

# Methoden der physikalischen Holzforschung

Autor(en): **Kollmann, Franz**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal  
= Journal forestier suisse**

Band (Jahr): **113 (1962)**

Heft 1

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-768016>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Methoden der physikalischen Holzforschung

Von *Franz Kollmann*, München

Oxf. 812--010

Institut für Holzforschung und Holztechnik der Universität München

Die Methoden der physikalischen Holzforschung sind experimenteller und theoretischer Art und damit entweder vorwiegend induktiv oder deduktiv. Obwohl die Holzforschung im ganzen gesehen jungen Datums ist — als organisierter Selbstzweck begann sie erst im Jahre 1910 mit der Gründung des US Forest Products Laboratory in Madison —, haben schon in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts einzelne Physiker sich auch mit Holz beschäftigt, zum Beispiel bei der vergleichsweisen Bestimmung seiner Wärmeausdehnung, seiner Wärmeleitzahl, seiner spezifischen Wärme, ja sogar seiner Quellungsphänomene (1). Früher schon wurden Messungen über Elastizität und Festigkeit angestellt, zum Beispiel in der klassischen Studie von E. Chevandier und G. Wertheim (2).

Obwohl Elastizität und Festigkeit, zusammengefaßt als mechanische Eigenschaften, zu den wichtigsten Eigenschaften eines Festkörpers gehören, sei über die Methoden bei ihrer Erforschung nicht berichtet, da die Holzmechanik in den Instituten neben der Holzphysik eine selbständige Stellung einnimmt. Immerhin muß hervorgehoben werden, daß die Festkörperphysik heute ein besonders wichtiges und interessantes Gebiet der Physik geworden ist und daß die Probleme gerade bei den Festkörpern mit gittermäßig geordneten Atomen oder Molekülen, den Kristallen, sehr vielschichtig, interessant, aber auch schwierig berechenbar sind. Die Tatsache der Kristallstruktur des Holzes mit drei zueinander senkrechten symmetrischen Ebenen hat schon 1829 der französische Physiker F. Savart (3) erkannt; H. von Helmholtz (4) hat sie in seinen Vorlesungen über theoretische Physik (1901) ebenfalls ausgesprochen, und auf ihr fußten dann die grundlegenden Arbeiten von H. Carrington (5) und später von H. Hörig (6), der dabei auf das großangelegte Werk «Kristallphysik» von W. Voigt (7) zurückgreifen konnte.

Die Lage der symmetrischen Ebenen in einem Holzwürfel zeigt schematisch Bild 1. Es kann sich dabei nur um eine mehr oder minder grobe Annäherung handeln, da die Jahrringe in Wirklichkeit im Querschnitt und radialen Längsschnitt nicht als parallele Gerade verlaufen. Trotzdem ist die vereinfachende Annahme nach Bild 1 nicht nur die Voraussetzung der Möglichkeit einer Berechnung des elastischen Verhaltens von Holz und Holz-

werkstoffen, sondern auch der Leitung von Wärme, Temperatur, Schall und elektrischem Strom in beliebigem Winkel zur Faserrichtung. Zur Anisotropie gesellt sich die Inhomogenität, das heißt bei den im gemäßigten Klima gewachsenen Hölzern treten zeitlich periodische Dichteschwankungen innerhalb eines Jahrrings und innerhalb einer Folge von Jahrringen auf. Schließ-

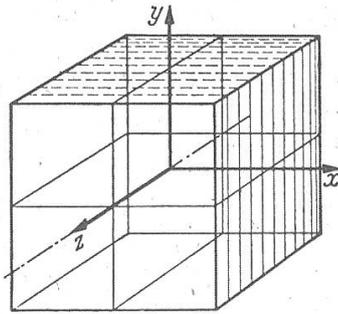


Abb. 1

Lage der Symmetrie-Ebenen in einem Holzwürfel

lich kommen Fehler und Störungen im normalen anatomischen Gefüge vor. Zusammengefaßt ergeben sich daraus die erheblichen Eigenschaftsschwankungen, die bei jedem biologisch gebildeten Kollektiv in Erscheinung treten und bei Versuchen, die zu gesicherten Aussagen führen sollen, nicht nur zu entsprechenden Reihenmessungen an einer genügend großen Auswahl repräsentativer Proben, sondern auch zu mathematisch-statistischer Auswertung zwingen.

Unerläßliche Grundregeln für die Methodik physikalischer Holzforschungen wurden damit einleitend herausgestellt, für die im folgenden nur einige typische Beispiele gegeben werden. Begonnen sei mit der Rohdichte, die von allen physikalischen Eigenschaften des Holzes zuerst untersucht wurde und in der schon Buffon (in seinen Œuvres 1749 bis 1788) das wichtigste Merkmal für die baugewerbliche Güte des Holzes sah. Ihre experimentelle Bestimmung ist bei Hölzern infolge ihrer Quellung bzw. Schwindung nicht ganz einfach exakt durchführbar. Die äußerst wichtige Tatsache, daß die Reindichte der porenlosen verholzten Zellwand  $1,50 \text{ g/cm}^3$  unabhängig von Art und Wuchsort beträgt, hatte in erster Annäherung schon J. Sachs (8) festgestellt. Später wurden die Messungen dann wesentlich verfeinert. Statt über das Gleichgewicht von Holzscheibchen in Salzlösungen verschiedener Dichte bestimmte man die Reindichte durch Verdrängung in Wasser, Äthylalkohol, Benzol und schließlich Helium. Das letztgenannte Verfahren dürfte die wahren Dichtezahlen liefern (9), da die damit für Zellulose erhaltenen Werte vorzüglich mit der aus den röntgenographisch vermessenen Gitterabständen und dem Molekulargewicht der Cellobiose-Einheiten berechneten Zahl ( $\gamma = 1,582 \text{ g/cm}^3$ ) (10) übereinstimmen. Technisch von größter Bedeutung ist die Kenntnis der Zusammenhänge zwischen der Rohdichte  $r_u$  des Holzes bei

einem bestimmten Feuchtigkeitsgehalt  $u$  und seiner Darrdichte  $r_0$ . Verschiedene empirische Beziehungen, die in beschränktem Feuchtigkeitsbereich und nur für bestimmte Hölzer gültig waren, finden sich in der älteren Literatur (2, 11, 12). Unter gewissen, auf Grund anderer Untersuchungen zulässigen Annahmen (das maximale Quellmaß ist gleich dem Produkt aus Fasersättigungsfeuchtigkeit mal Rohdichte im Darrzustand; linearer Verlauf der Quellungskurven als Funktion der Holzfeuchtigkeit zwischen 0 und 25 Prozent Holzfeuchtigkeit; Quellungswert von 75 Prozent der maximalen Quellung bei 25 Prozent Holzfeuchtigkeit) läßt sich aber der Einfluß der Feuchtigkeit auf die Dichte deduktiv Schritt für Schritt berechnen. Die gute Übereinstimmung der so berechneten Kurven (13, 14) mit älteren Meßergebnissen von G. Janka (1904, 1918) zeigt Bild 2 (15).

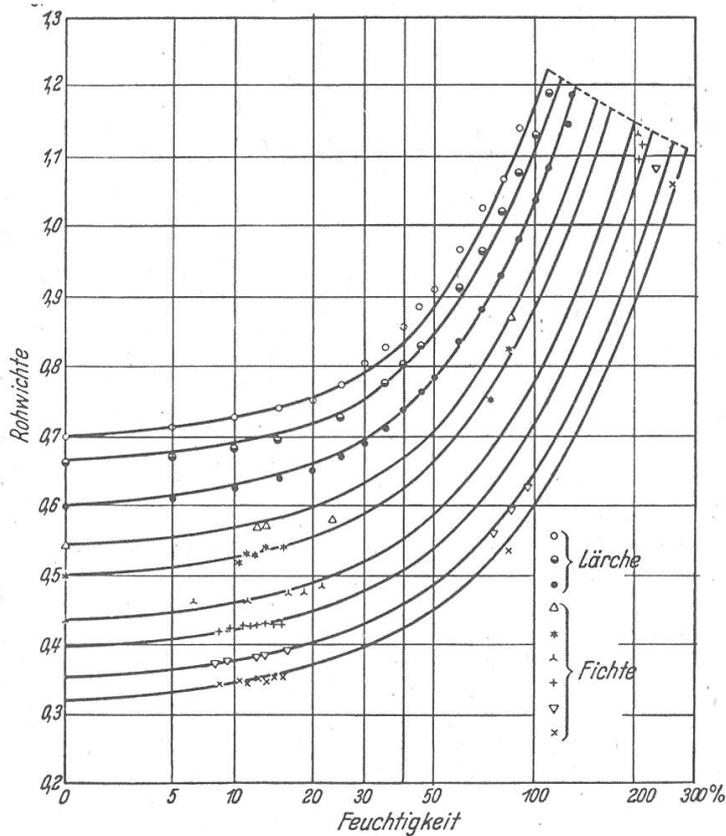


Abb. 2

Vergleich der nach F. K o l l m a n n berechneten Kurven für die Abhängigkeit der Rohdichte von der Feuchtigkeit mit Meßergebnissen von G. J a n k a .

