markröhre*. Bei Laubhölzern sind die Markstrahlen meist zwei- bis achtzeilig, bei den Nadelhölzern meistens einzeilig. Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal im mikroskopischen Schnitt. Bei Laubhölzern treten außerdem noch Zellreihen, kleine Speicherzellen, auf, sie dienen als Speicherräume für Kristalle, in der Regel aus oxalsaurem Kalk.

Abb. 3

## Zellenaufbau der Laubhölzer

links dickwandige Libriformfasern. Rechts weiträumige Gefäßzellen mit Doppelwulsten. In den Gefäßwandungen Tüpfel. Rechts oben zwischen den Gefäßzellen: Speichergewebe (Parenchym-Gewebe).

links oben: Zweizeiliger Markstrahl.

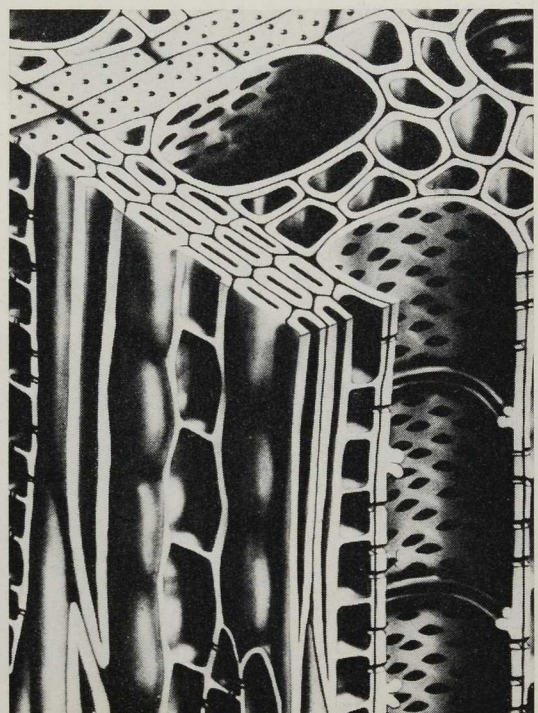






Abb. 4 und 5  
 Tsuga canadensis  
 (Hemlocktanne)  
 15 000 x Innenwand  
 einer Längstracheide

links  
 mit Ligninwarzenschicht  
 rechts  
 ohne Ligninschicht



in Prozenten dargestellte Luftfeuchtigkeitsgehalt, bezogen auf den maximalen Feuchtigkeitsgehalt in g pro m<sup>3</sup> Luft, den diese bei einer bestimmten Temperatur, der sogenannten Sättigungstemperatur, aufnehmen kann. Wird letztere, der sogenannte Taupunkt, überschritten, so tritt Abscheidung von Wasser auf. Die günstigste relative Luftfeuchtigkeit für Holz liegt, wie bereits erwähnt, bei 60 % und einer Umgebungstemperatur von 20° C.

An dieser Stelle soll kurz auf zwei 1967 in der deutschen Kunst- und Denkmalpflege erschienene Aufsätze von H. Schlieder<sup>1</sup> und W. Supper<sup>2</sup> eingegangen werden, in denen die Fragen von Temperatur und Feuchtigkeit und ihre Einflüsse auf Kunstwerke aus Holz, insbesondere auf Orgeln, behandelt werden.

Orgeln sind die am empfindlichsten auf Änderung von Feuchtigkeit und Temperatur reagierenden Kunstwerke. Sie geben durch Verstimmung bereits bekannt, wenn sich diese beiden Klimafaktoren geändert haben.

Ich nehme an, daß sich zu diesen Problemen kompetentere Stimmen zu Wort melden werden, und möchte daher hier nur zum Grundsätzlichen einiges sagen.

Die Untersuchungen von Schlieder haben u. a. ergeben, daß eine Mauertrockenlegung von Kirchen deren Klima ganz entscheidend verändern kann. Wenn man den von Natur im Mauerwerk vorhandenen Feuchtigkeitsvorrat durch Trockenlegung

stark vermindert, wird das Feuchtigkeitsgleichgewicht empfindlich gestört. Der Feuchtigkeitsausgleich, der sich vorher in verhältnismäßig kurzer Zeit vollzog, tritt jetzt nicht mehr oder nur sehr langsam ein, so daß es zu einem starken Abfall kommt, der ein vermehrtes Schwinden des Holzes zur Folge hat. Auch der Einbau von Luftbefeuchtern konnte, besonders bei großen Räumen, daran nicht viel ändern. Hinzu kam, daß Wandmalereien durch diese starken Feuchtigkeitsschwankungen rissig wurden und schließlich abbröckelten. Eine ähnlich einschneidende Maßnahme stellt der Einbau einer Heizung dar. Hier muß nach anderen Gesichtspunkten vorgegangen werden als bei der Heizung von Wohnräumen, die mit Temperaturen von 20 bis 22° höher liegen müssen als Kirchenräume, bei denen als Höchsttemperatur 15 bis 17° anzunehmen ist. Eine mäßige Dauerwärme von etwa 10° C ist hier einem schnellen Hochheizen vor und während des Gottesdienstes weit vorzuziehen. Ich möchte hier abrechnen und auf die eingehenden Untersuchungen der beiden genannten Autoren hinweisen.

