

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
Band: 101 (1950)
Heft: 2-3

Artikel: Neuere Ergebnisse der physikalischen und mechanisch-technologischen Holzforschung
Autor: Kollmann, F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-765981>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 15.10.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen Journal forestier suisse

101. Jahrgang

Februar/März 1950

Nummer 2/3

Neuere Ergebnisse der physikalischen und mechanisch-technologischen Holzforschung¹

Von Prof. Dr.-Ing. F. Kollmann, Rheinbek bei Hamburg

Die Geschichte der Holzforschung zerfällt klar in einige charakteristische Abschnitte, die nicht nur für die Problemstellung, die Planung und Durchführung der Versuche, ihre Auswertung und die Anwendung der Versuchsergebnisse kennzeichnend sind, sondern für die Entwicklung des naturwissenschaftlichen und daran anschließend des technischen Denkens, Suchens, Erkennens schlechthin. Wenn es auch im Bereich des Geistes wie der Materie stets schwierig und anfechtbar ist, Zäsuren zu machen, Grenzen zu ziehen, insbesondere Epochen zeitlich scharf zu trennen, so stößt es doch kaum auf Hindernisse und Widerspruch, solche Epochen an sich festzustellen und mehr oder minder präzise zu begrenzen.

Entwicklung der Holzforschung

Es unterliegt jedenfalls keinem Zweifel, daß die Holzforschung zunächst durch Tagesfragen des Holzschutzes, des Bauwesens, des Schiffbaues, um die wichtigsten Gebiete zu nennen, ausgelöst wurde. Sie beginnt in dieser bescheidenen Form im klassischen Altertum: bei P l i n i u s finden sich die ersten Diskussionen darüber, und sie erreicht ihren Höhepunkt in den « Oeuvres » von D u h a m e l d u M o n c e a u. Man kann diese Periode trotzdem nur als eine *empirische* bezeichnen.

Die zweite Epoche begann etwa 1848, ein Jahr, in dem die zweite Sturmflut der Aufklärung über Europa rollte; sie ist eng mit den Namen C h e v a n d i e r und W e r t h e i m verknüpft. In ihr wurde zum erstenmal der Versuch unternommen, die physikalischen und mechanischen Erscheinungen der Hölzer naturwissenschaftlich zu prüfen und dafür allgemein gültige Gesetze zu formulieren. Auf C h e v a n d i e r und W e r t h e i m folgten viele Forscher, teils aus dem Lager der Forstleute wie N ö r d l i n g e r, H a r t i g, J a n k a, W i j k a n d e r, aber auch S c h w a p p a c h, B e r t o g, E n e r o t h, teils aus dem der Ingenieure

¹ Vortrag, geh. im Svenska Träforskningsinstitutet, Stockholm, am 2. März 1949.

wie B a u s c h i n g e r, T e t m a j e r, August F ö p p l, die einzelne Phänomene, speziell die Zusammenhänge zwischen Festigkeit und Form, Festigkeit und Wichte, Festigkeit und Feuchtigkeit bei Holz analysierten und mathematische Ausdrücke dafür suchten. Viele ihrer Ergebnisse, zumal soweit sie kritisch überprüft und auf einen einheitlichen Nenner gebracht wurden — zum Beispiel von T r e n d e l e n b u r g —, sind noch heute gültig und stellen das Fundament der Wissenschaft vom Holz dar. Diese Periode kann man vielleicht als die *klassisch-analytische* bezeichnen; ohne ihre Bedeutung zu schmälern, muß man auf den Mangel an Synthese hinweisen. Ein einheitliches Bild vom Wesen des Holzes entstand nicht. Die Forscher begnügten sich, Spezialaufgaben zu lösen, ohne ihre Ergebnisse mit denen anderer Autoren zu einem Bild mit großzügiger Linienführung zusammenzusetzen.

Das Ende dieser zweiten Periode fällt etwa mit dem Ausbruch des Ersten Weltkrieges zusammen. In der Folge wird immer mehr das Bestreben sichtbar, zu einer Integration der analytischen Einzelergebnisse zu gelangen und den Stoff größerer Fachgebiete synthetisch darzustellen. L a n g, B a u m a n n und viele Mitarbeiter des US Forest Products Laboratory sind als hervorragende Vertreter dieser fruchtbaren Epoche hervorzuheben, die das Holz auch auf dem mechanischen Sektor wieder den modernen ingenieurmäßig verwendbaren Werkstoffen, Metallen und Kunststoffen, näher brachte, da jetzt die Variation seiner Eigenschaften ebenso wie die Abhängigkeit von inneren und äußeren Faktoren bekannt und bis zu einem gewissen Grad empirisch berechenbar waren. Die Ausdehnung der Erkenntnisse führte in jener Zeit nicht nur zu einer Berührung mit bis dahin fremden Wissenschaften auf Grenzgebieten, zum Beispiel der Holzmechanik und -physik mit der Biologie und Botanik oder mit der Chemie, sondern sie vermehrte den Drang, die erschlossenen Gebiete auch in der Tiefe kennen zu lernen. Dadurch erhielt die *Grundlagenforschung* einen mächtigen Auftrieb. Die Kristallstruktur der pflanzlichen Zellwand und damit auch der Holzzellwand, von dem Botaniker N ä g e l i Mitte des 19. Jahrhunderts in genialer Konzeption als Hypothese formuliert, wurde 1913 erstmals unumstößlich von zwei Japanern N i s h i k a w a und O n o durch Röntgen-Interferenzaufnahmen bewiesen, aber erst nach 1918 wurden ähnliche Forschungen in Europa durchgeführt und schufen ein allmählich immer klarer werdendes Bild vom Feinbau der Faserwand. Dieses Bild läßt sich mit einem Mehrfarbendruck vergleichen, dessen einzelne Farben durch verschiedene Wissenschaften beige-steuert wurden. Die Physik lieferte — wobei vornehmlich an L a u e, D e b e y e und S c h e r r e r zu erinnern ist — die Methode und ihre theoretische Begründung, die Mathematik erlaubte die erforderlichen Rechenoperationen und raumgeometrischen Vorstellungen, die Chemie — es sei nur an M e y e r, M a r k, H e ß, T r o g u s,

Kratky, Astbury, Clark erinnert — stimmte die abstrakten gedanklichen Ergebnisse mit den konkreten stofflichen Befunden ab, die Botanik und Biologie schließlich stellten die Frage nach dem Zusammenhang des kristallinen Feinbaus mit dem Leben und den ihm dienenden Geweben.

Es kann nicht bestritten werden, daß die Erkenntnis vom Feinbau der Holzfaser zum Kern der eigentlichen Wissenschaft vom Holz wurde, daß sie den Schlüssel zu einer naturgesetzlichen Erklärung der wichtigsten Phänomene wie Sorption und Quellung, Anisotropie der physikalischen und elastischen Eigenschaften lieferte und daß sie mitten hinein in die skizzierte dritte Epoche *integrierender, auf Synthese bedachter Holzforschungen* fällt. Trotzdem gelangte man auch in dieser dritten Epoche nicht zu einer Gesamtschau, zu einer universellen, allgemein naturwissenschaftlichen Betrachtung und somit auch noch nicht zu einer eigentlichen Wissenschaft vom Holz.

Die Versuche, eine solche Wissenschaft aufzubauen und systematisch darzustellen, begannen etwa ab 1929. Die Notwendigkeit *universeller Betrachtung* lag damals auf der Hand, und sie bestimmte mich, in den folgenden Jahren bei den Anstrengungen, ein enzyklopädisches Werk über die « Technologie des Holzes » zu schreiben. Der Anschluß der Holzforschung an die *Universitas Literarum* brachte eine außerordentliche Befruchtung aller Arbeiten mit sich, zumal da er in eine Zeit fiel, in der das naturwissenschaftliche Denken sich auf völlig neuen Bahnen bewegte. Makromolekularchemie und Molekularphysik gaben Einblicke in das Wesen der Materie, die bei Hölzern nicht nur eine Erklärung vieler Eigenschaften, sondern sichere Voraussagen über ihre Größen und Funktionen ermöglichen. Chemische, physikalische, mechanische Erscheinungen und Vorgänge — meist eng verknüpft — lassen sich mit dem Rüstzeug der naturwissenschaftlichen Mathematik in Form von Differentialgleichungen beschreiben und bei Annahme richtiger Grenzbedingungen vorausberechnen. Variationen, Wahrscheinlichkeitswerte, Korrelationen wurden zum Gegenstand statistischer Untersuchungen. Die Gesetze der Mitte, des Maßhaltens, der Arterhaltung, die im großen das Leben kennzeichnen, wurden dabei am Holzkörper und seiner Bildung nicht minder klar als die Rhythmen, Zyklen, aber auch Sprünge und Mutationen, die Lebensvorgänge wie die inneratomaren Erscheinungen begleiten. Der Trieb nach echter Erkenntnis und zusammenhängender Schau wurde zur Triebfeder der Holzforschung. Eine Reihe von Autoren sind dafür charakteristisch: auf dem Gebiete der biologischen Holzforschung Münch, Trendelenburg, Frey-Wyßling, Bailey, Clark, Dadswell, auf dem Gebiete der Holzchemie Freudenberg, Hägglund, Erdtman, Staudinger, Hibbert, auf dem Gebiete der Holzpathologie und des Holzschutzes

Schwerdtfeger, Gäumann, Cartwright und Findlay, auf dem Gebiete der Holzphysik und Mechanik Stamm, MacLean, Tiemann, Markwardt, Barkas, Hearmon, Thunell, Ylinen, Roš, Narayanamurti, Campredon, Kollmann, um nur einige wenige zu nennen.