Während die Beziehungen zwischen Rohdichte und Jahrringbreite — denen man lange, seit H. Nördlinger (1860) (16) und R. Hartig (1885) (17), nachgespürt hat — sich nur qualitativ durch Kurven wiedergeben lassen, für die sich mathematische Ansätze nicht lohnen, gibt es einen solchen zwi-

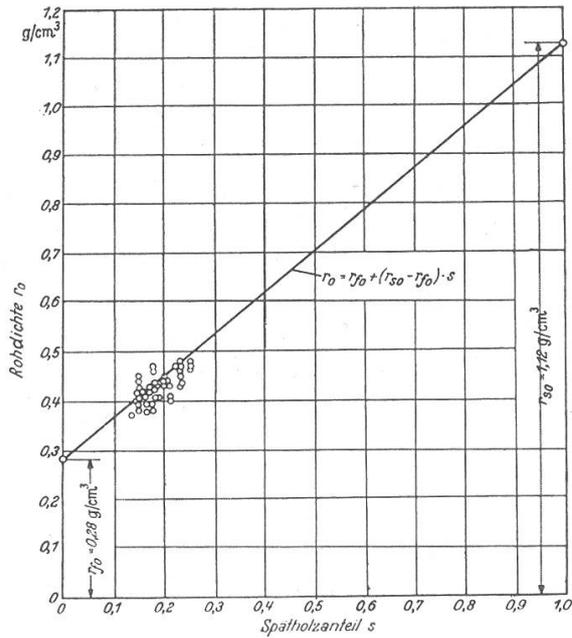


Abb. 3

Theoretischer Zusammenhang zwischen Rohdichte und Spätholzanteil, verglichen mit Meßpunkten für finnisches Kiefernholz (nach A. Y l i n e n)

schen der Rohdichte und dem Spätholzanteil (18). Allerdings zeigt Bild 3 für den engen Dichtebereich finnisches Kiefernholzes, Bild 4 für den weiteren von Eschenholz (19), welche beträchtliche Streuungen in Kauf genommen werden müssen.

Schwerpunktgebiet der physikalischen Holzforschung sind die Beziehungen zwischen Holz und Feuchtigkeit — die erstmals L. F. Hawley 1931 (20)

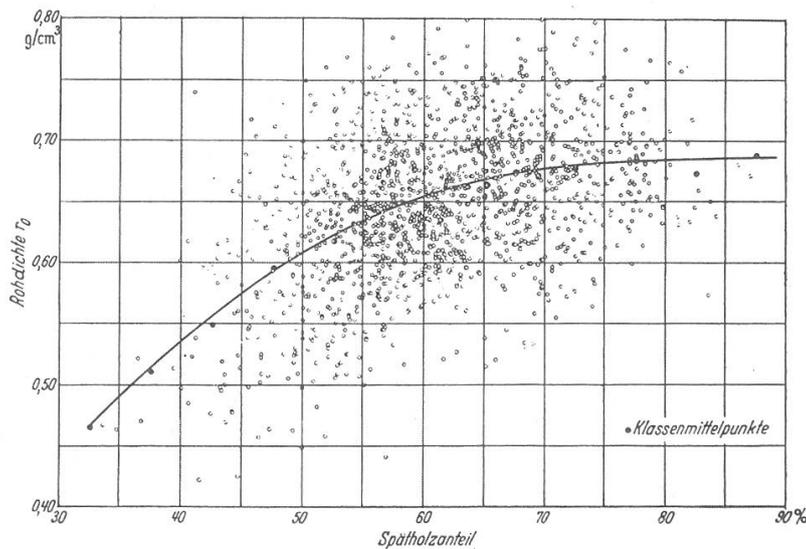


Abb. 4

Zusammenhang zwischen Rohdichte  $r_0$  und Spätholzanteil bei Eschenholz (nach F. K o l l m a n n)

zusammenfassend in moderner Sicht darstellte —: Sorption, Kapillarkondensation und Quellung. Eine exakte Bestimmung der Holzfeuchtigkeit ist in der Regel nur durch Darren oder Trocknen im Hochvakuum oder, bei Hölzern, die neben Wasser flüchtige Bestandteile enthalten, durch Destillationsverfahren möglich. Die Physik hat aber durch Aufklärung der Zusammenhänge zwischen elektrischem Widerstand bzw. elektrischer Leitfähigkeit einerseits und der Holzfeuchtigkeit andererseits frühzeitig (USA 1930) die Grundlagen zum Bau elektrischer Holzfeuchtigkeitsmesser geliefert, die im Bereich von 7 bis 25 Prozent Holzfeuchtigkeit ziemlich zuverlässig arbeiten, wobei allerdings der Einfluß der Temperatur, besonders bei höheren Temperaturen, zu berücksichtigen ist, wie R. Keylwerth und D. Noack (21) nachwiesen.

Die Aufnahme bzw. Abgabe kondensierbarer Dämpfe durch porige Körper, zum Beispiel Holz, bis zu einem durch den relativen Dampfdruck und die Temperatur bedingten Gleichgewicht wird als Sorption bezeichnet. Sie steht in engem Zusammenhang mit den physikalischen und chemischen Eigenschaften des «Sorbens». Eine große Anzahl von experimentellen Messungen über das Sorptionsverhalten von Holz und seinen Bestandteilen liegt im Schrifttum vor. Gründliche Diskussionen über das gesamte Phänomen u. a. durch A. Eucken (22), J. Langmuir (23), H. Freundlich (24), E. Hückel (25), S. Brunauer, P. H. Emmett und E. Teller (26) führten zu recht klaren Vorstellungen über die aufeinanderfolgenden und ineinander übergreifenden Phasen von Chemosorption, Adsorption und Kapillarkondensation. Der Versuch, die Erscheinungen in ihrer Gesamtheit von einem einzigen Gesichtspunkt aus zu klären, scheiterte, solange man induktiv voringing. Erst vor kurzem (27) wurde deduktiv eine Sorptionstheorie auf thermodynamischer Grundlage vorgelegt, die offenbar zu einer solchen Gesamtschau führt. Ein Sorptionskolloquium im Sommer 1958 war in der Schwedischen Holzforschungsanstalt in Stockholm diesem Fragenkreis gewidmet<sup>1</sup>.

Sicherlich — und das berührt die Fragen der Methoden der physikalischen Holzforschung engstens — müssen die Meßverfahren gegenüber den bisher üblichen vielfach noch erheblich verfeinert werden. E. Mörath (28) hat das Verdienst, zuerst für eine Reihe von Nutzhölzern die Schleifenkurven der hygroskopischen Isothermen bei Adsorption und Desorption und damit die Hysterese experimentell aufgenommen zu haben. Zu jener Zeit, also vor 29 Jahren, war die physikalische Holzforschung methodisch noch nicht so entwickelt, wie es heute der Fall ist. Über den Einfluß der Probengröße, des barometrischen Drucks bei den Versuchen, über die Anforderungen an Temperaturkonstanz, besonders in der Nähe des Sättigungsdrucks, war man sich noch nicht genau im klaren. A. J. Stamm und W. K. Loughborough (29) wiesen allerdings wenig später darauf hin, daß man bei der Trocknung großer

<sup>1</sup> Alle Vorträge, die dort gehalten bzw. verlesen wurden, sind im Mai-Heft 1959 der Zeitschrift « Holz als Roh- und Werkstoff » abgedruckt.

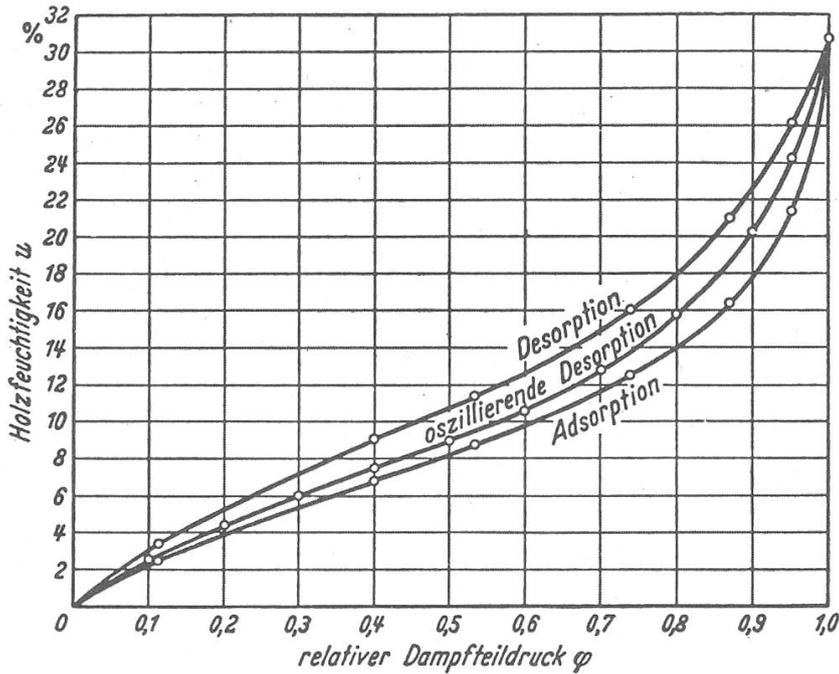


Abb. 5

Adsorptions-, Desorptions- und Hysteresekurven für Fichtenholz und hystereselose Kurve für oszillierende Sorption (Fichtenholz bei 25°) nach A. J. S t a m m

Holzstücke selbst unter sorgfältig kontrollierten Bedingungen eine hygroskopische Isotherme erhält, die innerhalb der Hystereseschleife liegen muß (Bild 5). Die Ursache liegt darin, daß Desorptions- und Adsorptionsvorgänge gleichzeitig stattfinden (oszillierende Sorption). Bei Sorptionsversuchen mit verhältnismäßig großen Holzproben ist diese Erscheinung unvermeidlich. Das gleiche Phänomen stellt sich bei Temperaturschwankungen ein. Im

