

werden. Mittels der gleichen Reaktion lassen sich leicht kautschukhaltige Hölzer durch starke Braun- bis Blaufärbung und vor allem durch eine auffällige schwarze Fällung nachweisen.

Summary

The microscopic identification of woods is often difficult or even impossible. It is proposed to accomplish the identification by means of additional chemical and physico-chemical tests. So the number of informations may extend and an automatisisation of wood identification may be possible. The results with two tests, according to Sawicki, Noe and Stanley and the reaction of Storch-Morawski, with 116 different woods are reported. Well decernable colours appear. With the Storch-Morawski-Reaction fresh softwoods give a deep violet colour, but older samples not a colour at all. This differential behaviour may be a base for the determination of the age of sawn ware. With the same reaction caoutchouc containing woods can be identified in a very simple way by a dark brown-blue colour and a black precipitation.

Schrifttum

- Cohen, W. E.: The Identification of Wood by Chemical Means. Coun. Sci. Indust. Res. Austr. Pamphlet Nr. 53 (1935).
 Dadswell, H. E.: The Identification of Wood by Chemical Means. Coun. Sci. Indust. Res. Austr. Pamphlet No. 20 (1931).
 — u. M. Burnell: Methods for the Identification of the Coloured Woods of the Genus Eucalyptus. Coun. Sci. Indust. Res. Austr. Bulletin No. 67 (1932).
 Kanehira, R.: Identification of Formosan Woods. Bull. Formosa Bur. Prod. Ind. Nach: Jane, F. W.: The Structure of Wood. London 1955: Adam & Charles Black, S. 400.
 Sandermann, W., H. H. Dietrichs, M. H. Simatupang und M. Puth: Untersuchungen über kautschukhaltige Hölzer. Holzforschung Bd. 17 (1963) S. 161/168.
 Sawicki, E., J. Noe und T. W. Stanley: A new Test for the Detection of Aralkyl and Dialkyl Ketones Containing the —CO—CII₂—Group. Mikrochim. Acta Jg. 1960, H. 2, S. 286.
 Stearns, T. L.: Distinguishing Red Oak from White Oak by Chemical Colour Reaction. South. Lumberman Bd. 184 (1952) S. 50.
 Storch: Ber. österr. Ges. Förderung chem. Industrie Bd. 9 (1887) S. 93.

Über Unterschiede in der Zugfestigkeit von Früh- und Spätholztracheiden

On Differences in the Tensile Strength of Earlywood and Latewood Tracheids

Von Arno P. Schniewind

University of California, Forest Products Laboratory, Richmond, California

Einleitung — Untersuchungsverfahren — Modellbetrachtungen — Analyse der Ergebnisse — Zusammenfassung — Schrifttum

Einleitung

Die Festigkeitseigenschaften von Früh- und Spätholz der Nadelhölzer weisen im allgemeinen erhebliche Unterschiede auf [Ylinen, 1942; Kloot 1952; Ifju, Kennedy 1962] die sich zumindest teilweise auf ebenso erhebliche Unterschiede in der Rohdichte zurückführen lassen. Zugversuche sowohl an Mikrotomschnitten [Ifju, Kennedy 1962] als auch an Einzelfasern [Jayne 1960; Leopold, McIntosh 1961] ergaben aber für Spätholz wesentlich höhere Festigkeitswerte als für Frühholz, wenn die Festigkeit auf den Zellwandquerschnitt bezogen wurde anstatt auf den Gesamtquerschnitt.

Nachdem sich eine höhere Zellwandfestigkeit des Spätholzes an Holzschnitten und an Holocellulosefasern feststellen läßt, kann das Lignin als wesentlicher Faktor ausgeschlossen werden. Weiterhin ergab sich, daß der Festigkeitsunterschied nach Entfernung der Hemicellulose mit Alkalien aus der Holocellulose erhalten bleibt, obwohl die Festigkeit von Früh- und Spätholzfaser dadurch verringert wird [Leopold, McIntosh 1961]. Die Hauptursache für unterschiedliche Festigkeitswerte von Früh- und Spätholzzellwänden dürfte daher in der Struktur des Cellulosegerüsts zu suchen sein.