Die neueren, d. h. in den letzten zehn Jahren erzielten Ergebnisse der mechanisch-technologischen Holzforschung, die ich im folgenden streifen und in ihrer Bedeutung für Wissenschaft und Praxis kurz diskutieren will, wären ohne eine Erklärung der tiefgreifenden Wandlung der Holzforschung als solche kaum begreiflich. Diese Entwicklung und Wandlung muß deshalb einleitend aufgezeigt werden, zumal da sie ein Programm universeller, tieferschürfender, auf die großen Zusammenhänge gerichteter Forschungen einschließt, das die Einzel- und Gemeinschaftsarbeiten aller Holzforscher bestimmen sollte.

Holzanatomie und Holzpathologie

Die *Holzanatomie* als Grenzgebiet der physikalisch-mechanischen Holzforschung, die früher von Botanikern und Forstleuten ebenfalls nur am Rande betrieben wurde, rückte in den letzten fünfzehn Jahren in einen Brennpunkt der Aufmerksamkeit. In methodischer Hinsicht wurde die *mikroskopische Technik* verbessert. Mitteilungen über die zweckmäßige Vorbehandlung der Hölzer, die Anfertigung der Mikrotom-schnitte, die Färbemethoden und die Mikrophotographie liegen von Kollmann und Antonoff sowie vom britischen Forest Products Research Laboratory vor. *Mikrographische Atlanten* und Holzbeschreibungen sind reichlich vorhanden, zum Beispiel von Record, Brown, Panshin, Trendelenburg, Schmidt, Jansonius, Chalk und andern. Auch auf die Holzeigenschaftstabellen der ehemaligen Reichsanstalt für Holzforschung sei hingewiesen. Das Zahlenmaterial über die prozentualen *Anteile* der einzelnen *Gewebe* am Holzkörper, über die Streuung der Anteile und über die Dimensionen der Zellelemente ist sehr reichhaltig geworden. Mechanische Integratoren und die Anwendung der Lineartaxation haben die früher äußerst mühsamen und zeitraubenden Messungen vereinfacht und beschleunigt. Die Genauigkeit wurde dabei mathematisch analysiert. Die immer mehr Einzelheiten erfassende und beschreibende Holzanatomie erhielt dadurch sichere Merkmale zur *Holzbestimmung*.

Lochkartenschlüssel, 1936 vom Forest Products Research Laboratory vorgeschlagen, wurden im Zweiten Weltkrieg in großem Umfang und mit Erfolg auch von ungeschultem Personal nach kurzer Einweisung verwendet. Dadswell und Mitarbeiter, Desch, Norman haben darüber berichtet. Im Svenska Träforskningsinstitutet haben Thunell

und P e r e m eine Lochkarte mit 144 Merkmalen entwickelt, die sich zur Bestimmung sowohl von Hölzern der nördlich gemäßigten Zonen als auch der Tropen eignet.

Die allgemeinen Aufgaben der Holzanatomie in wissenschaftlicher und technischer Hinsicht haben B. H u b e r und K. A. C h o d b u r y diskutiert. Viel Verwirrung wurde beseitigt, als die grundsätzlichen Unterschiede in der anatomischen Struktur des *jugendlichen Holzes* gegenüber dem reifen Holz erkannt wurden. Weniger Erfolge waren den Bemühungen beschieden, funktionale *Zusammenhänge zwischen anatomischen Merkmalen und physikalischen Eigenschaften* zu konstruieren. Die Arbeiten in dieser Hinsicht sind alt; sie gehen hauptsächlich auf R. H a r t i g zurück. O m e i s und B e r t o g haben sich in dieser Richtung versucht. Vom Standpunkt der Zellstoffchemie haben H ä g g l u n d, J o h a n n s o n und M a a s s Impulse zur Fortführung der Untersuchungen gegeben; J a c q u a r d erörterte erstmals die Beziehungen zwischen Mikrostruktur des Holzes und Bruchmechanik. An Eschenholz hat K o l l m a n n Messungen durchgeführt. Einer Verdoppelung des Gefäßanteils (von 15,7 auf 35,0 %) entsprach beispielsweise ein Abfall der Wichte und der Druckfestigkeit um rund 20 %, des Elastizitätsmoduls um bis zu 50 % und der Bruchschlagarbeit um bis zu 85 %. Diese großen Unterschiede zeigen, daß offenbar der Gefäßanteil als beeinflussende Größe von anderen Faktoren (zum Beispiel Verteilung des Leit- und Festigungsgewebes, Wanddicke usw.) stark überlagert ist. Zwischen dem Gefäßanteil und der Wichte oder Druckfestigkeit besteht wohl ein linearer Zusammenhang, aber die Streuungen sind so groß, daß im Einzelfall keine zuverlässigen Voraussagen möglich sind. Viel klarer und enger sind die Beziehungen zwischen *Jahrringbreite* (bzw. bei Nadelhölzern: Spätholzanteil) *und Wichte*; es gibt hier typische Funktionen, die verschiedene Holzgruppen voneinander scheiden, zum Beispiel Douglasie, Fichte und Tanne von Kiefer und Lärche oder die ringporigen Laubhölzer von den zerstreutporigen. Auch bei ringporigen Tropenhölzern, zum Beispiel Teakholz, fand C h o d b u r y die größte Festigkeit an bestimmte Jahrringbreiten (von 2 bis 6 mm) geknüpft. Bei zerstreutporigen Hölzern der Tropen lassen sich die Jahrringe und die Früh- bzw. Spätholzzonen oft kaum feststellen. Das Forest Research Institute in Dehra Dun nennt hier als Weiser für Wichte und Festigkeit die Größe und Einteilung der Gefäße, die Wanddicke der Fasern, den Gehalt an Parenchymzellen und Markstrahlen je Raumeinheit. Leider aber haben die über einen großen Wichtebereich von P r ü t z durchgeführten Untersuchungen eindeutig ergeben, daß Bauunterschiede weder die Wichte noch die Druck- und Biegefestigkeit nennenswert beeinflussen.

Stärker können sich größere Schwankungen in der *chemischen Zusammensetzung der Zellwand* auswirken. T r e n d e l e n b u r g hat in

Auswertung zahlreicher Meßwerte der Literatur gezeigt, daß die statische Gütezahl $\left(\frac{\sigma_{dB}}{r}\right)$ proportional dem Ligningehalt steigt. Clark wies nach, daß sich bei Eschenholz mittels der Phloroglucin-Salzsäure-Reaktion, deren Ausfall vom Ligningehalt abhängt, für gleiche Wichteklassen das druckfeste Holz vom weniger druckfesten eindeutig abgrenzen läßt. Es lohnt sich, derartige Schnellprüfverfahren weiter ins Auge zu fassen, aber es muß trotzdem vor einer Überschätzung gewarnt werden. In diesem Zusammenhang sei auf die vielen Schwierigkeiten hingewiesen, die einer Verknüpfung der physikalischen Holzeigenschaften und der technischen Holzqualität mit gewissen *äußeren Merkmalen* einer Holzart im Wege stehen. Nur zwei Beispiele seien dafür angeführt: Holzhandel und Holzwirtschaft verwarfen übereinstimmend das dunkle Kernholz der Esche als minderwertig und spröde; selbst ein so kritischer Forscher wie J a n k a schrieb 1911: « Große Zähigkeit besitzt nur das weiße Splintholz. » Eine von K o l l m a n n aber breit angelegte statistische Untersuchung lieferte den unumstößlichen Beweis, daß Eschenkern- und Splintholz völlig gleichwertig sind. Ebenso wenig konnten bisher die immer wieder behaupteten Güteunterschiede von Holz aus Kiefernstämmen mit plattenförmig geteilter Borke gegenüber dem von « Schuppenkiefern » bestätigt werden. Um so mehr verdient es Beachtung, daß R u n q u i s t und T h u n e l l die Überlegenheit der Birke mit grauer Rinde nachweisen konnten. Auch der starke, vom Holzhandel oft betonte *Einfluß des Wuchsgebietes* auf die Holzgüte läßt sich statistisch erfassen. Es erscheint aber wünschenswert, daß Holzanatomie, Holztechnologie, Vererbungslehre und Pflanzenzüchtung hier enger als bisher zusammenarbeiten, denn es liegt durchaus im Bereich des Möglichen, *Holz mit höherer Qualität* als der bisher durchschnittlichen für bestimmte Zwecke zu erziehen und heranzuzüchten.