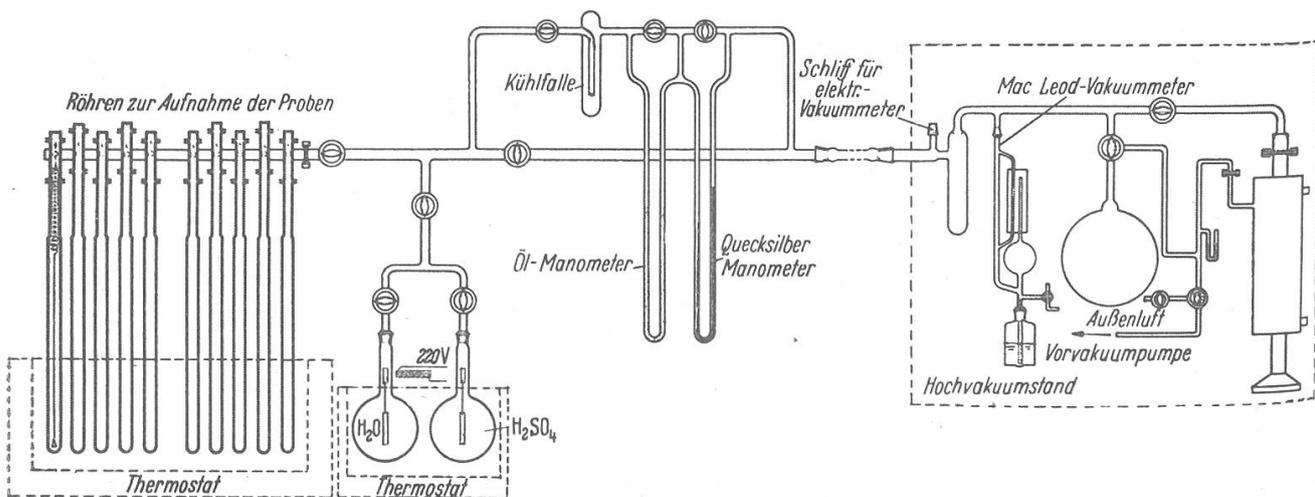


Abb. 6

Schematische Darstellung der Meßapparatur für wissenschaftlich exakte Sorptionsuntersuchungen (nach F. K o l l m a n n und A. S c h n e i d e r).

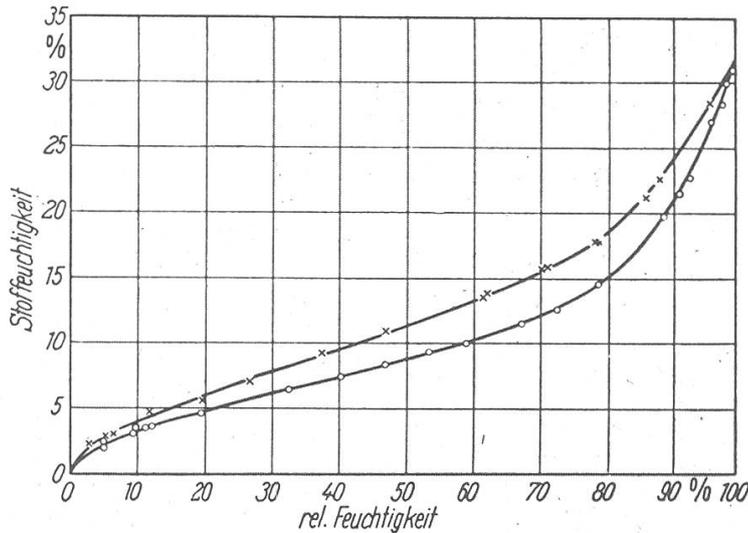
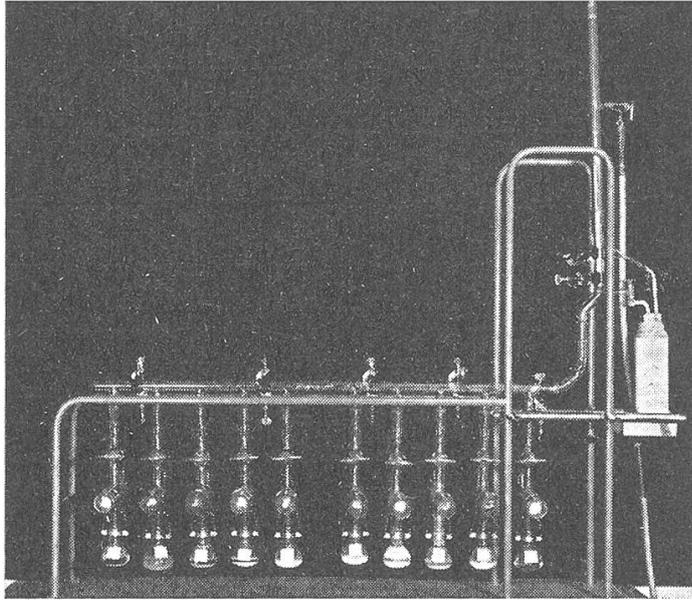


Abb. 7

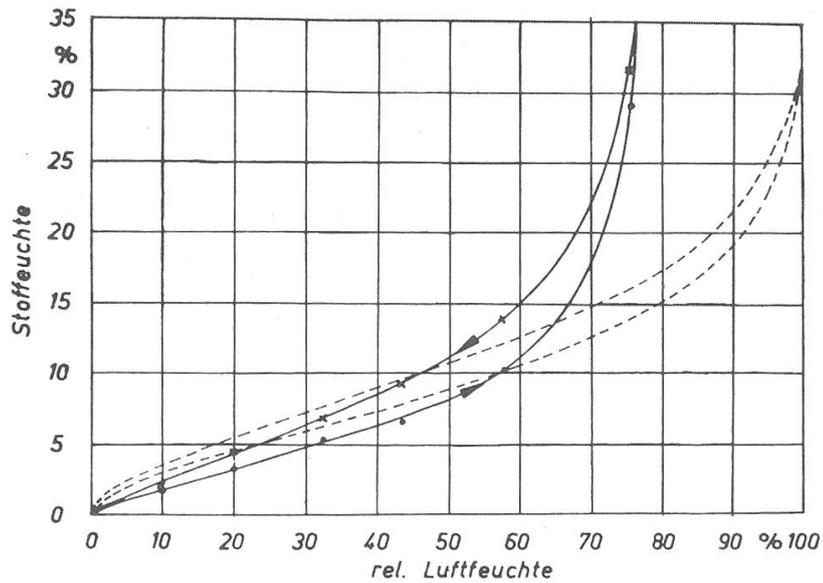
Sorptionsschleife für 25° einer unbehandelten Fichtenholzprobe

Münchener Institut für Holzforschung und Holztechnik wurde deshalb im Rahmen exakter Sorptionsuntersuchungen eine Meßapparatur für höchste Anforderungen entwickelt (30). Das Schema der Apparatur zeigt Bild 6. Das Prinzip: die Benutzung von Glasröhren, in denen sich die sorbierende Holzprobe (mit rund 0,1 g Gewicht), an einer Quarzglas-Schraubenfeder aufgehängt, befindet, deren wechselnde Elongation als Funktion der Gewichtsänderungen des Holzes bei der Sorption mit Hilfe eines Ablesemikroskops bestimmt wird, ist durch verschiedene frühere Vorschläge, zum Beispiel von L. M. Pidgeon und O. Maab (31) sowie W. O. Milligan und Mitarbeitern (32) bekannt. In dem Münchener Gerät ist es aber gelungen, durch einen besonders entwickelten Ultrathermostaten eine Temperaturkonstanz im Meßraum von  $\pm 0,001$  Grad Celsius zu erreichen. Der Dampfdruck wird mit zwei Flaschen, von denen die eine Wasser, die andere Schwefelsäure-Wasser-Gemisch bestimmter Konzentration enthält, konstant gehalten. Gearbeitet wird im Luft-Hochvakuum in der Größenordnung von  $10^{-5}$  Torr. Bild 7 zeigt eine aufgenommene Sorptionsschleife. Man sieht, daß die Meßpunkte sich sehr genau durch die Adsorptions- und Desorptionskurven ausgleichen lassen, daß die Hysterese stark ausgeprägt ist und unmittelbar nach dem Darrzustand beginnt und daß noch bei etwa 99,8% relativem Dampfdruck einwandfreie Meßpunkte ohne Störungen durch Kondensationserscheinungen erhalten wurden, so daß eine zuverlässige Extrapolation auf 100 Prozent relativen Dampfdruck möglich ist und der Fasersättigungspunkt zu einem realen Punkt gestempelt wird. Entgegen den Ansichten von A. W. Lykow (33) und A. Villière (34) verschwindet die Hysterese der Sorption bei Bestimmung der beiden Sorptionsäste im Vakuum nicht. In der Apparatur wird das Sorptionsverhalten von unbehandelten und thermisch beanspruchten Hölzern sowie von Holzwerkstoffen im



*Abb. 8*

Versuchsapparatur für Sorptionsmessungen mit gesättigten Salzlösungen im Vakuum  
(nach A. Schneider)



*Abb. 9*

Sorptionsisothermen (20 °C) für Fichtenholz nach Imprägnierung mit Basilit-3-fach.  
Gestrichelte Kurve für unbehandeltes Fichtenholz  
(nach F. Kollmann und A. Schneider)

Temperaturbereich von 20 bis etwa 190°C untersucht. Allerdings ist dieses Programm mit sehr großem Zeitaufwand verbunden, da die Aufnahme einer exakten Schleifenkurve mehrere Monate erfordert. In diesem Zusammenhang ist auch auf die systematischen Untersuchungen von R. O. H. Runkel und M. Lütthgens (35) sowie von K. E. Kelsey und G. N. Christensen (36) über die Sorption der chemischen Komponenten von Holz hinzuweisen.