Als Ursachen für die genannten Festigkeitsunterschiede hat man Unterschiede in der Kristallinität und der mittleren Kettenlänge der Cellulose, in der Zellwandpackungsdichte, in der Größe der Hofstüpfel, in dem Steigungswinkel der Fibrillen und im Anteil der verschiedenen Wandschichten, besonders der S₂-Schicht vorgeschlagen [Wilson, Wellwood 1965; McIntosh 1965].

Zweifellos können alle diese Faktoren zu den Festigkeitsunterschieden in Früh- und Spätholzzellwänden beitragen. Unterschiede in der Kristallinität können aber sehr klein

sein [Lee 1961]. J. W. Wilson und R. W. Wellwood [1965] geben einen Unterschied von nur 6% in der mittleren Kettenlänge von Douglasienfrüh- und -spätholz an. Hofstüpfel, möglicherweise mit Ausnahme der großen Fensterstüpfel in bestimmten Holzarten, sind für die Festigkeit des Holzes von geringer Bedeutung [Schniewind 1962; Mark 1965]. Die wichtigsten Faktoren dürften daher die Zellwandpackungsdichte, der Anteil der verschiedenen Wandschichten, und die Orientierung der Mikrofibrillen in den einzelnen Schichten sein.

Es war das Ziel der vorliegenden Arbeit, den Einfluß des Anteils der Wandschichten und des Steigungswinkels der Mikrofibrillen in der S₂-Schicht auf die Zugfestigkeit von einzelnen Früh- und Spätholztracheiden näher zu untersuchen.

Untersuchungsverfahren¹

Als Material wurde Douglasie gewählt, da diese Art besonders ausgeprägte Festigkeitsunterschiede zwischen Früh- und Spätholz aufzeigt [Jayne 1960]. Die Untersuchung wurde auf Material aus wenigen benachbarten Jahrringen eines einzelnen Stammes beschränkt. Es wurde fein gespalten und zu Holocellulose nach B. A. Jayne [1959] verarbeitet. Von den daraus gewonnenen Fasern wurden je 50 Früh- und Spätholzfaser nach einem von B. A. Jayne [1961] entwickelten Verfahren auf ihre Zugfestigkeit geprüft. Dieses Verfahren wurde von P. C. Kersavage [1962] näher beschrieben, und besteht im wesentlichen darin, daß man auf jedes Ende der Faser einen Tropfen Epoxydharz aufgibt, welches sich kugelförmig ausbildet und dann erhärtet. Die Last wird durch geschlitzte Uhrjuwelen aufgebracht, die durch ihre kugelförmigen Vertiefungen mit den Epoxydharzkugeln an der Faser eine Art Kugelgelenk bilden. Die Zugversuche wurden mit einer Instron Zugprüf-

¹ Bei dem experimentellen Teil dieser Arbeit haben sich die Herren A. Matar und B. Provin verdient gemacht, wofür auch an dieser Stelle gedankt sei.

maschine, Tischmodell, im Klimaraum bei 21 °C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit durchgeführt.

Eine Hälfte der geprüften Fasern wurde zur Bestimmung des Steigungswinkels benützt. In Anlehnung an das Verfahren von R. A. Cockrell [1946] wurde folgendes Verfahren entwickelt. Die Faserhälften wurden zunächst über Nacht in eine 7prozentige Lösung von Jod und Kaliumjodid gelagert. Die Fasern wurden dann kurz (1/2 bis 1 sec) in 2prozentiges Wasserstoffperoxyd getaucht und daraufhin mit 60prozentiger Schwefelsäure behandelt. Der Winkel zwischen den dadurch in der Zellwand geformten nadel-förmigen Jodkristallen und der Faserachse wurde danach mikroskopisch gemessen. Dieses Verfahren erwies sich für die Spätholztracheiden als ausreichend. Für die Frühholztracheiden konnte dagegen trotz zahlreicher Versuche und Änderungen in den Behandlungsbedingungen kein Erfolg erzielt werden. In den Frühholztracheiden wurde deshalb der Steigungswinkel durch Messung der Neigung der Hof-tüpfelschlitze bestimmt. Versuche mit Spätholzfasern ergaben, daß beide Verfahren zu dem gleichen Ergebnis führten.