Im Zuge dieser Arbeiten wird es sich als höchst wünschenswert herausstellen, aus *Untersuchungsbefunden an jugendlichen Pflanzenteilen* auf die Eigenschaften der reifen Pflanze Schlüsse ziehen zu können. Leider sind die Aussichten keine sehr guten, da das jugendliche Holz vom reifen nicht nur in anatomischer Hinsicht, sondern auch im Feinbau und in der chemische Beschaffenheit stark abweicht. Immerhin muß man prüfen, ob nicht doch Korrelationen bestehen. Zu diesem Zweck müssen Großzahlforschungen mit sehr sorgfältig abgegrenzten Bedingungen durchgeführt werden. Feinstrukturuntersuchungen mittels des Röntgen-Interferenzverfahrens spielen dabei eine wichtige Rolle. Sie haben bereits bewiesen, daß die Gleichrichtung der Micelle im jugendlichen Kiefernholz weniger ausgeprägt ist als im älteren Holz. Erst mit zwölf oder mehr Jahren wird bei Kiefer ein gleichbleibender mittlerer Steigungswinkel erreicht, der im Spätholz größer ist als im Frühholz. Die Schwan-

kungen sind im Frühholz viel größer als im Spätholz. Die Bedeutung des Steigungswinkel der Micelle, auf die früher schon die polnischen Forscher P i e n k o w s k i und S c h m i d t hingewiesen hatten, ergab sich auch bei Messungen von K o l l m a n n und A n t o n o f f sehr klar. Feinstrukturaufnahmen haben weiter die tiefgreifenden Bauunterschiede von normalem Holz, *Druckholz* und *Zugholz* in allen Einzelheiten enthüllt; speziell Clark, Preston und Ranganathan sind hier zu erwähnen. Das Verfahren eignet sich auch zum *Nachweis des* fortschreitenden *biologischen Abbaus* der Hölzer durch holzerstörende Pilze. Schulze, Theden und Vaupel haben Röntgendiagramme von Hölzern nach verschieden langer Einwirkung von verschiedenen Pilzen, zum Beispiel *Poria vaporaria*, *Coniophora cerebella*, *Merulius lacrimans*, veröffentlicht. Die Auslöschung der Intensitätsmaxima auf dem Äquator mit fortschreitender Zerstörung der Zellulose durch gewisse Pilze ließ sich verfolgen. Trotzdem ist das Bild noch nicht ganz klar, so daß eine Fortführung und Ausdehnung dieser Arbeit wünschenswert erscheint. Ergänzend könnten dabei sicher *spektrographische Untersuchungen* wertvolle Dienste leisten. Ihre Leistungsfähigkeit wurde durch die ausgezeichneten Untersuchungen von Lange an nativem Lignin, die dessen aromatische Natur endgültig beweisen, in ein helles Licht gerückt. Sehr aufschlußreich sind auch Versuche, Splint- und Kernholz verschiedener Hölzer mit spektroskopisch leicht nachweisbaren Modellkörpern verschiedener Teilchengröße zu tränken, um dadurch die *Permeabilität* als Veränderliche der Teilchengröße kennen zu lernen. Rau, ein Schüler von B. Huber, hat derartige Versuche durchgeführt; ähnlich hat in Holland Broese van Groenau die anatomischen Grundlagen des Holzschutzes für die Teeröltränkung bearbeitet.

Holztrocknung

Das Problem der Permeabilität — für Gase hat dazu kürzlich Narayanamurti einen wertvollen Beitrag geleistet — ist eng mit dem der *Kapillarität und Diffusion* verknüpft. Holztrocknung, Holztränkung, aber auch die Durchdringung der Hackschnitzel mit Kochlauge bei der Zellstoffherstellung, haben hier dieselben physikalischen und kolloidchemischen Voraussetzungen. In der Literatur liegen sehr viele Beiträge zur Bewegung von Flüssigkeiten, Gasen und Dämpfen in Holz vor. Ursprünglich widmeten sich Botaniker, zum Beispiel schon Julius Sachs (1878), dieser Frage, um pflanzenphysiologische Vorgänge aufzuklären. Wesentlich später, erst ab 1929, d. h. in der Periode der Holzforschung, in der wir jetzt stehen, befaßten sich Physiker und Ingenieure damit. Allerdings bildete sich dann, wohl verständlich bei der außerordentlichen Bedeutung des Problems, ein « Forschungsschwer-

punkt». Einige Namen sind zu nennen: in den USA, wo diese Forschungen zuerst begonnen wurden: Tuttle, Tiemann, Sherwood, Loughborough, Hawley, Hohf, Stamm, in Kanada Pidgeon und Maass, in England Stillwell, Martley, Knight und Barkas, in Schweden Thunell, in Finnland Tuomola, in Indien Narayanamurti und Kapur, in Deutschland Egner, Graf, Fessel, Schlüter, Krischer und Kollmann.

Erreicht wurde dadurch nicht nur eine qualitativ zutreffende Beschreibung der Kapillar- und Diffusionsvorgänge, sondern auch die Möglichkeit quantitativer Voraussagen. Nach dem gelungenen Versuch Tuttle's, die Holztrocknung als Diffusionsproblem in Analogie zur Wärmeleitung zu berechnen, entspann sich zwar ein langer Streit, ob die Übereinstimmung nicht eine zufällige gewesen sei, da die Anfangsfeuchtigkeit des Holzes bei seinen Versuchen hoch über dem Fasersättigungspunkt gelegen habe und dort nicht Diffusion, sondern Kapillarbewegung maßgebend sei. Lebhaft erörtert wurde auch, ob in die Fouriersche Differentialgleichung der Gradient der Holzfeuchtigkeit oder des korrespondierenden Dampfdruckes einzuführen sei. Auf Grund der Ausführungen von Krischer muß man heute dem zweiten Ansatz, d. h. dem Gebrauch der Stefanschen Gleichung an Stelle der Fickschen, den Vorzug geben. Kollmann's ausgedehnte Versuche in den Jahren 1930 bis 1932 zeigten, daß man tatsächlich die Holztrocknung in beliebigem Feuchtigkeitsbereich als Diffusionsproblem behandeln kann. Damit ließ sich für die praktisch besonders wichtige Trockenzeit Z eine einfache Formel ableiten:

$$Z = \frac{1}{\alpha} (\ln u_b - \ln u_e).$$

Kurventafeln und ein Sonderrechenschieber wurden dafür entwickelt und haben sich in der Praxis gut bewährt, obgleich die Wahl des richtigen Koeffizienten α noch schwierig ist. Unter sonst gleichen Voraussetzungen haben die Holzart und die Güteansprüche darauf entscheidenden Einfluß. Es ist unerläßlich, hierzu weiteres Material zu sammeln, das dann einer sorgfältigen statistischen Analyse zu unterziehen ist. Wirtschaftlichkeit und Kosten der künstlichen Trocknung sind unlösbar mit dem Trockenzeitproblem verbunden.

Ein großes Verdienst haben sich Stamm und Seborg in Madison (Wisconsin) erworben, indem sie die Analogie der Diffusion von Flüssigkeiten, Gasen und Dämpfen in Holz zur *elektrischen Leitung* erkannten. Vergleicht man das System der mikroskopischen und submikroskopischen Kapillaren, durch die der Stoffaustausch vor sich geht, mit einem Netz von teils parallel, teils in Serie geschalteten elektrischen Widerständen, so läßt sich die Kirchhoffsche Gleichung anwenden.

Nötig sind dazu nur statistisch zuverlässige Aussagen über die Kapillardimensionen. Durch verschiedene sich gegenseitig ergänzende und stützende physikalische (zum Beispiel elektroosmotische) Meßverfahren haben die genannten amerikanischen Forscher derartige Zahlen beschafft und den Nachweis geführt, daß sich auf diese Weise für beliebige Verhältnisse aus den Diffusionszahlen von Wasserdampf oder gebundenem Wasser und den Strukturdimensionen die Diffusion im Holz vorausberechnen läßt.