Für praxisnahe, aber wissenschaftlich einwandfreie Sorptionsmessungen dient die in Bild 8 dargestellte Versuchsanordnung, die nach dem bekannten gravimetrischen Ausgleichsprinzip, jedoch zwecks Zeiteinsparung unter Evakuieren des Probenraums und Messung des Gleichgewichtsdampfdrucks nach einem manometrischen Verfahren arbeitet. Mit ihrer Hilfe wurden zum Beispiel die Sorptionsisothermen von mit Schutzsalzen getränkten Hölzern bestimmt (37) (Bild 9).

Die sorptionsbedingte Quellung und Schwindung von Holz, seit langem von Biologen, Chemikern, Physikern und Technologen gründlich untersucht, stellt immer noch ungelöste Fragen. Mit neuen Meßmethoden und auf theoretischem Wege versuchte man sie gerade in den zurückliegenden Jahren zu lösen. Wichtig, auch im Sinne physikalischer Ganzheitsschau, ist der Brückenschlag von der Elastizitätstheorie und technischen Mechanik zur Quellungsphänomenologie, den W. W. Barkas (38) vollzogen hat. Von ihm (39) stammt auch der Nachweis, daß die räumliche oder flächenmäßige Schwindung im Bereich der Kapillarkondensation proportional dem Logarithmus des Quellungsdrucks ist (Bild 10). Die äußerst geringen Streuungen zeigen, wie bei methodisch richtig angelegten und durchgeführten holzphysikalischen

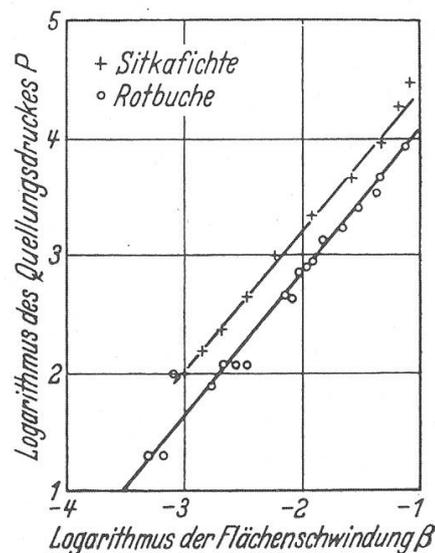


Abb. 10

Zusammenhang zwischen Quellungsdruck und Flächenschwindung oberhalb 20% Feuchtigkeitsgehalt (nach W. W. Barkas)

schen Untersuchungen auch auf schwierigen Gebieten exakte Ergebnisse zu erzielen sind. Feinmessungen erbrachten damit den Beweis, daß sich Holz im Bereich höherer Feuchtigkeit unter äußeren Lasten und inneren Schwindkräften gleich verhält. Untersuchungen über den Einfluß mechanischer Vorspannungen auf das nachfolgende Quellen unter verschiedenen Bedingungen hatte T. Perkitny schon 1937/38 (40) begonnen. Etwa gleichzeitig widmeten R. A. Knight und R. J. Newall (41) diesem Problem Aufmerksamkeit, das von T. Perkitny später (42) weiter planmäßig bearbeitet wurde. Im Zusammenhang damit stehen auch Untersuchungen des gleichen Forschers (43) über den Quellungsdruck. In England hat W. C. Stevens (44) die Schwindung von Buchenholz bei hohen und niedrigen Temperaturen gemessen.

Mit viel Eifer haben Physiker und Technologen über ein halbes Jahrhundert die Ursachen der Anisotropie der Schwindung zu erklären versucht. Zu nennen sind die Arbeiten von A. Koehler (45), E. Mörath (46), F. Kollmann (47), A. Frey-Wyssling (48), R. Keylwerth (49) und neuerdings von H. H. Bosshard.

Völlige Übereinstimmung konnte über die Ursachen der Verschiedenheit von radialer und tangentialer Schwindung bzw. Quellung noch nicht erzielt werden. Dies ist insofern überraschend, als die Quellungserscheinungen als solche sehr genau bekannt und einfach meßbar sind und auch anatomisch Bau und Feinbau der Holzzellwand kaum noch irgendwelche Rätsel bieten. Fortschritte in der Erkenntnis lassen sich vielleicht durch mehr selektive Forschungsmethoden erzielen, das heißt dadurch, daß eine biologische Vorsortierung der zu prüfenden Hölzer vor den physikalischen Messungen vorgenommen wird, die ihrerseits verfeinert und selbstregistrierend gestaltet werden müssen.

Die Physik und die auf ihr beruhende elektrische Meßtechnik muß in der modernen Holzforschung überhaupt noch weit stärker als schon bisher herangezogen werden, um nicht nur die Meßergebnisse genauer zu machen und zu vervielfältigen, sondern auch, durch deren Selbstaufzeichnung, die Zeiteinflüsse klarer herauszustellen, etwaige Unstetigkeiten exakt zu erfassen und um verschiedene Erscheinungen gleichzeitig beobachtbar zu machen.

Diese Forderungen gelten beispielsweise besonders für die Physik der künstlichen Holz Trocknung. Versuchstrockner, bei denen das Trocknungsmittel in einer geschlossenen Rohrschleife geführt und in seinen physikalischen Zuständen (Temperatur, psychrometrische Differenz, Strömungsgeschwindigkeit) in weiten Bereichen möglichst genau geregelt werden kann, haben sich bewährt (51, 52) (Bild 11). Selbstverständlich bieten sich dabei im Einzelfall verschiedene physikalische Lösungsmöglichkeiten an. Die automatische Aufzeichnung des Gewichtsverlustes der trocknenden Probe läßt sich beispielsweise nach L. Malmquist barometrisch (Bild 12) oder mit einer Kettenwaage (Bild 13) durchführen. Wie Bild 14 zeigt, sind die Ergebnisse recht befriedigend.

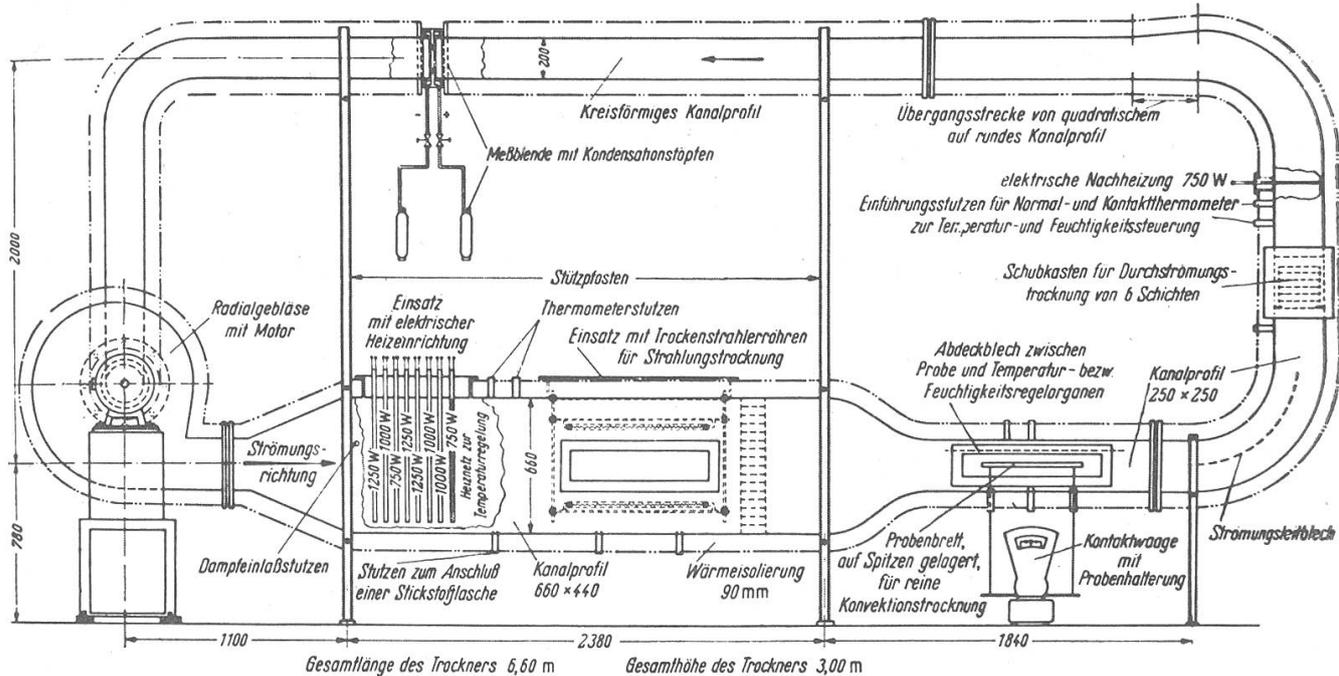


Abb. 11

Schematische Darstellung des Laboratoriumstrockners des Münchener Instituts für Holzforschung und Holztechnik