Die andere Hälfte der geprüften Fasern diente der Bestimmung des Zellwandquerschnittes und des Anteils der Wandschichten. Die Fasern wurden in Celluloseacetat eingebettet. Plättchen aus Celluloseacetat wurden an der Oberfläche mit einer Kerbe versehen, die von der Mitte einer Kante ausging. Durch Aufbringen einiger Tropfen von Aceton wurde das Acetat um die Kerbe erweicht, und die Faserhälfte in die Kerbe eingezogen. Das Anbringen der Kerbe hat gegenüber dem Verfahren von B. Leopold und D. C. McIntosh [1961] den Vorteil, daß die Anfertigung von senkrechten Querschnitten und das spätere Auffinden des Zellquerschnitts im Mikrotomschnitt wesentlich erleichtert wird. Nach dem Erhärten des Acetats wurden Mikrotomschnitte von etwa 3 bis 5 µm angefertigt und ohne Lösung des Einbettungsmittels, mit Hilfe von Permount auf Objektträgern befestigt. Die Messungen wurden mit einem Leitz Polarisationsmikroskop durchgeführt. Unter gekreuzten Nikols mit eingelegtem Gipsplättchen (Rot 1. Ordnung) erschienen die einzelnen Wandschichten mit Ausnahme der Primärwand gut getrennt. Der gesamte Zellwandquerschnitt, und bei Spätholztracheiden die S₃, S₂ und die S₁-Schicht kombiniert mit der Primärwand, wurden mit Hilfe einer Camera clara auf Papier aufgezeichnet. Die Umrisse wurden ausgeschnitten und die einzelnen Flächenanteile und die Gesamtfläche des Zellwandquerschnittes durch Wiegen bestimmt. Für die Frühholztracheiden wurde die Dicke der einzelnen Wandschichten unmittelbar im Mikroskop gemessen, und der relative Flächenanteil daraus berechnet, was angesichts der geringen Gesamtwanddicke im Vergleich zum Zelldurchmesser zu besseren Ergebnissen führte als das gesonderte Aufzeichnen der verhältnismäßig dünnen Wandschichten.

Modellbetrachtungen

Die Mechanik der Zellwand wurde kürzlich von R. Mark [1965a, 1965b] eingehend untersucht. Unter Berücksichtigung der molekularen Struktur, der Atomkräfte, der chemischen Zusammensetzung und der physikalischen Struktur in den einzelnen Wandschichten, führte er eine gründliche Spannungsanalyse der Zellwand durch, die auch mit einem Experiment gute Übereinstimmung zeigte. Für Reihenuntersuchungen ist aber dieses Verfahren nicht geeignet. Angesichts der Erfassung von nur einigen der wichtigsten Faktoren sind für die vorliegende Arbeit vereinfachte Modelle erforderlich.

Zunächst kann man den Einfluß des Anteils der einzelnen Wandschichten gesondert betrachten. Unter der An-

nahme, daß die Bruchdehnung für alle Wandschichten die gleiche ist, was nach den Ergebnissen von B. A. Jayne [1960] berechtigt erscheint, weil sie fast die gleichen Bruchdehnungen für Früh- und Spätholzfasern erbrachten, läßt sich folgende Gleichung aufstellen:

$$\sigma_z = \sigma_p P_p + \sigma_1 P_1 + \sigma_2 P_2 + \sigma_3 P_3 \quad (1)$$

worin σ die Bruchspannung und P der Anteil der betreffenden Wandschicht ist und die Indices $z, p, 1, 2,$ und 3 sich auf die Gesamtzellwand, die Primärwand und die S₁, S₂ und S₃-Schicht der Sekundärwand beziehen. Gl. (1) stellt ein vierschichtiges Modell dar, und kann durch Kombinieren der Primärwand und der S₁-Schicht zu einem dreischichtigen Modell nach Gl. (2) vereinfacht werden:

$$\sigma_z = \sigma_{p1} P_{p1} + \sigma_2 P_2 + \sigma_3 P_3 \quad (2)$$

Gl. (2) läßt sich weiterhin auf ein zweischichtiges Modell zurückführen, wenn man alle Schichten mit vorwiegend senkrechter Orientierung zur Zellachse kombiniert und der S₂-Schicht gegenüberstellt:

$$\sigma_z = \sigma_{p13} P_{p13} + \sigma_2 P_2 \quad (3)$$

oder, da

$$P_{p13} = 1 - P_2,$$

$$\sigma_z = \sigma_{p13} + (\sigma_2 - \sigma_{p13}) P_2 \quad (3a)$$

Bei den obigen Gleichungen handelt es sich um lineare Beziehungen zwischen den Veränderlichen und diese sind daher für die einfache oder mehrfache Regressionsanalyse geeignet. Zur Erfassung des Einflusses des Steigungswinkels in der S₂-Schicht ist ebenso eine lineare Beziehung notwendig. Die Hankinson-Gleichung [Forest Products Laboratory 1955] und die von C. B. Norris entwickelte Gleichung [1962] erfüllen diese Bedingung nicht. Eine Annäherung an diese Beziehungen läßt sich nun erzielen, wenn man

$$\sigma_2 = \sigma_{\perp} + (\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}) \cos^n \theta \quad (4)$$

setzt. Wenn man den Beitrag der anderen Wandschichten, außer der S₂ vernachlässigt, ergibt dies:

$$\sigma_z = \sigma_{\perp} + (\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}) \cos^n \theta \quad (4a)$$

worin die Indices \perp und \parallel sich auf die Quer- und Längsrichtung der Mikrofibrillen in der S₂-Schicht beziehen, n eine zu bestimmende Konstante und θ der Steigungswinkel ist. In Gl. (4) ist $\cos^n \theta$ linear und sie vereinfacht sich auf σ_{\perp} und σ_{\parallel} wenn der Steigungswinkel 90 beziehungsweise 0 beträgt. Wenn man nun Gl. (4) in Gl. (2) einsetzt erhält man:

$$\sigma_z = \sigma_{p1} + (\sigma_{\perp} - \sigma_{p1}) P_2 + (\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}) P_2 \cos^n \theta + (\sigma_3 - \sigma_{p1}) P_3 \quad (5)$$

Gl. (5) ist ebenfalls eine lineare Beziehung zwischen σ_z und den Veränderlichen $P_2(x_1)$, $P_2 \cos^n \theta(x_2)$ und $P_3(x_3)$ in der Form

$$Y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 \quad (6)$$

Nach entsprechenden Bestimmungen einer Reihe von Werten der abhängigen und unabhängigen Veränderlichen können mit Hilfe der mehrfachen Regressionsanalyse die Konstanten a_i bestimmt werden, woraus sich die Festigkeiten der Wandschichten nach dem Schema

$$\begin{aligned} \sigma_{p1} &= a_0 & \sigma_2 &= a_0 + a_1 + a_2 \\ \sigma_{\perp} &= a_0 + a_1 & \sigma_3 &= a_0 + a_3 \end{aligned} \quad (6a)$$

ergeben. Wenn man andererseits Gl. (4) in Gl. (3a) einsetzt, und zusätzlich in Annäherung $\sigma_{p13} = \sigma_{\perp}$ setzt, erhält man die einfachere Form:

$$\sigma_z = \sigma_{\perp} + (\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}) P_2 \cos^n \theta \quad (7)$$

woraus sich σ_{\perp} und σ_{\parallel} mit der einfachen Regressionsanalyse bestimmen lassen.

Tabelle 1. Zusammenfassung der Meßwerte

	Frühholz		Spätholz	
	Mittelwert	Standardabweichung \pm	Mittelwert	Standardabweichung \pm
P_{p1}	0,402	0,0209	0,241	0,0344
P_2	0,192	0,0202	0,699	0,0410
P_3	0,406	0,0288	0,060	0,0213
Zellwandquerschnitt, mm ²	$3,94 \times 10^{-4}$	$8,18 \times 10^{-5}$	$6,27 \times 10^{-4}$	$1,72 \times 10^{-4}$
Steigungswinkel, grad	39,7	7,63	19,6	2,03
Bruchlast, kp	0,0130	0,0052	0,0604	0,0238
Zugfestigkeit, kp/mm ²	34,5	16,9	96,1	29,7

Analyse der Ergebnisse

Bei einigen der je 50 Früh- und Spätholztracheiden, die anfangs geprüft wurden, konnten die eine oder andere Messung nicht erfolgreich durchgeführt werden. Eine vollständige Reihe von Meßwerten wurde aber für 31 der Früh- und 39 der Spätholztracheiden ermittelt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 1 zusammengefaßt.