Holzschutz

Stamm hat seiner wichtigen Arbeit auch ein Kapitel angefügt, das die *Mechanik der Drucktränkung* kurz behandelt. Es ist sicher, daß hier noch große Aufgaben vor uns liegen. Beispielsweise ist dem *Quellungszustand der Holzmembran* stärkste Aufmerksamkeit zu widmen, da er Erfolg oder Mißerfolg der Imprägnierung in vielen Fällen bestimmt. Man wird diese Frage mit jener der Verkernung und der jahreszeitlichen Schwankungen im Quellungszustand der Zellulose im stehenden Stamm verbinden müssen. Die eingangs geforderte « universelle » Forschungsmethode verlangt hier das Zusammenwirken von physikalischer, chemischer, physiologischer und mykologischer Betrachtungsweise. Es ist nicht ausgeschlossen, daß damit dem Holzschutz völlig neue Wege erschlossen werden. Die von Erdtmann im *Kiefernkerholz* nachgewiesenen *phenolischen Stoffe* besitzen hohe Giftigkeit. Vielleicht eignen sie sich als Modellkörper für besonders wirksame Holzschutzmittel. Die Voraussetzungen für eine Auswahl besonders wirksamer Schutzmittel sind heute vorhanden, nachdem man begonnen hat, beispielsweise die einzelnen *Fraktionen des Steinkohlenteeröls* auf ihre fungizide Wirkung hin systematisch zu prüfen. Dabei ist die Wirkung gegen verschiedene holzerstörende Pilze und gegen verschiedene Insekten außerordentlich verschieden. Ähnliche Feststellungen machte Bavenham für Salze und Salzgemische, wobei er nicht nur eine Liste von *objektiven « Holzgrenzwerten »* aufstellte, sondern die Stoffe auch nach ihrer *Auslaugbarkeit* abstufte. Es können hier zur Frage des Holzschutzes nur wenige Bemerkungen gemacht werden. Immerhin verdient es ernste Beachtung, daß unter Umständen im Holz selbst durch geeignete Behandlung sehr wirksame fungizide Stoffe gebildet werden können. Sie sind sicher phenolischer Natur; als Beispiel ist die außerordentlich hohe Pilzresistenz von Hölzern zu erwähnen, die zwecks Erhöhung der Raumbeständigkeit mit hohen Temperaturen (zum Beispiel 300°) in einem nicht oxydierenden Medium behandelt werden. Ich möchte aber auch erwähnen, daß vielleicht *Antibiotica*, die aus Pilzen selbst gewonnen werden, Aussichten für den Holzschutz eröffnen, obgleich die Wirtschaftlichkeit im voraus mit viel Skepsis beurteilt werden muß. Auf jeden Fall sind die Holz-

schutzarbeiten durch das Standardwerk von Cartwright und Findlay und durch die pflanzliche Infektionslehre von Gäumann wesentlich erleichtert und angeregt worden. Es sei schließlich darauf hingewiesen, daß man mit kombinierten Tränkverfahren gute Erfolge erzielen kann. So wurden während des Krieges in der deutschen Reichsanstalt für Holzforschung in Zusammenarbeit mit der Deutschen Reichsbahn und der Allgemeinen Holzimprägnierungs-GmbH. Schwellen zuerst mit hochfungiziden, aber leicht auslaugbaren Schutzsalzen getränkt und dann darum ein Mantel aus hochsiedenden Teerölrückständen gelegt, die an sich kaum eine Schutzwirkung haben, aber eine hervorragende Sperrwirkung gegen Feuchtigkeit besitzen. Selbstverständlich läßt sich über derartige Verfahren erst nach mehrjährigen Eignungsprüfungen in der Praxis ein abschließendes Urteil abgeben.

Holzphysik

Auf dem Gebiete der Holzphysik bietet die *Wichte*, das Gewicht je Raumeinheit, heute keinerlei zu lösende Aufgaben mehr. Durch Anwendung der Heliumverdrängung nach Stamm wurde festgestellt, daß die Zellwandungssubstanz $1,50 \text{ g/cm}^3$ wiegt (während man vorher $1,56 \text{ g/cm}^3$ als richtigen Wert ansah). Auch die einzelnen chemischen Bestandteile der Zellwand sind auf ihr spezifisches Gewicht hin genau analysiert. Die Verdichtung des Quellungswassers wurde in diesem Zusammenhang nachgewiesen und durch einen höheren Ordnungszustand infolge der Dipolnatur der Wassermoleküle bei der oberflächlichen Adsorption durch Frey-Wyßling zwanglos erklärt. Für die gesetzmäßigen Änderungen der Wichte mit der Holzfeuchtigkeit hat Kollmann, fußend auf theoretischen Überlegungen, ein Schaubild entwickelt, das den experimentellen Befunden voll entspricht und in die deutschen Normen für Holzprüfungen übernommen wurde. Etwas aus der Reihe fallen nur jene vergüteten Hölzer, deren Raumgewicht auf künstliche Weise durch Anwendung von Druck und Hitze erhöht wurde. Die Gründe dafür sind in chemischen Vorgängen zu suchen, hauptsächlich wohl in einem plastischen Fließen der Zementierungsschichten, wovon noch zu sprechen sein wird. Der natürliche Raumgewichtsbereich für Hölzer erstreckt sich von etwa $0,12$ bis $1,35 \text{ g/cm}^3$; er ist technisch in den Preßhölzern nach oben bis auf etwa $1,45 \text{ g/cm}^3$, nach unten in extraleichten Faserplatten und Holzfaser-Schaumstoffen bis auf $0,08 \text{ g/cm}^3$ erweitert. Sicher bieten gerade diese *leichtesten Werkstoffe auf Holzgrundlage* noch außerordentliche konstruktive Möglichkeiten in Form von Verbundplatten oder Sandwich-boards. Knickversuche von Küch an Platten mit Polystalschaum-Mittellagen und Furnierplatten auf beiden Außenseiten ergaben Knickbruchspannungen, die um mehr als 200 % größer waren als die nach der klassischen Knicktheorie zu erwartenden. Die Ursache dafür

liegt im Mittragen der Haut. Wir befinden uns hier zweifellos erst am Beginn einer Entwicklung, die ich unter das Motto « organischer Leichtbau » stellen möchte und zu deren Förderung u. a. auch alle jene Platten beitragen können, deren Innenlagen aus Waben-, Gitter- oder Wellkonstruktionen bestehen.

Neben der Leichtigkeit und Festigkeit wird mit ihnen meist auch automatisch hohe Raumbeständigkeit erzielt und damit eine der mißlichsten Eigenschaften der Vollhölzer beseitigt. *Sorption und Quellung* der Hölzer bieten heute keine Probleme mehr. Seit den klassischen Versuchen *Volbehrs* sind mehr als fünfzig Jahre verflossen. Auch die grundlegenden thermodynamischen Betrachtungen von *Katz* liegen schon zwanzig Jahre zurück. In der Folgezeit haben sich hauptsächlich *Hawley*, *Mörrath*, *Stamm*, *de Bruyne* damit befaßt. Die von *de Bruyne* vorgelegte *elektrokinetische Quellungstheorie* gestattet bei organischen Flüssigkeiten eine befriedigende Ableitung des Quellmaßes aus der Dielektrizitätskonstante. Die jüngste Entwicklung ist dadurch gekennzeichnet, daß Formänderungen und Spannungen beim Quellen mit den elastischen Formänderungen und Spannungen verknüpft werden. Vor allem *Barkas*, aber auch *Keylwerth*, sind in dieser Richtung tätig, und die lange Zeit in mancher Hinsicht kaum erklärliche *Quellungsanisotropie* hat plötzlich eine ziemlich plausible physikalische Begründung gefunden.

Praktisch richten sich seit langem große Anstrengungen auf *Quellungsschutz* oder *Quellungsvergütung*. Da Sorption und Quellung auf dem Feinbau des Holzes, auf der großen inneren Oberfläche der kristallisierten Bereiche und auf der chemischen Affinität zwischen Zellulose und Wasser beruhen, können Anstriche, Überzüge, aber auch einfache Porenfüller höchstens quellungsverzögernd, aber nicht quellungsbeseitigend wirken. Trotzdem soll man ihre Wirksamkeit nicht unterschätzen. Wir haben während des Krieges Anstriche für Holzflugzeuge unter diesem Gesichtswinkel geprüft. Dabei wurde ein Verfahren entwickelt, das feucht-warmes oder trocken-heißes Klima oszillierend auf die mit den Schutzanstrichen versehenen Holzproben einwirken ließ. Es ergaben sich außerordentlich große Unterschiede im Verhalten und damit der Wirksamkeit guter und schlechter Anstriche. Bemerkenswert war auch, daß gute Anstriche und Lacke zwar die Feuchtigkeitsaufnahme weitgehend hindern, nicht aber die Feuchtigkeitsabgabe, wenn die Dampfteildrücke eine solche veranlassen. Man kann somit die Wirkung der Anstriche mit der eines Rückschlagventils vergleichen, das nur in einer Richtung sperrt. Dies führt dazu, daß sich in Hölzern unter ungünstigen Klimabedingungen außerordentliche Feuchtigkeitschwankungen einstellen. In Australien fand man beispielsweise, daß sich die Feuchtigkeit in Furnieren eines Mosquito-Flügels innerhalb von sieben Monaten zwischen 17,1

und 3,1 % bewegte. Bei weniger extremen Klimaverhältnissen, und vor allem in massiven Bauhölzern mit ihrer großen Eigenträgheit, sind die Schwankungen viel kleiner. Für Bauhölzer in den USA, Kanada, Australien, Indien, Schweden und Deutschland liegen darüber genaue Feststellungen vor. Soweit Anstriche als Quellungsschutz verwendet werden, empfiehlt es sich nach meinen Erfahrungen, ihre *Alterung*, zum Beispiel unter der Einwirkung von ultravioletten Strahlen, in die Prüfungen mit einzubeziehen.