Ein Problem bei allen Trocknungsversuchen ist die Frage ihrer Reproduzierbarkeit und Wiederholbarkeit. Selbst bei sehr sorgfältig nach Struktur, Rohdichte und Konditionierung ausgewählten Proben sind die eigenschaftsbedingten Streuungen der Trocknungsergebnisse (zum Beispiel der Trocknungsgeschwindigkeit) oft so erheblich, daß der Einfluß der äußeren Faktoren, zum Beispiel der Belüftungsgeschwindigkeit, dadurch überdeckt und unter Umständen sogar ins Unwahrscheinliche, ja Unmögliche verkehrt wird. Der Gedanke, die gleichen Proben zu wiederholten Trocknungsversuchen mit geänderten äußeren Faktoren zu verwenden, liegt deshalb nahe, aber hier tritt sofort die Frage nach dem Einfluß der thermischen Vorbeanspruchung auf die Wasserdampfdurchlässigkeit von Holz auf. Bild 15 zeigt nach A. Schneider (53), daß bereits einmalige Trocknung bei nur 65 °C kolloidchemische Veränderungen in den Hölzern hervorruft, die sich nach Wiederbefeuchtung und erneuter Trocknung im Sinne einer Trocknungsverzögerung auswirken. Entsprechende Versuche sind in München im Gange, um die Veränderungen der Diffusionszahlen von Wasserdampf in Hölzern nach einzelnen Trocknungen zu bestimmen. Als schwierig erwies sich dabei zunächst die Abdichtung der Mantelflächen der Diffusionsproben auf dem Glasaufsatz der Meßeinrichtung nach Bild 16. In Zusammenarbeit mit der chemischen Industrie lassen sich aber heute solche Schwierigkeiten meist überwinden. Im vorliegenden Fall erwies sich eine neuartige kaltvulkanisierende Silikon-Kautschuk-Streichmasse als hinreichend elastisch und thermisch beständig.



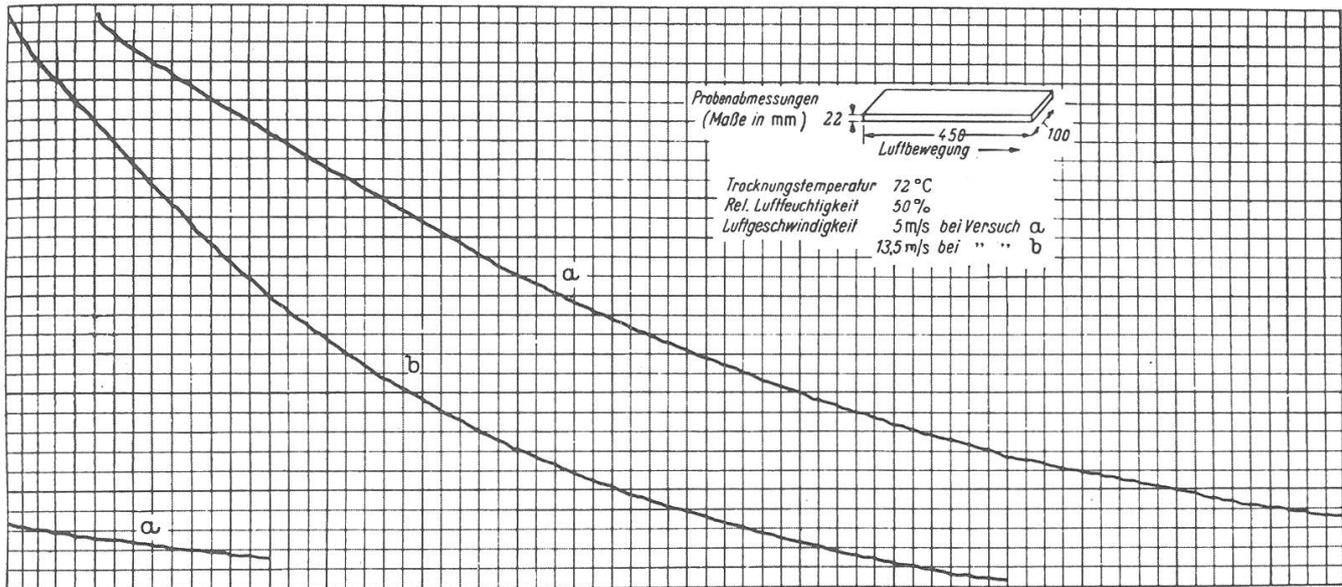


Abb. 14  
 Beispiel von Trocknungskurven, aufgeschrieben durch die automatische Waage  
 gemäß Bild 13

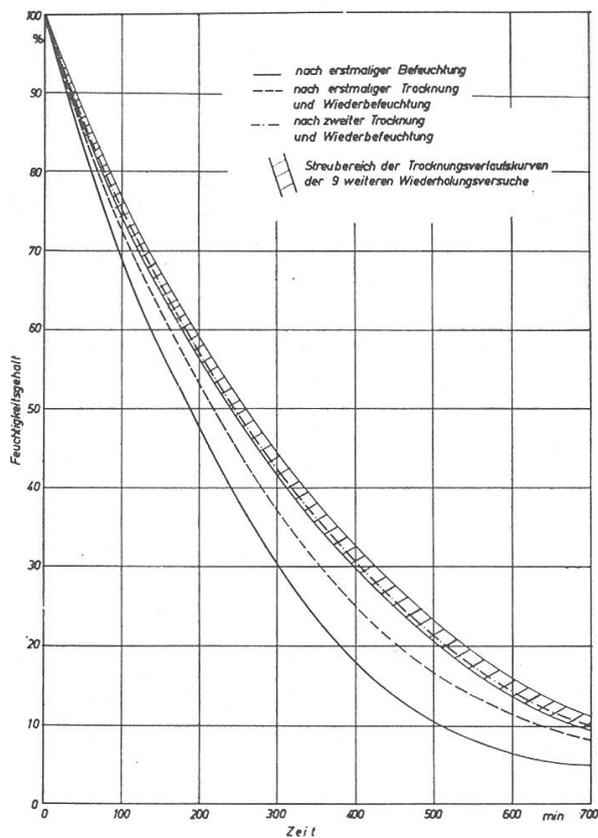


Abb. 15  
 Trocknungsverlauf von Fichtenholzklötzchen nach wiederholter Trocknung

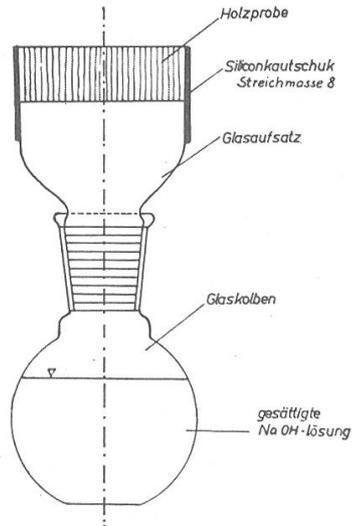


Abb. 16  
Meßeinrichtung zur Bestimmung der Diffusionszahl

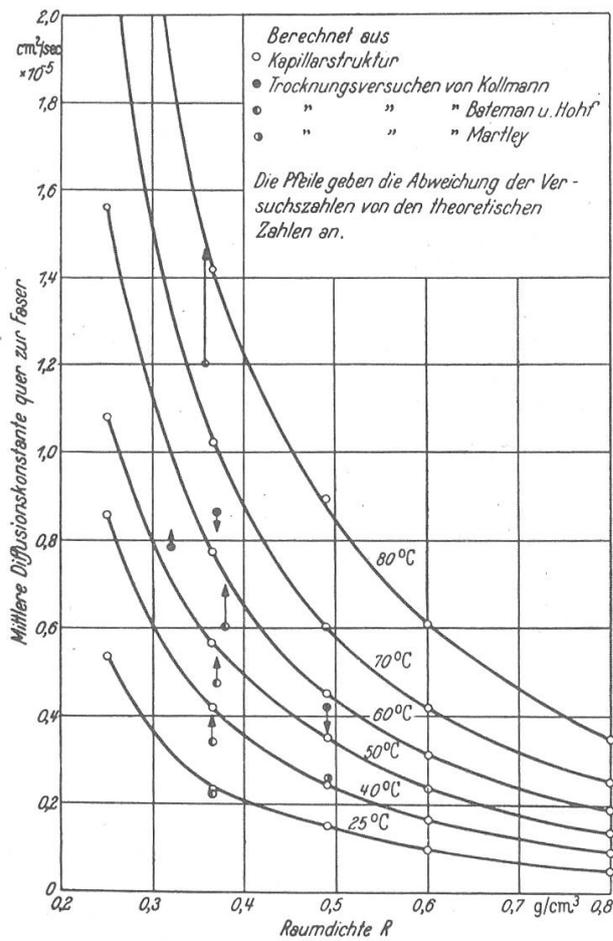


Abb. 17

Mittlere Diffusionskonstante quer zur Faser für Holz in Abhängigkeit von der Raumdichte und der Temperatur bei einer relativen Luftfeuchtigkeit, der 10% Ausgleichsfeuchtigkeit des Holzes entsprechen (nach A. J. S t a m m)

Selbstverständlich sind Eigenschaften und Feuchtigkeit des Holzes nicht nur bei Trocknungs-, sondern auch bei Tränkungsvorgängen für das Diffusionsverhalten bestimmend. Bemerkenswerte Versuche hierzu mit Natriumfluorid als Tränkmittel liegen von A. Buro und G. Becker (54) vor.