In allen Meßwerten zeigen die Früh- und Spätholztracheiden beträchtliche Unterschiede. Die Zugfestigkeitswerte decken sich gut mit den von B. A. Jayne [1960] für Douglasie ermittelten Werten, und G. Ifju und R. W. Kennedy [1962] stellten ähnliche Werte der Steigungswinkel bei der gleichen Holzart fest. Leider sind im Schrifttum keine näheren Angaben über den Flächenanteil der einzelnen Wandschichten zu finden, mit Ausnahme der Messungen von G. Jayme und D. Fengel [1961] die für Frühholztracheiden der Fichte P_2 -Werte zwischen 0,74 und 0,84 ergaben. H. Harada [1965] erhielt einen P_2 -Wert von 0,78 an einer Frühholztracheide von *Pinus densiflorus*. In der vorliegenden Arbeit sind selbst die Werte für Spätholztracheiden niedriger. Ob es sich dabei um Unterschiede in der Holzart oder aber um systematisches Überschätzen der inneren und äußeren Schichten, möglicherweise durch optische Randerscheinungen, handelt, ist nicht ohne weiteres zu ersehen.

Zunächst wurden mehrfache Regressionsanalysen nach dem Modell der Gl. (5) mit einer Reihe von Werten des Exponenten n durchgeführt, in der Absicht, denjenigen Wert von n zu wählen der zu der kleinsten mittleren Streuung um die Regressionsfläche führt. Es ergab sich aber, daß, unabhängig von dem gewählten Wert von n , die nach den Gleichungen (6a) erhaltenen Bruchspannungswerte untereinander widersprechend, zum Teil sogar negativ waren. Das Modell nach Gl. (5) mußte daher als für die vorhandenen Meßwerte zu kompliziert angesehen werden.

Weitere Regressionsanalysen wurden nach den Modellen der Gln. (3a), (4a) und (7) durchgeführt. Zuerst wurde dies mit allen Werten, d. h. Früh- und Spätholz kombiniert, berechnet. Verschiedene Werte von n wurden erprobt, wobei man nur ganze Zahlen berücksichtigte, und bei dem Modell nach Gl. (4a) ergab $n = 9$, bei dem Modell nach Gl. (7) $n = 7$ die kleinste mittlere Streuung um die Regressionsgerade. Unter entsprechender Benutzung dieser Werte wurden die Regressionsanalysen für alle drei Modelle, gesondert für Früh- und Spätholz durchgeführt. Die Bilder 1 bis 3 zeigen die Zugfestigkeit in Abhängigkeit von den entsprechend umgerechneten Meßwerten zusammen mit den berechneten Regressionsgeraden. Weiterhin wurden die Werte in allen drei Fällen einer Kovarianzanalyse unterworfen. Bei den Modellen nach den Gl. (3a) und (4a) ergab sich dabei kein statistisch gesicherter Unterschied zwischen den jeweiligen Regressionsgeraden für Früh- und Spätholz, während bei dem Modell nach Gl. (7) ein Unterschied in der Neigung der gesonderten Regressionsgeraden mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von 5% auftrat.

Daraus geht hervor, daß unter Berücksichtigung des Steigungswinkels oder des Anteils der S_2 -Schicht die Früh- und Spätholztracheiden hinsichtlich ihrer Zugfestigkeit als einheitliches Kollektiv betrachtet werden können. Die Unterschiede in den Zugfestigkeiten sind daher lediglich auf Unterschiede in den Größen der strukturellen Merkmale und nicht auf grundsätzliche Unterschiede in der Struktur zurückzuführen. Die scharfe Abgrenzung der Zugfestigkeitswerte beruht auf einer ebenso scharfen Abgrenzung der Merkmalswerte, die sich jeweils in nur engen Grenzen bewegen. Dies erweist sich bei

zunächst wurden mehrfache Regressionsanalysen nach dem Modell der Gl. (5) mit einer Reihe von Werten des Exponenten n durchgeführt, in der Absicht, denjenigen Wert von n zu wählen der zu der kleinsten mittleren Streuung um die Regressionsfläche führt. Es ergab sich aber, daß, unabhängig von dem gewählten Wert von n , die nach den Gleichungen (6a) erhaltenen Bruchspannungswerte untereinander widersprechend, zum Teil sogar negativ waren. Das Modell nach Gl. (5) mußte daher als für die vorhandenen Meßwerte zu kompliziert angesehen werden.