Ein echter und bleibender Quellungsschutz oder eine « Quellungvergütung » läßt sich nur durch Eingriffe in das Feinbaugerüst erzielen. Verhältnismäßig frühzeitig erkannt wurde die erhöhte Raumbeständigkeit von Hölzern, die mit *hohen Temperaturen* getrocknet wurden, aber eigentlich erst in den letzten zehn Jahren wurden die Probleme systematisch erforscht und entsprechende technische Lehren gegeben. Hauptsächlich *Stamm* und Mitarbeiter in Madison arbeiteten hier als Pioniere. Der erste Weg, um zu Raumstabilität zu gelangen, besteht im « bulking-effect », also darin, daß man gewissermaßen die *Quellung* im Maximum *chemisch* « einfrieren » läßt. Man muß zu diesem Zweck zwischen die Mizelle an Stelle der leicht beweglichen Wassermoleküle Zucker, Salze, Kunstharze, Paraffin, Wachs und dergleichen bringen. Die technischen Schwierigkeiten sind dabei groß, und der Gebrauchswert ist im allgemeinen aus verschiedenen Gründen beschränkt. Eine Ausnahme bilden nur Furniere, die mit Harzlösungen imprägniert und anschließend zu Schichtholz verpreßt sind. Ihre ausgezeichnete Raumbeständigkeit beruht zu einem beträchtlichen Teil auf dem oben beschriebenen Effekt. Nahe verwandt sind die Verfahren, die *Ersatz der seitlichen Hydroxylgruppen* der Zellulosemoleküle durch größere chemische Gruppen anstreben. Bekanntgeworden ist hier das azetylierte Holz, das während mehrerer Stunden einem Gemisch von Pyridin- und Essigsäureanhydrid-Dämpfen ausgesetzt wurde. Die Schwindung läßt sich dadurch um bis zu 75 % verringern.

Man kann auf diesem Wege folgerichtig weitergehen und nicht nur die Zahl der freien Hydroxylgruppen verringern, sondern gleichzeitig *nichthygroscopische Brücken* zwischen den einzelnen Kettenmolekülen und Feinbaueinheiten aufbauen. Diese Erscheinung tritt teilweise bei der Hitzevergütung der Hölzer auf, die allerdings mit einem starken Abfall der mechanischen Eigenschaften erkauft werden muß. Vielleicht gelangt man aber auf diesem Wege einmal zu einem « vulkanisierten » Holz, sicher jedoch nur dann, wenn die eingangs geforderte universelle Holzforschung weiter vertieft, die Zusammenarbeit von Chemikern, Physikern und Technologen noch viel mehr als bisher intensiviert wird.

Kurz erwähnt wurde schon, daß die inkrustierenden Bestandteile der Zellwand, vornehmlich das *Lignin*, bei sachgemäßer Abstimmung

von Druck, Hitze und Feuchtigkeit, *plastisch fließen*. Dabei werden innere Spannungsspitzen abgebaut, und es kommt zu einem *Zusammensintern* von Holzbestandteilen. Bei allen hitzestabilisierten *Preßschicht-hölzern* spielen diese Phänomene eine Rolle, sie haben aber auch Bedeutung für die Herstellung von Holzfaser- und Holzspanplatten. Über die Natur der sich abspielenden Vorgänge haben H i g g i n s und G r i f f i n sehr bemerkenswerte Studien angestellt. Wir befinden uns aber sicher erst am Rande eines ungemein wichtigen Forschungsgebietes. Günstig ist dabei, daß über die plastischen Eigenschaften der Werkstoffe die tiefeschürfenden Betrachtungen von H o u w i n k vorliegen. Wahrscheinlich wird man die Plastifizierung auf chemischem Weg bedeutend steigern können. Bekannt ist, daß Harnstoff Holz leicht und ohne Bruchverluste biegsam macht. Das « *chemische Holzbiegen* » dürfte auf vielen Fertigungsgebieten Aussichten haben. Es ist nützlich, daß S t e v e n s und T u r n e r das Biegen von Vollholz und Schichtholz monographisch behandelt haben. Etwas mehr Aufmerksamkeit wird man der *Technologie der Preßformung* von Furnierplatten zu Schalen, Röhren und anderen mehrfach gekrümmten Gebilden widmen müssen. Die Technik mittels Autoklaven und Gummisackformen ist zwar schon hoch entwickelt und auch (zum Beispiel von P e r r y) beschrieben, aber systematische Versuche über die besten Verarbeitungsbedingungen fehlen noch.

Unter gewissen Voraussetzungen, auf die in diesem Zusammenhang nicht näher eingegangen werden kann, gestattet die *Hochfrequenzverleimung* bei geschwungenen, dickwandigen, aus mehreren Furnieren bestehenden Holzteilen besonders wirtschaftliche Fertigungsverfahren. Auch hier sind die beachtlichen Erfolge der letzten Jahre auf eine Gemeinschaftsarbeit von Physikern, Elektroingenieuren, Holztechnologen und Betriebsfachleuten zurückzuführen. Ein Verständnis der im Holz und in den Leimfugen zustandekommenden dielektrischen Heizung wäre ohne die Dipoltheorie von D e b y e ausgeschlossen. Auf ihr konnte die Physik der organischen Isolatoren aufgebaut und aus dem Feinbau sowie der chemischen Struktur das dielektrische Verhalten abgeleitet werden. B r a k e und S c h ü t z, S h a r p e und O' K a n e, vor allem aber K r ö - n e r, haben für Hölzer und Holzbestandteile umfangreiches Material vorgelegt.

Das Riesengebiet der Holzphysik sei nicht verlassen ohne den Hinweis, daß die *thermischen Eigenschaften* keine offenen Fragen mehr bieten. Für die Wärmeleitahlen liegen sehr zahlreiche Meßwerte vor, auch ihre Abhängigkeit von Wichte, Feuchtigkeit, Temperatur und Faser-richtung ist dank R o w l e y, G r i f f i t h und K a y e, W a n g a a r d und anderen genügend genau bekannt. Bei Anwendung der F o u r i e r s c h e n Theorie gelingt es, wie M a c L e a n, K o l l m a n n, K r i s c h e r und T h u n e l l zeigten, den *Temperaturverlauf* und der *Temperaturverteilung*

in Rundholz, Schnittholz und Lagerhölzern bei Erwärmung oder Abkühlung mit hoher Genauigkeit vorauszuberechnen. Mittels der Stefan-Boltzmannschen Gleichung lassen sich auch die Strahlungsverluste von Holz ermitteln, eine Aufgabe, die bei der Hochfrequenzbehandlung von Holz oft zu lösen ist, um die Wirtschaftlichkeit zu überprüfen. Die thermische Ausdehnung der Hölzer, die vor hundert Jahren zum erstenmal Struwe maß, die aber bei Vollhölzern wegen der größenordnungsmäßig überwiegenden Quellung oder Schwindung wenig Bedeutung besitzt, kann bei Schicht- und Sperrhölzern sehr merkbar werden. Weatherwax und Stamm haben deshalb eine große Forschungsarbeit durchgeführt und Formeln entwickelt, die es gestatten, die Koeffizienten der linearen Wärmeausdehnung in Abhängigkeit von der Wichte, dem Harzanteil und dem Aufbau für beliebige Winkel zur Faserrichtung zu berechnen.

Die *akustischen Eigenschaften* der Hölzer können hier, soweit sie als Schallisolation und Schallabsorption in den Bereich der Bauakustik fallen, übergangen werden. Aufschlußreiche neuere Erkenntnisse liegen aber über die Dämpfung von Longitudinal- und Transversalschwingungen verschiedener Hölzer vor. Krüger und Rohloff wiesen nach, daß die logarithmischen Dämpfungsdekremente in weitem Frequenzbereich konstant sind. Für den Geigenbau lassen sich aus diesen Untersuchungen und aus Messungen der Strahlungsdämpfung an ganzen Geigen — die Meyer durchführte — interessante Schlüsse ziehen, ohne daß das Geheimnis der Meistergeigen von Amati, Guarneri, Stradivari damit schon restlos geklärt wäre. Allerdings liegen manche Ansätze zu einer Lösung dieses Rätsels vor, unter anderem auch die chemischen Analysen von Schwalbe an Meistergeigenholz, bei denen sich ein überraschend hoher Aschengehalt auf CaCO_3 -Basis herausstellte, so daß man annehmen muß, daß geflößtes oder lange in kalkhaltigem Wasser eingelagertes Resonanzholz verarbeitet wurde. Auch Röntgen-Interferenz-aufnahmen stützen diese Annahme, aus der sich wieder eine erhöhte innere Reibung und damit Verlustdämpfung folgern läßt. Auf eine weitere Diskussion muß hier verzichtet werden.