Wie überraschend erfolgreich deduktive Methoden in der theoretischen Holzphysik sein können, zeigt ein Versuch von A. J. Stamm (55), die Diffusionskonstanten von Wasserdampf in Holz aus den Abmessungen seiner Kapillarstruktur zu berechnen, wobei er von der Grundtatsache einer Analogie zwischen dem Diffusionsphänomen als spontanem Konzentrationsausgleich und der Leitung eines elektrischen Stroms in einem verzweigten Netz ausging und zu Formeln für die Diffusionskonstanten gelangte, die analog den elektrischen Grundgleichungen nach dem Kirchhoffschen Gesetz für ein System parallel und in Serie geschalteter Widerstände berechnet wurden. Ohne hier näher auf diese interessante Arbeit eingehen zu können, sei doch durch Bild 17 gezeigt, wie sich experimentell bestimmte Einzelmeßwerte verschiedener Forscher aus früherer Zeit in die Schar der theoretisch entworfenen Kurven für die mittleren Diffusionskonstanten quer zur Faser als Dichtefunktion einfügen.

Analogiemethoden haben die theoretische Holzphysik auch auf anderen Gebieten erheblich gefördert, zum Beispiel bei der Berechnung der linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Vollholz in Abhängigkeit von der Faserrichtung (in Analogie zu den mechanischen Spannungen) (56) sowie von Schichthölzern und Preßschichthölzern in Abhängigkeit vom Leim- und Harzgehalt. Vielfach gilt es auch in der modernen Holzphysik, sich aus den rein empirischen Verfahren zu lösen, die auf Grund von Beobachtungen, Messungen und Experimenten empirische Gesetze formulieren. Als gutes Beispiel läßt sich hier die Wärmeleitung heranziehen. Da Holz höchst wertvolle wärmetechnische Eigenschaften besitzt, hat man sich schon frühzeitig mit der Abhängigkeit seiner Wärmeleitfähigkeit von der Rohdichte, der Orientierung zur Faserrichtung, der Feuchtigkeit und Temperatur befaßt. Die von verschiedenen Forschern bestimmten Meßwerte für die besonders wichtige Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Faser lassen sich beispielsweise (57) im praktisch interessierenden Bereich genügend genau durch eine statistisch gefundene lineare empirische Funktion ausgleichen. Zu ähnlichen Ergebnissen waren D. Narayana murti und V. Ranganathan (58) gelangt. Studien über die Wärmeleitung von T. Maku (59) drangen zwar schon tiefer in das Problem ein, blieben aber doch noch in den letzten Schlußfolgerungen der Empirie verhaftet. Durch die Einführung eines «Brückenfaktors» von F. Kollmann und L. Malmquist (60), der den Einfluß der unterschiedlichen Anordnung der Holzfasern oder -späne und der dazwischenliegenden Luftschichten in Holz und Holzwerkstoffen berücksichtigt, gelangte man aber zu einer physikalisch exakten Gleichung für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit, die auch der Forderung genügt, daß sich sämtliche Kurven für ein idealisiertes porenloses

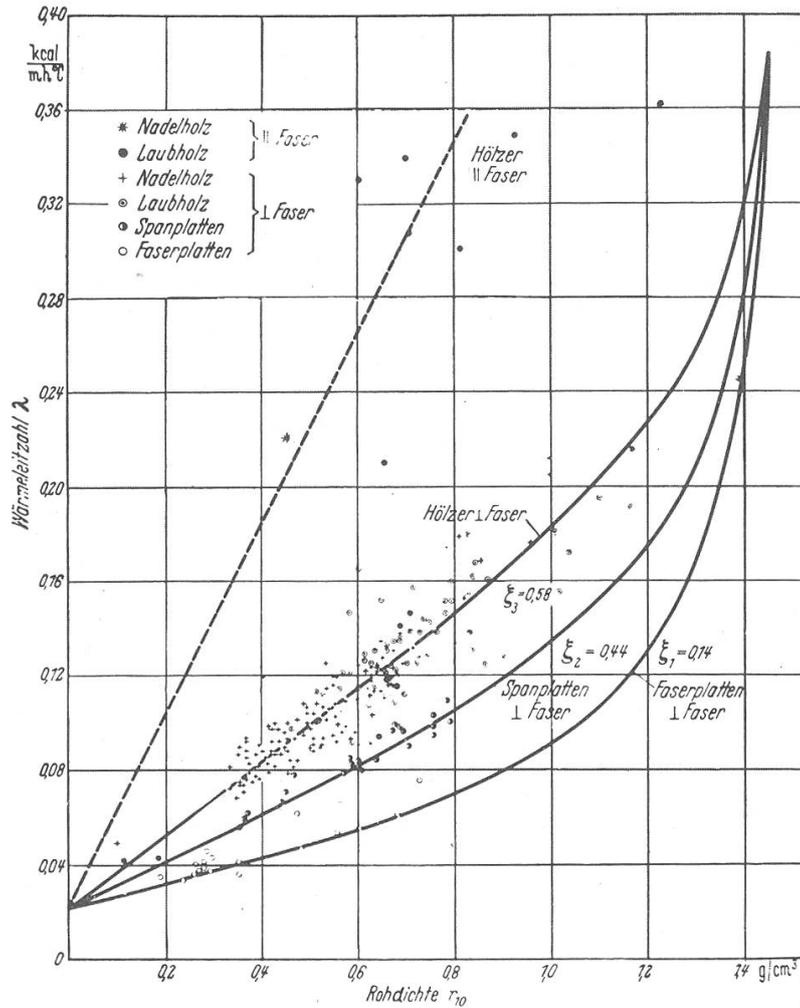


Abb. 18

Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Hölzern, Holzspanplatten und Holzfasern von der Rohdichte (nach F. K o l l m a n n und L. M a l m q u i s t)

Holz oder einen ebenso idealisierten porenlosen Holzwerkstoff mit der einheitlichen Dichte von  $1,5 \text{ g/cm}^3$  in einem Punkt schneiden müssen (Bild 18).

Um die Ausführungen über die Methoden der physikalischen Holzforschung abzuschließen, muß noch kurz auf die indirekten sowie auf die Modellmessungen eingegangen werden. Für erstere bieten Untersuchungen über das Strahlungsverhalten trocknender Hölzer ein Beispiel. Bekannt sind die grundlegenden Messungen der Wärmestrahlung technischer Oberflächen bei gewöhnlicher Temperatur von E. S c h m i d t (61), in die auch Hölzer einbezogen wurden. Da aber die Angaben, im ganzen gesehen, spärlich waren und sich auch nicht auf verschiedene feuchte Hölzer erstreckten und da die Bedeutung der Wärmestrahlung für die künstliche Holz Trocknung seit Einführung der Heißdampftrocknung gestiegen ist, wurde ein neues Verfahren entwickelt (62). Mit Hilfe einer Strahlungskammer, in der verschiedene kon-

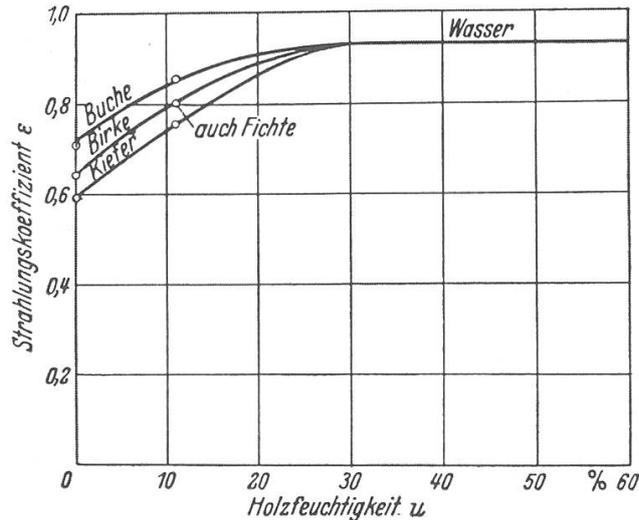


Abb. 19

Abhängigkeit der Strahlungskoeffizienten für Buche, Birke und Kiefer von der Holzfeuchtigkeit (nach F. Kollmann und L. Malmquist)

stante Temperaturen (zwischen 39°C und 100°C) durch Flüssigkeiten mit verschiedenen Siedepunkten erzeugt wurden, wurden sieben Temperaturen, und zwar drei in der Holzprobe, vier in Teilen der Strahlungskammer selbst, möglichst genau gemessen. Die Absorptionskoeffizienten für die Wärmestrahlung wurden für das trockene Holz aus der Wärmebilanz, die für das feuchte ( $u = 10$  Prozent) aus der Trocknungsgeschwindigkeit am Anfang indirekt berechnet. Ferner wurde angenommen, daß die Kurve der Strahlungskoeffizienten als Funktion der Holzfeuchtigkeit etwa am Fasersättigungspunkt in die Absorptionszahl für Wasser einmündet. Die Ergebnisse zeigt Bild 19.