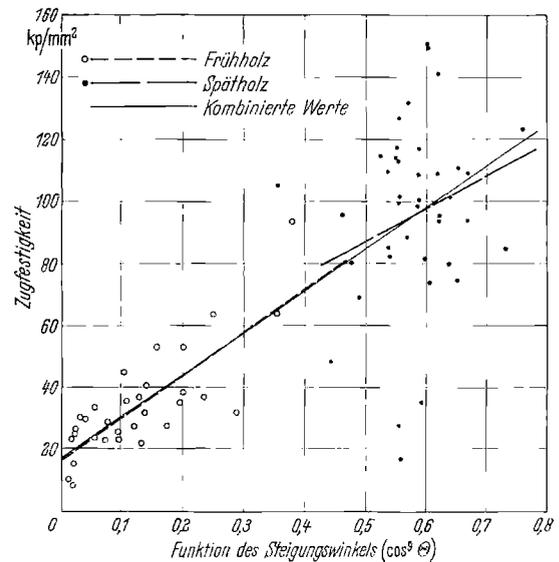


Bild 1. Zugfestigkeit von Früh- und Spätholztracheiden als Funktion des Steigungswinkels.

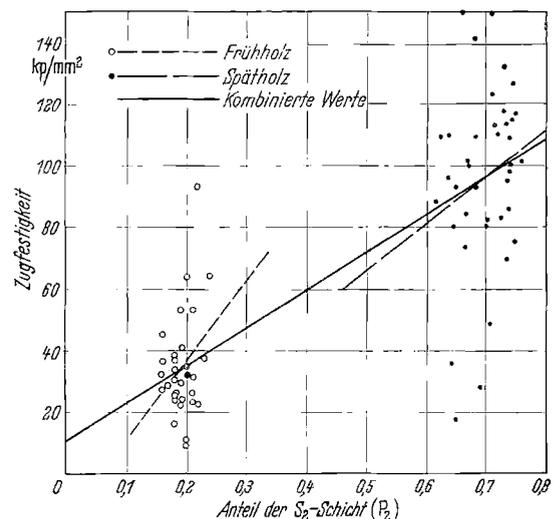


Bild 2. Zugfestigkeit von Früh- und Spätholztracheiden als Funktion des Anteils der S_2 -Schicht.

Regressionsanalysen als Nachteil. In diesem Zusammenhang ist es bemerkenswert, daß die Zusammenhänge zwischen Zugfestigkeit und Steigungswinkel am eindeutigsten hervortreten, da nur die Steigungswinkelwerte eine angenähert gleichmäßige und fortlaufende Verteilung bilden.

Nachdem die Berücksichtigung des Steigungswinkels oder des Anteils der S_2 -Schicht allein ausreicht, um Früh- und Spätholztracheiden als Kollektiv zu betrachten, wäre

Tabelle 2. Übersicht der nach verschiedenen Modellen errechneten Zugfestigkeitswerte quer und längs der Mikrofibrillen

	$\sigma_z = f(P_2)$; Gl. (3a)		$\sigma_z = f(\theta)$; Gl. (4a)		$\sigma_z = f(\theta, P_2)$; Gl. (7)	
	σ_{\perp} kp/mm ²	σ_{\parallel} kp/mm ²	σ_{\perp} kp/mm ²	σ_{\parallel} kp/mm ²	σ_{\perp} kp/mm ²	σ_{\parallel} kp/mm ²
Kombinierte Meßwerte	10,7	133,2	17,9	151,4	27,9	178,2
Frühholz allein	-15,3	243,2	17,4	153,4	15,4	532,3
Spätholz allein	-10,5	142,0	34,4	140,1	-74,9	150,8

zu erwarten, daß dies bei Berücksichtigung beider Merkmale zusammen erst recht der Fall sein würde. Die Resultate der statistischen Analyse sprechen aber dagegen. Es ist daher anzunehmen, daß das Modell nach Gl. (7) die wahren Verhältnisse nicht erfaßt. Gl. (4a) ist aber erst recht eine Vereinfachung. Der eindeutige Zusammenhang nach diesem

Zusammenfassung

Unterschiede in der Zugfestigkeit von Früh- und Spätholztracheiden sind wesentlich durch Unterschiede im Steigungswinkel der Mikrofibrillen in der S₂-Schicht und ihrem Flächenanteil begründet. Durch Berücksichtigung nur eines dieser Merkmale, was wohl durch starke Korrelation der Merkmale ermöglicht wird, können Früh- und Spätholztracheiden als einziges Kollektiv betrachtet werden. Die aus den experimentellen Ergebnissen ermittelten Zugfestigkeitswerte quer und längs zur Mikrofibrillenachse nähern sich an die theoretisch berechneten Werte gut an.