Elastizität und Festigkeit

Die akustischen Eigenschaften sind eng verbunden mit den *elastischen*. Bei Holz als anisotropem Körper darf man hier keine einfachen Verhältnisse erwarten. Schon Savart (1829) und Helmholtz (1902) haben aber bei Holz drei zueinander senkrechte Symmetrieebenen, also ein *rhombisches Kristallsystem*, angenommen. Später hat dann Carrington die elastischen Konstanten genau gemessen, und Hörig hat — im Sinne der Voigtschen Kristallphysik — die eigentlichen

Grundlagen einer Elastizitätstheorie für Hölzer geschaffen. Die verschiedenen statischen und dynamischen Meßverfahren wurden dann immer mehr vervollkommenet und ihre Ergebnisse kritisch untersucht. Schnittkurven der Dehnungs- und Torsionsflächen für Nadelhölzer stammen von H ö r i g und T h u n e l l. K e y l w e r t h wies kürzlich den tiefgreifenden Unterschied im Verhalten von Nadel- und Laubhölzern nach; insbesondere Buchenholz ist viel weniger inhomogen als beispielsweise Kiefernholz. H e a r m o n und K e y l w e r t h haben über die Elastizität von Holz und Sperrholz zusammenhängende Arbeiten vorgelegt, die für den Werkstoffachmann und Konstrukteur sichere Grundlagen schaffen. Auch die Berechnung des Beulens von Platten und Zylindern ist damit möglich.

So umfassend die gewonnenen Erkenntnisse auf dem elastischen Gebiet sind, es sind doch noch viele Lücken aufzufüllen. Insbesondere verdienen die Übergänge von elastischer zu plastischer Verformung weitere sorgfältige Erforschung. Die Einwirkung des *Dämpfens* oder von *chemischer Vorbehandlung*, teilweise zum Beispiel von K o l l m a n n schon untersucht, muß umfassend geklärt werden. Ganz besondere Beachtung verdient ferner der *Zeiteinfluß*. Elastische Nachwirkung und Kriechen sind vielfach bei Holzteilen unter Spannung beobachtet worden. Sie beruhen auf plastischem Fließen, d. h. auf einem Zustandekommen quasi-viskoser Erscheinungen unter Einwirkung der Zeit. Es muß deshalb nachdrücklich betont werden, daß die moderne Werkstoffmechanik die Zeit neben der Spannung als gleichberechtigte Dimension einführen muß.

Die klassische Werkstoffprüfung und technische Mechanik war von einer solchen Betrachtungsweise weit entfernt; sie begnügte sich mit der Ermittlung von Formänderungen und Bruchspannungen in üblichen statischen Versuchen, wobei der Begriff « *Belastungsgeschwindigkeit* » völlig außer acht blieb. In den Jahren 1852 bis 1869 wies dann W ö h l e r in Pionierversuchen nach, daß Eisen und Stahl unter schwingender Belastung bei sehr viel niedrigeren Spannungen brechen als bei statischer Belastung. Die Begriffe « *Dauerfestigkeit* » und « *Ermüdung* » wurden geprägt, aber erst 1916 wurde im englischen National Physical Laboratory ein ähnliches Verhalten von Holz festgestellt. Forscher in Madison, R. S c h l y t e r, O. K r a e m e r und K ü c h haben dann Kurven publiziert, die den Zusammenhang zwischen Bruchspannung und Lastperiodenzahl ergeben. Von anderer Seite (zum Beispiel von O. G r a f) wurde die Dauerstandfestigkeit ermittelt. Davon unabhängig entwickelte man Prüfverfahren, um den Widerstand der Hölzer gegen *schlagartige Beanspruchungen* zu klären. Fallwerke und Pendelhämmer lieferten dabei Zahlen, die, stärker streuend als beim statischen Versuch, zwar mit der Wichte eng zusammenhängen, aber untereinander bei verschiedener Probengröße nicht vergleichbar waren. Eine Energiebilanz,

für die unter anderem Schwingungen bezeichnend sind, ermöglicht, wie K o l l m a n n und G h e l m e z i u zeigten, eine weitgehende Erklärung der Vorgänge beim Schlag, insbesondere des Zusammenhanges zwischen Bruchschlagarbeit und Stabvolumen. Als sehr instruktives Hilfsmittel, um die Bruchmechanik des Schlages, für die es noch keine befriedigende Theorie gibt, teilweise zu erhellen, erwies sich der Piezoindikator. Es handelt sich dabei um die mittels Quarzdruckdose, Hochfrequenzverstärkers und Braunscher Röhre als Funktion der Zeit aufgenommenen Druckschwankungen unter einem Auflager. Aus der maximalen Amplitude läßt sich mit dem Rüstzeug der technischen Mechanik die dynamische Biegefestigkeit berechnen. Die « Krokodil » benannte Brinell-Vorrichtung nach A m s l e r führt ungefähr zu demselben Ergebnis. Wesentlich ist, daß man dabei Biegebruchspannungen berechnet, die um 75 bis 100 % höher sind als die statischen Bruchspannungen. Umgekehrt ergeben sich beim Dauerstandversuch Bruchspannungen, die nur etwa 50 bis 60 % der statischen erreichen. Der Zeitfaktor ist damit in seinen Grenzen erfaßt und seine überragende Bedeutung festgestellt. M a r k w a r d t zeigte, daß die Bruchspannung linear abnimmt, wenn man sie über dem Logarithmus der Belastungsdauer aufträgt. Umgekehrt wächst die Festigkeit (insbesondere die Biegefestigkeit) proportional dem Logarithmus der Belastungsgeschwindigkeit, d. h. der auf die Zeiteinheit bezogenen Spannungszunahme. Es ist nicht ausgeschlossen, daß die Funktion Wendepunkte durchläuft. Zurückzuführen ist der starke Zeiteinfluß auf plastische Erscheinungen. Die Diskrepanz zwischen statischer, schlagartig dynamischer und schwingender Beanspruchung verschwindet völlig, insbesondere wenn man in *Dauerfestigkeitsschaubildern* (z. B. nach T h u m) den Zusammenhang zwischen Ursprungsfestigkeit, Dauerfestigkeit und Dauerstandfestigkeit darstellt. Grundsätzliche Probleme sind hier heute nicht mehr zu lösen, aber viele Einzelheiten, z. B. die Frage der *Kerbempfindlichkeit*, des Feuchtigkeitseinflusses, der Probengröße und der Temperatursteigerung infolge der inneren Dämpfung bieten noch interessante Forschungsaufgaben.

An sich ist das mechanische Verhalten als Funktion der *Temperatur* heute ebenfalls gut bekannt. K o l l m a n n hat in einem Bereich von -200 bis $+200^{\circ}$ Untersuchungen durchgeführt, die das allgemeine Temperatugesetz von der mit steigender Temperatur abnehmenden Kohäsion bestätigen. Zu belasten sind damit molekulare Schwingungen, die mit steigender Temperatur lebhafter werden, und Gitteränderungen infolge thermischer Expansion.