Die oben in ihren Grundlinien dargestellten Strukturen bedingen auch das Verhalten des Holzes gegenüber mechanischen Einflüssen. Durch mechanische Kräfte kann Holz verformt werden. Bis zu einer bestimmten Größe dieser Kräfte reagiert das Holz wie ein elastischer Körper, d. h. er nimmt nach dem Aufhören der Kraft seine ursprüngliche Form wieder an; erst beim Überschreiten der Elastizitätsgrenze behält es seine durch die mechanische Kraft gegebene Form bei, es verhält sich wie ein plastischer Körper: Es ist plastisch verformt worden<sup>3</sup>.

Elastizität und Plastizität treten bei allen Holzarten in der Richtung quer zum Faserlauf am stärksten in Erscheinung. Feuchtigkeitsgehalt und Wärme begünstigen das plastische Verhalten des Holzes, wovon man beim Möbelbau und bei Geräten aus Holz durch Anwendung von Wasserdampf zum Biegen von Holzteilen Gebrauch macht. Solche plastischen Verformungen treten z. B. auch an hölzernen Bildträgern<sup>4</sup> auf, die bei wechselnder Feuchtigkeit der umgebenden Luft einem dauernden periodischen Quell- und Schwindungsprozeß ausgesetzt sind. Auf diese Weise summieren sich die plastischen Verformungen der Zellstruktur, so daß es schließlich zu einer permanenten Schwindung der Tafelrückeite kommt. Man spricht hier von einer Druckverformung. Buck<sup>1</sup> hat 1961 auf der IIC-Konferenz in Rom auf die entscheidende Rolle der plastischen Druckverformung beim Verwölben einseitig bemalter Holztafeln hingewiesen.

Das Schwindungsverhalten des Holzes und seine Verformung sind Gegenstand einer Reihe von grundlegenden Arbeiten, die in Zürich von Frey-Wyssling und seiner Schule<sup>5</sup> und in München von Kollmann<sup>6</sup> und Mitarbeitern durchgeführt wurden.

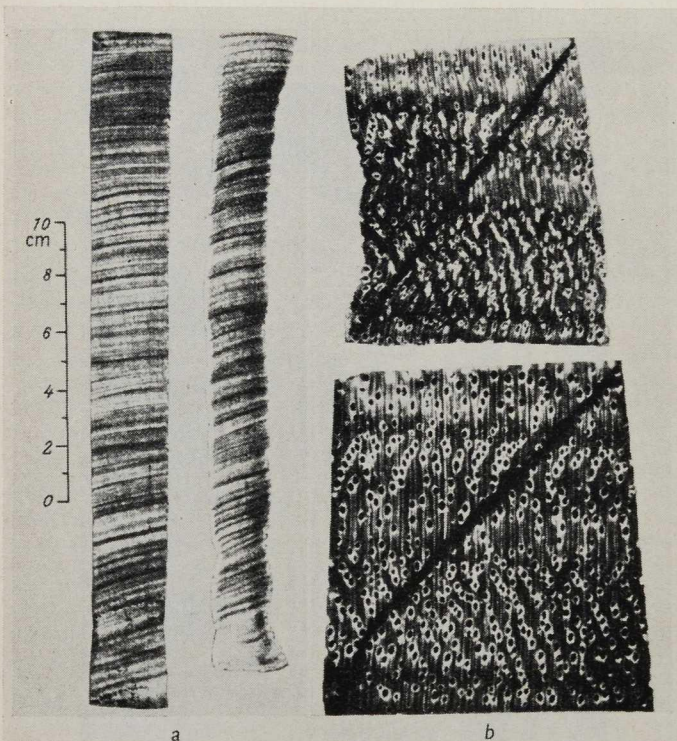


Abb. 6

Querschnitte von normalem und kollabiertem Eukalyptus.

- a) Querschnitt eines Brettes;
- b) Hirnschnitt im Aufricht, oben in kollabiertem Zustand, unten nach der Rückbildung.