Modellversuche schließlich bieten sich an, um einen besseren Einblick in das mechanische Verhalten des inhomogenen Festkörpers Holz zu erlangen. Man kann zu diesem Zweck Schichtkörper aus Gießharzen verschiedener Härtecharakteristik und mit verschiedenen Elastizitätsmoduln erzeugen und die Spannungsverteilung im Innern bei bestimmten Beanspruchungsfällen spannungsoptisch studieren (63). Das Isochromen-Bild eines solchen Modellschichtbalkens bei mittiger Biegelast zeigt Bild 20, die daraus abgeleitete

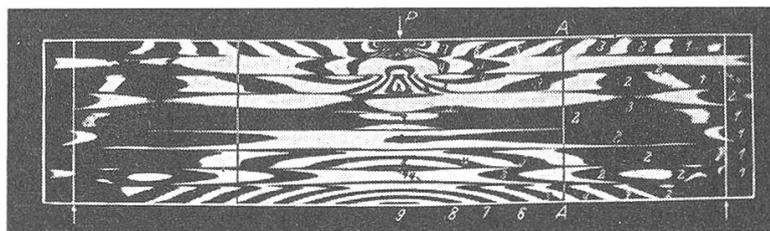


Abb. 20

Isochromenbild eines Modellschichtbalkens (nach F. Kollmann und R. Hiltcher)

Verteilung der Längsspannungen Bild 21. Die sägezahn-treppenförmige Kurve ist ähnlich der früher von A. Ylinen (64) theoretisch für Holz entworfenen Kurve.

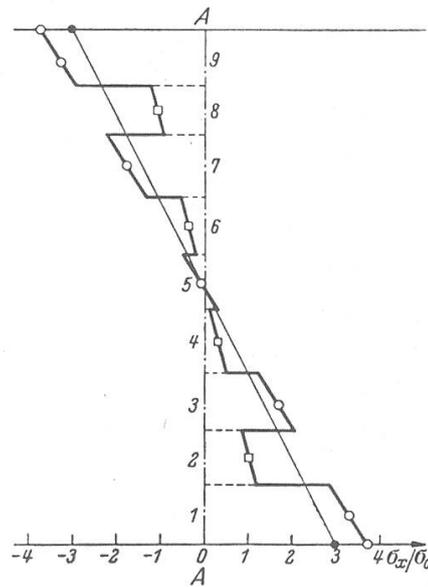


Abb. 21

Verteilung der Längsspannung  $\sigma_x$  über dem Meßquerschnitt A—A des Schichtbalkens gemäß Bild 20

Zusammenfassend ist zu sagen, daß die Holzphysik in den letzten zwanzig und insbesondere zehn Jahren in ihren Methoden außerordentlich bereichert wurde und man nicht nur viele vertiefte Zusammenhänge gewann, sondern auch weitgehend die Fesseln der klassischen Empirie abgeworfen werden konnten. Das Zusammenwirken experimenteller und theoretischer Untersuchungen hat sich als besonders fruchtbar erwiesen. Bei richtiger Problemstellung und -aufklärung konnten auf vielen Gebieten nicht nur fast streuungsfreie, sondern auch sich in die Gesamtphysik ausgezeichnet einfügende Beziehungen gefunden werden. Freilich darf man bei dem biologisch gewachsenen Holz nicht immer und überall erwarten, daß die Streuungen eng sind. Wo aber größere Streuungen unvermeidlich sind, muß vor Aussagen ihre Zuverlässigkeit oder Sicherheit mathematisch-statistisch überprüft werden. Als sehr zweckmäßig erwiesen sich, wie an einigen Beispielen nachgewiesen werden konnte, Analogiemethoden. Modellmethoden dürften manche Vorgänge im anisotropen und inhomogenen Holz noch näher beleuchten können, obwohl sie nur qualitative Aufschlüsse vermitteln und Kritik am Platze ist. Gänzlich neue Aufgaben, um damit zu schließen, liegen noch vor der Holzphysik, zum Beispiel das Verhalten von Holz und Holzwerkstoffen nach energiereicher Bestrahlung, zum Beispiel mit  $\gamma$ -Strahlen. Britische Versuche (65) haben beispielsweise gezeigt, daß das Sorptionsvermögen von Holz dadurch nicht unwesentlich verringert wird. Einen besonderen Schwerpunkt

der physikalischen Holzforschung in Gegenwart und näherer Zukunft bildet auch das Brandgeschehen bei Holz und Holzwerkstoffen, die Vorgänge bei Exotherme, Zündung, Flammenbildung (F. Kollmann 1960). Hier freilich wird es sich um ein Gemeinschaftswerk der physikalischen und der chemischen Holzforschung handeln. Die erfolgreiche Holzforschung setzt fast stets das Zusammenwirken von Biologen, Chemikern, Physikern, Physikochemikern, Technologen und Mathematikern voraus. Die Methoden der physikalischen Holzforschung sollten also nie isoliert betrachtet werden, sondern im Zusammenhang mit jenen der biologischen, chemischen und technologischen Holzforschung.

## Résumé

### Les méthodes de recherche de la physique du bois

Les méthodes de recherche de la physique du bois sont d'ordre expérimental et théorique et de ce fait soit inductives ou déductives. La recherche systématique dans l'étude du bois est d'origine relativement récente, elle commença en 1910 par suite de la fondation du Laboratoire des produits forestiers de Madison. La structure cristalline de la matière ligneuse est d'importance primordiale pour la physique du bois. Elle est responsable de l'anisotropie du bois, à laquelle s'ajoutent les hétérogénéités dues aux variations périodiques à l'intérieur de la couche annuelle et les anomalies de la structure anatomique. Des séries de mesures et leur analyse par la statistique mathématique sont indispensables. De toutes les propriétés physiques, la densité du bois fut étudiée en premier lieu. Sachs trouva en 1879 déjà que la densité réelle de la matière ligneuse atteignait environ 1,50, indépendamment de l'espèce et du lieu de croissance. Des corrélations, d'une grande importance technique, peuvent être établies entre la densité du bois et le taux d'humidité et entre la densité et la proportion de bois d'été. Les relations entre le bois et l'humidité constituent un des domaines principaux de l'étude physique du bois. L'absorption se décompose en absorption constitutionnelle, en absorption physique et en condensation capillaire, ces phénomènes étant étroitement liés. Une théorie de l'absorption sur une base thermodynamique a été élaborée récemment (L. Maïmquist, 1958). Des appareils de grande précision sont nécessaires pour effectuer les mesures d'absorption (écart toléré de température  $\pm 0,001$  °C), afin d'éliminer la condensation au voisinage du point de saturation de la fibre. Citons comme études pratiques sur l'absorption, les essais effectués avec des bois imprégnés de sels antiseptiques. Il est intéressant de constater que le bois à humidité élevée se comporte sous des charges extérieures de la même façon que s'il était soumis à des forces de retrait. Des divergences d'opinion subsistent encore sur les causes de l'anisotropie de retrait, malgré de nombreux travaux. Des améliorations dans les mesures physiques, en faisant appel aux techniques de mesure électrique, permettront d'étendre les connaissances. Ceci est également valable pour l'étude théorique du séchage artificiel. Il est indispensable de vouer une attention particulière aux problèmes de la fidélité lors de la répétition des opérations dans les essais de séchage. L'étude de A. J. Stamm (1946) sur le calcul des constantes de diffusion de la vapeur d'eau dans le bois à

partir des dimensions de la structure capillaire montre comme les méthodes déductives peuvent conduire à de remarquables résultats dans la physique du bois qui délaisse toujours plus les procédés empiriques. Les valeurs de conductibilité thermique des bois et des matériaux à base de bois, en fonction de la densité, ont pu être établies de manière suffisamment précises au moyen d'un facteur auxiliaire (1956). Parmi les nouvelles méthodes, citons également les mesures indirectes (par exemple, le calcul des coefficients d'absorption par le rayonnement de la chaleur du bois sec en partant d'un bilan thermique) et des essais sur modèles (par exemple, des mesures optiques des tensions sur des poutres lamellées).

Au cours de ces deux dernières décennies, la physique du bois s'est dégagée de l'empirisme classique. Les méthodes de la recherche physique du bois ne doivent pas être considérées isolément, mais seulement en relation avec les méthodes biologiques, chimiques et technologiques de la recherche sur le bois.

#### Literaturverzeichnis

- 1 *Volbehr B.*: Untersuchungen über die Quellung der Holzfaser, Diss., Kiel 1896.
- 2 *Chevandier E.* und *Wertheim G.*: Mémoire sur les propriétés mécaniques du bois, Paris 1848.
- 3 *Savart F.*: Ann. Chim. Physique, Bd. 40 (1829), S. 5, 113.
- 4 *v. Helmholtz H.*: Vorlesungen über theoretische Physik II, S. 103, Leipzig 1902.
- 5 *Carrington H.*: Philos. Mag. 1921, I, VI, 41, S. 206, 848; 1922, I, VI, 43, S. 871, 1922, II, VI, 44, S. 288 (Berichtigung); 1923, I, VI, 45, S. 1055.
- 6 *Hörig H.*: Zur Elastizität des Fichtenholzes, Z. techn. Physik, Bd. 12 (1931), S. 369/379.  
 — Über die rechnerische Auswertung von Verdrehungsmessungen an Holzstäben. Ing.-Arch., Bd. 4 (1933), S. 570/76.  
 — Anwendung der Elastizitätstheorie anisotroper Körper auf Messungen an Holz. Ing.-Arch., Bd. 6 (1935), S. 8/14.  
 — Berechnung der Gleitzahlen  $s_{44}$ ,  $s_{55}$ ,  $s_{66}$  aus den Verdrehungsmessungen von Stäben mit rechteckigen Querschnitten bei rhombischer Symmetrie. Ing.-Arch., Bd. 7 (1936), S. 165/170.  
 — Über Mittelwertkörper elastisch anisotroper Systeme und deren Anwendung auf Holz. Ing.-Arch., Bd. 8 (1937), S. 174/82.  
 — Über die unmittelbare Messung der Gleitzahlen  $s_{44}$ ,  $s_{55}$ ,  $s_{66}$ , bei Stoffen von rhombischer Symmetrie und geringer Starrheit. Ann. Phys. Bd. 43 (1943), S. 285/95.
- 7 *Voigt W.*: Kristallphysik, Leipzig, 1928.
- 8 *Sachs J.*: Über die Porosität des Holzes. Arb. Bot. Inst. Würzburg, Bd. 2 (1879), S. 291 ff.
- 9 *Stamm A. J.* und *Hansen L. A.*: J. Physic. Chem., Bd. 41 (1937), S. 1007.
- 10 *Lions W. J.*: Journ. Chem. Physics, Bd. 9 (1941), S. 277.
- 11 *Hadek A.* und *Janka D.*: Untersuchung über die Elastizität und Festigkeit der österreich. Bauhölzer, I. Fichte Südtirols. Mitt, forstl. Vers. Wes. Öst. H. 25, S. 53, Wien 1900.
- 12 *Lassila J.*: Untersuchungen über den Einfluß des Waldtyps auf die Qualität der Kiefer. Acta Forestal. Fenn. Bd. 37 (1931), S. 52.
- 13 *Kollmann F.*: Cbl. Ges. Forstwesen, Bd. 58 (1932), S. 276.
- 14 — Z. VDI, Bd. 78 (1934), S. 1399.
- 15 — Forstarchiv, Bd. 12 (1936), S. 1.
- 16 *Nördlinger H.*: Die technischen Eigenschaften der Hölzer. Stuttgart, 1860.