Ein weiteres Kernproblem der Werkstoffprüfung und -mechanik, und damit auch der Festigkeitslehre, ist die Frage der *Modellähnlichkeit* und damit der *Probengrößen*. Selbst bei isotropen und homogenen Kör-

pern spielt sie beispielsweise bei der Biegung infolge der Überlagerung von Schubspannungen in gedrungenen Stäben eine Rolle. Bei dem inhomogenen Holz ist sie von großer Bedeutung und hat dazu geführt, daß man zunächst einmal streng zwischen den Resultaten der Prüfungen von kleinen, fehlerfreien Proben (small clear specimen) und von Proben mit Bauholzabmessungen (structural timbers) unterscheidet. Ausgedehnte internationale Gespräche (besonders im Rahmen des Holzprüfausschusses im Internationalen Verband forstlicher Forschungsanstalten in Princes Risborough, April 1939) haben dazu geführt, daß für die kleinen Proben Abmessungen festgelegt wurden, die zu vergleichbaren und reproduzierten Resultaten führen. Noch nicht endgültig gelöst ist die Transformation auf beliebige größere Querschnitte. Es gibt dazu zwei Wege: den statistisch-empirischen, der den Vorzug großer Einfachheit hat und, wie Markwardt und Trayer zeigten, sehr leistungsfähig sein kann, sowie den theoretisch-mechanischen. Ylinen ist auf dem letzteren weit vorgedrungen und hat die Knick- und Biegetheorie für Holzbalken auf eine erweiterte Grundlage gestellt. Dabei spielen mathematisch fein ausgefeilte *Formänderungsgesetze* eine wichtige Rolle. Die früher von Engesser und Karmán formulierte Theorie, daß sich der Knickvorgang im plastischen und elastischen Gebiet durch eine einzige Funktion beschreiben läßt, wenn man an Stelle des Elastizitätsmoduls den aus dem Druckspannungs-Stauchungsdiagramm entnehmbaren Knickmodul einführt, hat sich voll bestätigt, und die Bedeutung der plastischen Erscheinungen ist erneut hell beleuchtet. Bei gegliederten Stützen tritt neben die Plastizität die Nachgiebigkeit der Verbindungen: die bisherigen *Knickberechnungen* mehrteiliger Stäbe — z. B. in der deutschen Norm DIN 1052 — befriedigen in dieser Hinsicht wenig, aber Melan in Wien und sein Schüler Wycital haben Vorschläge für eine bessere Behandlung ausgearbeitet. Grundsätzlich lassen sich Lagenhölzer bei Biegeberechnungen mit mehr Recht wie quasiisotrope Werkstoffe behandeln als Vollhölzer. Spannungsnachweise geben ein klares Bild von den Verhältnissen.

Von größter praktischer Bedeutung ist bei allen Bauhölzern der Einfluß der Ästigkeit. Knuchel hat in seinem Buche über die Holzfehler eindringlich die Mahnung erhoben, die Güteansprüche nicht höher zu schrauben, als es der Gebrauchszweck des Holzes unbedingt verlangt. In den USA hat man zuerst *Güteklassen für Bauhölzer* geschaffen, später folgten immer mehr Länder, darunter Deutschland mit der Norm DIN 4070. Wertvolle experimentelle Untersuchungen lieferten dazu Graf, Siimes und Thunell. Bemerkenswert ist bei der von Thunell durchgeführten Forschungsarbeit, daß Biegefestigkeit, Proportionalitätsgrenze und Elastizitätsmodul zwar zur Wichte und Feuchtigkeit in geradlinigem Verhältnis stehen, daß aber die Beziehung zum

Astquotienten durch eine hyperbolische Funktion wiedergegeben werden muß. Die Analogie zum Knickvorgang springt ins Auge und drängt zu einer näheren Analyse der sich in ästigem Holz unter Belastung abspielenden Formänderungen. Wieder wird man dabei auf das Problem der Plastizität und der Kerbwirkung stoßen. Y l i n e n hat dazu Tastversuche durchgeführt, theoretisch kann auf die «Kerbspannungslehre» von N e u b e r t zurückgegriffen werden, die freilich für das anisotrope und inhomogene Holz modifiziert werden muß.

Die offenen Festigkeitsprobleme sind damit noch lange nicht erschöpft, aber es ist unmöglich, alle zu streifen. Das Material über die *Zugfestigkeit* längs der Faser sollte vermehrt und grundsätzlich die Querkzugfestigkeit an geeigneten Proben und nicht an den bisher üblichen «Doppelspaltproben» ermittelt werden. Man erhält dann Querkzugfestigkeiten, die mehrfach höher sind als die technologischen Kennzahlen, die man bei den Doppelspaltproben findet. *Torsionsversuche* an Holz sollten theoretisch richtig ausgewertet werden, die meist schematisch gebrauchte Formel nach S t. V e n a n t liefert bei Probestäben mit quadratischem Querschnitt keine echte Bruchspannung, sondern eine ziemlich willkürliche Zahl. H ö r i g und R e i ß n e r haben sich mit dieser Frage angelegentlich beschäftigt. Zum mindesten sollte man aus Torsionsversuchen nicht mit der S t. V e n a n t'schen Formel für isotrope Körper Schubmoduln für das anisotrope Holz ableiten. Soweit man diese Zahlen aber doch berechnet, muß man sie als Drillungsmoduln oder sinngemäß bezeichnen. Eng verwandt, aber noch komplizierter, ist die Ermittlung der *Scherfestigkeit*. Es ist leider nahezu ausgeschlossen, in einem Probekörper versuchsmäßig reine Scherspannungen hervorzurufen. Seit B a u s c h i n g e r und R u d e l o f f haben sich unzählige Forscher dieser Aufgabe gewidmet, darunter vor allem W i j k a n d e r, W a r r e n, T j a d e n, L a n g, G a b e r, E h r m a n n, C h a p l i n, P e t e r m a n n, W i n t e r und viele Industrielaboratorien. Es gibt einschnittige und zweischnittige Proben, Proben in Form geschlossener Rahmen, Bolzen- und Schereisenproben. Ihre Ergebnisse differieren um bis zu 100 %, aber sie mögen von Fall zu Fall den Verhältnissen der Praxis vergleichsweise am besten entsprechen und deshalb für den Konstrukteur nützlich sein. Ähnliches gilt hinsichtlich der *Lochleibefestigkeit*, d. h. der Vorgänge in der Bettung unter belasteten Bolzen.

Die *Härte* ist dabei wichtig. Über die Härteprüfung der Hölzer ist in den letzten 20 Jahren viel gestritten worden. Über J a n k a - B r i n e l l - M ö r a t h führte der Weg zu den Vorschlägen von H u b e r, P a l l a y und K r i p p e l. Kürzlich haben W e a t h e r w a x, E r i c k s o n und S t a m m eine modifizierte ASTM-Härteprüfung vorgeschlagen, die über den ganzen Wichtebereich von normalen und vergüteten Hölzern an-

wendbar ist. Es wäre zu wünschen, daß hier bald internationale Absprachen getroffen werden; auch bei der Prüfung des *Abnutzungswiderstandes* muß dieses Ziel im Auge behalten werden, jedoch dürfte der Weg noch weiter sein, da die Methoden hier noch nicht gründlich genug erforscht sind.

Technologische Forschungen

Die vielseitigen Aufgaben der mechanischen Holztechnologie sind aber mit den bisher kurz besprochenen Problemen noch keineswegs abgeschlossen. Beispielsweise zählen dazu auch alle Untersuchungen und Entwicklungsarbeiten an Holzverbindungen. *Nagelverbindungen* lassen sich heute dank den Arbeiten des US Forest Products Laboratory und von Graf und Stoy einwandfrei berechnen und sind in alle Bau-normen aufgenommen. Eine geradezu revolutionierende Entwicklung kennzeichnet die *Leimverbindungen*. Die klassischen Glutin- und Kaseinleime sind weitgehend verdrängt; mit Latexemulsionen vermischt, haben letztere allerdings für Holz-Metall-Verleimung neuartige und wichtige Anwendung gefunden. Die Theorie der Adhäsion hat in den letzten Jahren die Forscher stark beschäftigt; grundsätzlich werden dabei zwei Möglichkeiten diskutiert: mechanische Adhäsion (zum Beispiel durch Porenverankerung) und molekulare Adhäsion. Die Argumente, daß die festesten Verbindungen durch molekulare Adhäsion erzielbar sind, haben stark an Gewicht gewonnen; eine praktische Anwendung stellt das in England entwickelte Reduxverfahren dar. Die Erkenntnis, daß sich mit minimalen Bindemittelmengen oft die beste Wirkung erreichen läßt, hat auch für die Herstellung von *Faser- und Spanplatten* sehr große Bedeutung. Dabei wird man allerdings die einzelnen Bindemitteltypen getrennt untersuchen müssen. Neben den verschiedenen Kunstharzleimen auf der Basis von Phenol, Kresol, Harnstoff, Melamin müssen vor allem die im Holzstoff selbst vorhandenen Klebstoffe, sei es auf der Grundlage des Lignins — zum Beispiel nach den alten Masonite-Patenten —, sei es der Hemizellulosen — zum Beispiel nach langem Mahlen —, von allen Seiten her studiert werden. Damit wird zugleich ein entscheidender Beitrag zur Lösung des Holzabfallproblems geleistet werden, da man dann der wirtschaftlichen Erzeugung hochwertiger Spanplatten näher kommt.

Die Bildung der Späne selbst bei der Holzbearbeitung und -verarbeitung ist Sache der *Zerspannungsforschung*. Ihre Aufgabe besteht darin, die Vorschub- und Schnittkräfte bei verschiedenen Schneideformen zu finden. Die Zerspannungsforschung soll dabei der Betriebswirtschaft dienen und die komplizierte Aufgabe lösen, wie Holz mit möglichst wenig Schnittverlusten und relativ geringem Energieaufwand bei langer Werkzeugstandzeit mit hoher Oberflächengüte bearbeitet werden kann.