Summary

Differences in the tensile strength of earlywood and latewood tracheids are determined largely by differences in the fibril angle in the S₂ layer and its proportion of the total cross section. By considering only one of these characteristics, which is possible because apparently they are strongly correlated, earlywood and latewood tracheids can be viewed as a single population. Tensile strength values perpendicular and parallel to the microfibrils which were determined from the experimental results well approached theoretically calculated values.

Schrifttum

Cocke, R. A.: Influence of Fibril Angle on Longitudinal Shrinkage of Ponderosa Pine Wood. *J. Forestry* Bd. **44** (1946) H. 11, S. 876/878.
 Forest Products Laboratory, Wood Handbook. Washington, D. C. 1953. U. S. Department of Agriculture.
 Harada, H.: Ultrastructure and Organization of Gymnosperm Cell Walls. In: Cellular Ultrastructure of Woody Plants (Herausgeber W. A. Côté, Jr.), Syracuse 1965; Syracuse University Press.
 Iijima, G., u. R. W. Kennedy: Some Variables Affecting Microtensile Strength of Douglas Fir. *Forest Prod. J.* Bd. **12** (1962) H. 5, S. 213/217.
 Jayne, G., u. D. Engel: Beobachtungen an Ultradünnschnitten von Fichtenholz. *Holz als Roh- und Werkstoff* Bd. **19** (1961) H. 2, S. 59/55.
 Jayne, B. A.: Private Mitteilung (1961).
 —: Some Mechanical Properties of Wood Fibers in Tension. *Forest Prod. J.* Bd. **10** (1960) H. 6, S. 316/322.
 —: Mechanical Properties of Wood Fibers. *Tappi* Bd. **42** (1959) H. 6, S. 461/467.
 Kersavage, P. C.: The Effect of Some Chemical Methods of Fiber Preparation on the Tensile Strength of Douglas Fir Fibers. M. S. Thesis, University of California 1962; Berkeley, California.
 Kloot, N. H.: A Micro-Testing Technique for Wood. *Austr. J. Appl. Sci.* Bd. **3** (1952) H. 2, S. 123/133.
 Lee, C. I.: Crystallinity of Wood Cellulose Fibers Studied by X-Ray Methods. *Forest Prod. J.* Bd. **11** (1961) H. 2, S. 108/112.
 Leopold, B., u. D. C. McIntosh: Chemical Composition and Physical Properties of Wood Fibers III. *Tappi* Bd. **44** (1961) H. 3, S. 235/240.
 Mark, R.: Treatise on the Tensile Strength of Tracheids. Ph. D. Dissertation, Yale University 1965a; New Haven, Connecticut.
 —: Tensile Stress Analysis of the Cell Walls of Coniferous Tracheids. In: Cellular Ultrastructure of Woody Plants (Heraus-

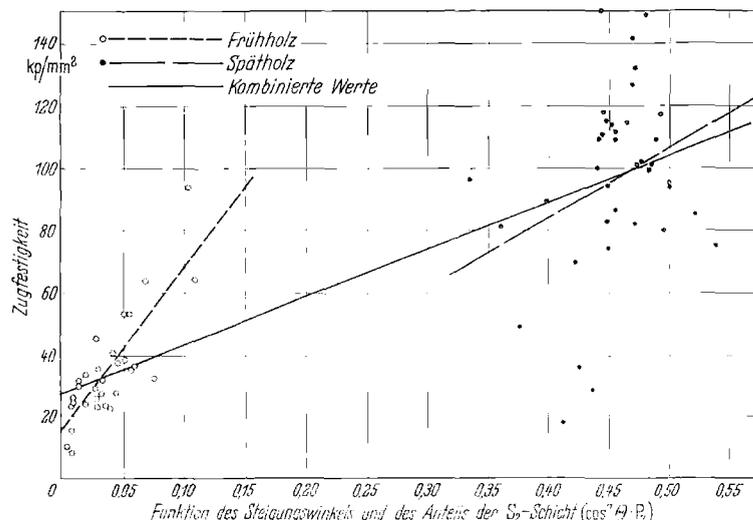


Bild 3. Zugfestigkeit von Früh- und Spätholztracheiden als Funktion des Steigungswinkels und des Anteils der S₂-Schicht.