So stellten Frey-Wyssling und Bosshard<sup>5</sup> fest, daß der Hauptträger der Schwindung des Holzes sowohl bei Nadelholz als auch bei Laubhölzern die Mittellamellen sind und die angrenzenden Primärwände der Zellen für die große Schwindung in radialer Richtung verantwortlich sind. Diese Lamellen bestehen aber vorwiegend aus Pektin und Lignin, die als isotrope Schichten auf den Zellwänden aufliegen. Sie bedingen weitgehend den Wasserhaushalt der Zelle, auch in trockenem Holz. Für die Schwindung ist es deshalb von ausschlaggebender Bedeutung, wie weit das interfibrilläre Hohlraumssystem mit diesen Inkrusten von Ligninsubstanz bedeckt ist. Durch Entfernen der Ligninsubstanz konnte die radiale Schwindung weitgehend reduziert werden. Auch tropische Hölzer, die weniger Lignin enthalten, zeigen eine geringere Schwindung. Ebenso werden die hygroskopischen Eigenschaften des Holzes in erster Linie durch die Lignininkrustation bedingt. Lignin nimmt unter Quellung leicht und schnell Wasser auf und gibt es wieder ab. Die beiden folgenden Bilder (Abb. 4 und 5) lassen bei 1500-facher Vergrößerung im Elektronenmikroskop die warzenförmige Ligninschicht erkennen bzw. nach deren Entfernung die ligninfreien Zellwände.

Diese Verhältnisse hatte Frey-Wyssling bereits 1940 und 1943 an Nadelhölzern klargestellt. 1956 hat Bosshard<sup>5</sup> ein ähnliches Verhalten an Laubhölzern nachgewiesen. Der Erforschung des Verhaltens des Holzes unter Druck, Feuchtigkeit und Temperatur haben sich in den letzten Jahren besonders Kollmann und seine Mitarbeiter<sup>3</sup> gewidmet. Die Probleme der Verformungserscheinungen des Holzes unter Einwirkung von äußeren Kräften behandelt eine Spezialdisziplin, die den Namen Rheologie, die Lehre von den Fließeigenschaften, erhalten hat. Sie sucht in Verformungszeitkurven die Zusammenhänge zwischen elastischer und plastischer Verformung zu erfassen. In einem Gedankenmodell wird das Fließverhalten, also das rheologische Verhalten, dargestellt als eine Feder, deren Widerstand gegen Zusammendrücken dann das Maß der Elastizität darstellt, während das plastische Verhalten durch einen Kolben

in einem mit viskoser Flüssigkeit gefüllten Zylinder wiedergegeben wird. Die Kombination beider Modelle erlaubt es, die Fließeigenschaften von Hölzern auch weitgehend rechnerisch zu erfassen. Zum Studium der Zusammenhänge eignen sich besonders Querdruckversuche. Die Spannungsverformungskurven zeigen, daß sich durch Struktur und Rheologie viele Vorgänge bei der Verarbeitung, Veredelung und Verwendung des Holzes erklären lassen.

Bei der Trocknung gewisser Hölzer, besonders von Eukalyptusarten, aber auch einiger Nadelhölzer, zeigte sich die Erscheinung, daß bei der Trocknung oberhalb des Fasersättigungspunktes eine anormal hohe radiale Schwindung auftritt. Sie ist auf einen Einbruch der Zellhohlräume zurückzuführen und wird als Zellkollaps<sup>6</sup> bezeichnet. Da als Folge dieser extremen Schwindung das Holz stark rissig und dadurch minderwertig wird, kann durch Auftreten des Zellkollaps beträchtlicher Schaden entstehen (Abb. 6).

Im allgemeinen kann der Zellkollaps durch Behandeln mit Heiß-Dampf (das „Rekonditionieren“) wieder behoben werden. W. G. Kauman<sup>6</sup>, der diese Erscheinung eingehend bearbeitet hat, hat gezeigt, daß sowohl die hydrostatische Zugspannung, die in den einzelnen Zellhohlräumen wirksam wird, als auch die Trocknungsspannungen, die sich über viele Zellen erstrecken, bei der Entstehung des Kollaps mitwirken.

#### Literatur

- <sup>1</sup> Schlieder, H.: Schäden an historischen Kirchenorgeln und anderen Kunstwerken. Deutsche Kunst- und Denkmalpflege 25 (1967), S. 20.
- <sup>2</sup> Supper, W.: Kirchenheizung und Orgel. Deutsche Kunst- und Denkmalpflege 25 (1967), S. 39.
- <sup>3</sup> Kollmann, F.: Rheologie und Strukturfestigkeit des Holzes. Holz als Roh- und Werkstoff 19 (1961), S. 73.
- <sup>4</sup> Buck, R. D.: Some applications of mechanics to the treatment of panel paintings. Bulletin II C Kongreß 1961, S. 282.
- <sup>5</sup> Bosshard, H. H.: Über die Anisotropie der Holzschwindung. Holz als Roh- und Werkstoff 14 (1956), S. 23.
- <sup>6</sup> Kauman, W. G.: Einflußgrößen bei der Entstehung des Zellkollaps und seine Rückbildung. Holz als Roh- und Werkstoff 22 (1964), S. 183.