Leider sind unsere Kenntnisse auf diesem Gebiet noch ganz unzureichend, und es wird großer Anstrengungen bedürfen, um hier die Lücken zu füllen.

Ausblick

Die Zahl der noch zu lösenden Aufgaben wurde damit um eine sehr große vermehrt, aber es darf über dieser Feststellung nicht die Erkenntnis verlorengehen, welche bedeutende Leistungen die Holzforschung in den zurückliegenden 20 Jahren erzielt hat. Die Erfolge waren deshalb so groß, weil eine universelle, die wahren naturgesetzlichen Ursachen aufspürende und formulierende Forschung betrieben wurde. Es muß hinzugefügt werden, daß die Holzforschung aber nicht nur universell, sondern auch global betrieben wurde und werden muß.

Internationale Zusammenarbeit ist gerade bei der Holzforschung besonders nötig und fruchtbar. Gemeinsam können und sollen die Experten aller Länder Holzforschungen planen, durchführen, auswerten, erörtern mit dem Ziele, der Wissenschaft zu dienen, der Wirtschaft zu helfen und die Wohlfahrtswirkungen der Wälder zu erhalten.

Résumé

Les problèmes soulevés par la conservation et la protection des bois, par la charpenterie, le génie civil et la construction navale donnèrent, sans aucun doute, naissance à la technologie du bois. Elle débuta modestement dans l'antiquité — *Plin*e ne s'occupait-il pas de technologie — pour atteindre son apogée par les «œuvres» de *Duhamel du Monceau*. Cependant, au cours de cette longue période, toute la question ne fut envisagée qu'empiriquement.

A partir de 1848, date à laquelle toutes les sciences reçurent une grande impulsion, commença, avec *Chevandier* et *Wertheim*, la période analytique des recherches sur le bois. Sans vouloir diminuer la portée scientifique de cette époque, on peut dire qu'elle est caractérisée par un manque de synthèse.

Par suite, soit depuis le début de la première guerre mondiale, on synthétisa toujours plus les résultats des investigations. Le développement des connaissances scientifiques ouvrit de nouveaux horizons à la technologie du bois, et la recherche fondamentale fut activement poussée. L'étude de la structure submicroscopique des fibres du bois devint le centre des travaux xylogiques et marqua cette période de synthèse. Pourtant cette fructueuse troisième époque n'éleva pas la technologie du bois au rang d'une science proprement dite. Dès 1929, le besoin de condenser les connaissances acquises dans un ouvrage encyclopédique se fit de plus en plus sentir. C'est ce qui poussa *Kollmann* à écrire sa « Technologie des Holz » . Il faut être reconnaissant à l'auteur d'avoir comblé une grande lacune et d'avoir apporté ainsi une contribution importante à la science du bois.

La publication de cet ouvrage coïncida avec une nouvelle orientation

des sciences naturelles. La chimie macromoléculaire et la physique moléculaire permirent d'élucider la constitution de la matière. Non seulement nombre de propriétés du bois trouvèrent ainsi une explication, mais l'application des mathématiques supérieures au bois fut également rendue possible.

On ne peut saisir qu'imparfaitement les résultats des recherches sur le bois de ces dix dernières années sans connaître la grande évolution qui s'est accomplie dans ce domaine. C'est pourquoi l'auteur a dressé cette rétrospective avant d'exposer la situation actuelle des travaux.

Dans le domaine de l'anatomie du bois, la technique microscopique a été fortement développée, d'excellentes tables d'identification des bois, accompagnées de microphotographies, ont été publiées. Certains instituts ont édité des fiches de détermination basées sur le système de classification Hollerith. Des corrélations — quoique la question soit très complexe — ont été dressées entre les caractères anatomiques et les propriétés physiques du bois. Plus simples sont, par contre, les relations entre la largeur des cernes et la densité. L'étude de la composition chimique de la paroi cellulaire des fibres a fourni l'explication de certaines propriétés mécaniques du bois. Les rayons X et la spectrographie complètent l'étude anatomique. Les rayons X sont surtout utilisés pour déceler les altérations (pourritures, vermoulures). Notons que dans une analyse xylogique, Kollmann n'a trouvé aucune différence entre l'aubier et le cœur du bois de frêne. Pourtant, dans le commerce des bois, le duramen du frêne passe pour être plus cassant que l'aubier.

La question très importante et délicate du séchage des bois a été étudiée par des ingénieurs et des physiciens. En réalité, il s'agit d'un problème de perméabilité, de capillarité et de diffusion. Des formules simples permettant de calculer la durée de séchage ont été établies, rendant ainsi d'appréciables services aux industriels du bois.

En ce qui concerne la protection des bois, relevons que certaines substances, à base de phénol probablement, contenues dans le bois sont très toxiques. A l'aide d'un traitement approprié (haute température), il semble que l'on puisse former des fongicides puissants dans le bois même. La combinaison de procédés classiques de protection des bois a donné également d'excellents résultats.

Les poids spécifiques des bois sont aujourd'hui bien connus. Ils varient de 0,12 à 1,35 g/cm³. Techniquement on peut réaliser, par compression, des densités allant jusqu'à 1,45 g/cm³ (densité de la matière cellulosique pleine = 1,50 g/cm³). Cette densification du bois est accompagnée d'une forte augmentation de la résistance mécanique. De même, le poids spécifique peut être abaissé à 0,08 g/cm³ dans les panneaux de fibres extra-légers. Ces panneaux offrent de grandes possibilités à la construction et une ère nouvelle semble s'ouvrir à ces matériaux. De grands progrès ont d'ailleurs été réalisés dans la diminution, voire la suppression du gonflement et du retrait du bois. Les bois sont traités avec des solutions sucrées, salées, des résines synthétiques, de la paraffine ou de la cire. Un autre procédé utilise des vapeurs d'anhydride acétique et de pyridine. Mais toutes ces méthodes offrent encore de nombreuses difficultés et leur application est souvent limitée.

D'excellents travaux sur l'influence de la température, de la pression et de l'humidité sur la plasticité de la lignine ont été publiés. Ce phénomène joue un rôle important dans la fabrication des bois améliorés, des panneaux de fibres et des panneaux de copeaux. Des études systématiques doivent, par contre, encore être entreprises sur le cintrage, le formage et le moulage des bois.

Les propriétés thermiques des bois sont assez bien connues. Les coefficients de conductibilité thermique ont été calculés en fonction de la densité, de la teneur en eau, de la température et du fil du bois. Dans le domaine des propriétés acoustiques, signalons que l'analyse du bois d'un violon de maître a révélé une forte teneur en CaCO_3 . On doit donc admettre que les maîtres luthiers immergeaient longuement dans de l'eau calcaire les bois employés à la confection des violons ou utilisaient des bois flottés dans des eaux calcaires.

Les propriétés acoustiques sont intimement liées aux propriétés élastiques du bois. L'étude de l'élasticité, vu l'anisotropie et l'hétérogénéité du bois, n'a pas été aisée. De nombreuses questions doivent encore être résolues, notamment celles des déformations à la limite des domaines plastique et élastique. Le facteur temps devra également être introduit dans ces recherches.

L'essai mécanique classique des matériaux n'a comporté assez longtemps que les mesures des déformations et des tensions de rupture. La notion de la fatigue fut introduite et l'on établit que le comportement du bois à ce genre de sollicitation était identique aux autres matériaux, c'est-à-dire inférieur. L'essai au choc compléta ces recherches mécaniques. Quoique les résultats obtenus aient une plus grande dispersion que ceux des essais statiques, ils montrent une meilleure corrélation avec la densité, mais varient, par contre, trop fortement selon les dimensions des éprouvettes. Ce dernier point reste un des problèmes les plus importants à résoudre dans l'étude des résistances mécaniques des bois. L'influence de la nodosité sur les propriétés mécaniques a également été expérimentée. La nodosité est d'ailleurs étroitement liée à la classification des sciages. Notons que nombreux sont les pays qui ont déjà adopté une classification des sciages. Les méthodiques des essais de traction, de torsion, de cisaillement, de dureté et d'usure doivent être modifiées et développées. Citons encore les études faites sur les assemblages par clous, permettant ainsi le calcul des efforts.

La technique du collage a subi un développement quasi révolutionnaire, les colles de caséine et de gélatine ont été évincées par les résines synthétiques, à base de phénol, de créosol et d'urée. Les résultats obtenus sont surprenants. On cherche aujourd'hui à établir des adhésions moléculaires et à utiliser les substances agglutinantes (lignine, hémicelluloses) contenues dans le bois.

Ce bref aperçu nous montre que le nombre de problèmes à résoudre est encore considérable, mais on ne peut nier le prodigieux essor pris par la technologie du bois au cours de ces vingt dernières années. Ce succès est avant tout dû à une recherche scientifique très poussée. *O. Lenz.*