- 17 *Hartig R.*: Das Holz der deutschen Nadelwaldbäume. Berlin 1885, S. 69 ff.
- 18 *Ylinen A.*: Acta Forestalia Fennica, Bd. 50 (1942).
- 19 *Kollmann F.*: Die Esche und ihr Holz. S. 70, Berlin 1941.
- 20 *Hawley L. F.*: Wood-Liquid Relations, US Dept. Agric., Bull. Nr. 248, S. 8, Washington D. C., 1931.
- 21 *Keylwerth R.* und *Noack D.*: Holz als Roh- und Werkstoff. Bd. 14 (1956), S. 162.
- 22 *Eucken A.*: Ber. dtsh. physik. Ges. 1914, Nr. 7, S. 345.  
— Elektro-chem. angew. physik. Chem. Bd. 28 (1922), S. 6.
- 23 *Langmuir I.*: J. Amer. Chem. Soc. Bd. 40 (1918), S. 1361.
- 24 *Freundlich H.*: Kapillarchemie, 3. Aufl., Leipzig 1923.  
— Colloids and Capillary Chemistry, London 1926.
- 25 *Hückel E.*: Adsorption und Kapillarkondensation, Kolloidforschung in Einzeldarstellung, Bd. 7, S. 77.
- 26 *Brunauer S.*, *Emmet P. H.* und *Teller E.*: J. Amer. Chem. Soc., Bd. 60 (1938), S. 316.
- 27 *Malmquist L.*: Holz als Roh- und Werkstoff. Bd. 17 (1959), S. 171.
- 28 *Mörath E.*: Kolloid-Chem. Beih., Bd. 33 (1931), S. 131.
- 29 *Stamm A. J.* und *Loughborough W. K.*: J. Phys. Chem., Bd. 39 (1935), S. 121.
- 30 *Kollmann F.* und *Schneider A.*: Holz als Roh- und Werkstoff. Bd. 16 (1958), S. 117.
- 31 *Pidgeon L. M.* und *Maaß O.*: J. Amer. Chem. Soc., Bd. 52 (1930), S. 1052.
- 32 *Milligan W. O.*, *Simpson W. C.*, *Bushey G. L.*, *Rechford H. H. jr.* und *Draper A. L.*: Anal. Chem., Bd. 23 (1951), S. 739.
- 33 *Lykow A. W.*: Transporterscheinungen in kapillarporösen Körpern. Berlin 1958.
- 34 *Villiere A.*: L'Equilibre Hygroscopique des Bois et Matières Cellulosiques, Centre Technique du Bois, Paris 1960.
- 35 *Runkel O. H.* und *Lüthgens M.*: Holz als Roh- und Werkstoff. Bd. 14 (1956), S. 424.
- 36 *Christensen G. N.* und *Kelsey K. E.*: Holz als Roh- und Werkstoff. Bd. 17 (1959), S. 178.
- 37 *Kollmann F.*: Die Eigenschaftsveränderungen von Grubenholz nach Schutzsalzimprägnierung. Forschungsber. d. Landes Nordrhein-Westf. Nr. 698, Westdt. Verlag Köln und Opladen, 1959.  
— und *Schneider A.*: Holz als Roh- und Werkstoff. Bd. 17 (1959), S. 1212.
- 38 *Barkas W. W.*: Swelling Stresses in Gels, Dept. Sci. Ind. Res., For. Prod. Res. Spec. Rep. Nr. 6, S. 41, London 1945.
- 39 *Barkas W. W.*: Recent Work on the Moisture in Wood in Relation to Strength and Shrinkage, For. Prod. Res. Spec. Rep. Nr. 4, London, 1938.  
— und *Golder H. A.*: Nature (London), Bd. 141 (1938), Nr. 3576, S. 874.
- 40 *Perkitny T.*: Holz als Roh- und Werkstoff. Bd. 1 (1938), S. 449.
- 41 *Knight R. A. G.* und *Newall R. J.*: Forestry (Great Britain), Bd. 12 (1938), S. 125; Ref. Holz als Roh- und Werkstoff. Bd. 3 (1940), S. 59.
- 42 *Perkitny T.*, *Stefaniak J.* und *Chudzinski Z.*: Prace Inst. Technologii Drewna, Jg. 3 (1957), H. 4 (9), S. 34/51. (Deutsches Referat in «Holz als Roh- und Werkstoff», Bd. 16 (1958), H. 4, S. 154).

- 43 *Perkitny T.*: Untersuchungen über den Quellungsdruck. Holz als Roh- und Werkstoff, Bd. 16 (1958), H. 6, S. 241.
- 44 *Stevens W. C.*: Timber Technology, Bd. 61 (1953), S. 27.
- 45 *Koehler A.*: Longitudinal Shrinkage of Wood. Trans. Amer. Soc. Mech. Engr. Bd. 53 (1931), Nr. 2, S. 17.
- 46 *Mörath E.*: Studien über die hygroskopischen Eigenschaften und die Härte der Hölzer, Darmstadt 1932.
- 47 *Kollmann F.*: Technologie des Holzes, 1. Aufl., Berlin 1936.
- 48 *Frey-Wyssling A.*: Holz als Roh- und Werkstoff, Bd. 3 (1940), S. 43 und 349; Bd. 6 (1943), S. 197.
- 49 *Keylwerth R.*: Das Schwinden und seine Beziehungen zu Rohwichte und Aufbau des Holzes, Diss. T. H. Berlin 1943.  
— Beitrag zur Mechanik der Holzschwindung, Reinbek 1948.
- 50 *Bosshard H. H.*: Holz als Roh- und Werkstoff, Bd. 14 (1956), S. 285.
- 51 *Kollmann F. und Malmquist L.*: Untersuchungen über die Trocknung von Kiefern-schnittholz mit erhöhten Temperaturen, Sv. Trärforskn. Inst., Trätekn. Avdelningen, Medd. 23, Stockholm, 1952.  
*Kollmann F.*: Holz als Roh- und Werkstoff, Bd. 12 (1954), S. 213.
- 52 *Kollmann F. und Schneider A.*: Holz als Roh- und Werkstoff, Bd. 15 (1957), S. 489.
- 53 Unveröffentlichte Untersuchungsergebnisse.
- 54 *Buro A. und Becker G.*: Holz als Roh- und Werkstoff, Bd. 14 (1956), S. 95.
- 55 *Stamm A. J.*: Passage of Liquids, Vapors and Dissolved Materials through Softwoods. US Dept. Agric., Techn. Bull. Nr. 929, Washington, D. C., October 1946.
- 56 *Weatherwax R. C. und Stamm J.*: The Coefficients of Thermal Expansion of Wood and Wood Products, US For. Prod. Labor. Rep. Nr. 1487, Madison, Wisc., Juni 1946.
- 57 *Kollmann F.*: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1951, 2. Aufl. Bd. I, S. 508.
- 58 *Narayanamurti D. und Ranganathan V.*: Proc. Ind. Acad. Sci., Bd. 13 (1941), Nr. 4, Sec. A.
- 59 *Maku T.*: Studies on the heat conduction in wood. Wood Res. Bull., Nr. 13, Wood Research Institute, Kyoto University, Japan, November 1954.
- 60 *Kollmann F. und Malmquist L.*: Holz als Roh- und Werkstoff, Bd. 14 (1956), S. 201.
- 61 *Schmidt E.*: Wärmestrahlung technischer Oberflächen bei gewöhnlicher Temperatur, Gesundh.-Ing., Beih. 20, München 1927.
- 62 *Kollmann F. und Malmquist L.*: Holz als Roh- und Werkstoff, Bd. 13 (1955), S. 249.
- 63 *Kollmann F. und Hiltcher R.*: Holz als Roh- und Werkstoff, Bd. 13 (1955), S. 209.
- 64 *Ylinen A.*: Über die Bestimmung der Spannungen und Formänderungen von Holzbalken mit rechteckigem Querschnitt, Helsinki, 1943.
- 65 Dept. of Scient. and Ind. Res., For. Products Research 1957, London 1958, S. 46.