Modell läßt sich wahrscheinlich darauf zurückführen, daß die Steigungswinkel und die P₂-Werte nicht voneinander unabhängig sind. In den Frühholztracheiden sind die Steigungswinkel groß und die P₂-Werte klein, während in den Spätholztracheiden das Gegenteil der Fall ist. Dies konnte wegen der engen Gruppierung der P₂-Werte nicht näher überprüft werden. Es ist aber nicht abwegig, als in Wirklichkeit nicht zu erreichende Grenzfälle P₂ = 0 bei einem Steigungswinkel von 90° und P₂ = 1 bei einem Steigungswinkel von 0° zu setzen. Unter der Annahme von $\sigma_{p13} = \sigma_{\perp}$ lassen sich dann die in Tabelle 2 aufgeführten Werte aus den Konstanten der Regressionsgeraden berechnen.

Wie aus Tabelle 2 ersichtlich ist, stimmen die aus den drei verschiedenen Modellen berechneten Werte in der Größenordnung gut überein, wenn Früh- und Spätholztracheiden zusammen betrachtet werden. Nach dem Modell von Gl. (4a) trifft dies auch für die gesonderten Berechnungen von Früh- und Spätholztracheiden zu, während sich ansonsten Unstimmigkeiten ergeben. Die mit dem Modell nach Gl. (4a) und den kombinierten Meßwerten berechneten Zugfestigkeitswerte dürften daher die beste Schätzung darstellen. Daraus ergibt sich eine Zugfestigkeit von 17,9 kp/mm² senkrecht und 151,4 kp/mm² parallel zur Mikrofibrillenachse. R. Mark (1965b) hat für kristalline Cellulose theoretische Zugfestigkeitswerte von 43,2 kp/mm² senkrecht und 766 oder 1775 kp/mm² (nach zwei verschiedenen Verfahren) parallel zur Molekülachse berechnet. Wenn man berücksichtigt, daß es sich bei den geprüften Fasern weder um reine Cellulose noch um rein kristallines Material handelt, ferner daß die verwendeten Modelle Vereinfach-

- geber W. A. Côté, Jr.). Syracuse 1965b: Syracuse University Press.
- McIntosh, D. C.: Wall Structure of Loblolly Pine Summerwood Holocellulose Fibers in Relation to Individual Fiber Strength. In: Cellular Ultrastructure of Woody Plants (Herausgeber W. A. Côté, Jr.). Syracuse 1965: Syracuse University Press.
- Norris, C. B.: Strength of Orthotropic Materials Subjected to Combined Stresses. U. S. Forest Products Laboratory, Madison, Rep. No. 1816 (1962).
- Schniewind, A. P.: Mechanical Behavior of Wood in the Light of its Anatomic Structure. Proceedings, Conference on the Mechanical Behavior of Wood (1962), University of California, Berkeley.
- Wilson, J. W., u. R. W. Wellwood: Intra-Increment Chemical Properties of Certain Western Canadian Coniferous Species. In: Cellular Ultrastructure of Woody Plants (Herausgeber W. A. Côté, Jr.). Syracuse 1965: Syracuse University Press.
- Ylinen, A.: Über den Einfluß des Spätholzanteils und der Rohwichte auf die Festigkeits- und elastischen Eigenschaften des Nadelholzes. Acta Forestalia Fennica Bd. 50 (1942) H. 5, S. 1/30.

Beziehungen zwischen der Elastizität und der statischen sowie dynamischen Biegefestigkeit von Kiefernholz nach dem Angriff durch echte holzerstörende Pilze

Relations Between Elasticity and Static and Impact Bending Strength of Pinewood after Exposure to Basidiomycetes

Von Günter Schultze-Dewitz

Institut für Forstwissenschaften Eberswalde der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin
Bereich Rohholzforschung und Holzschutz

Einleitung — Versuchsholz und Prüfpilze — Anordnung für die Pilzversuche — Festigkeitsprüfungen — Ergebnisse — Zusammenfassung — Schrifttum

Einleitung

Es darf als eine seit langem bekannte Tatsache gelten, daß sich bei Pilzangriff die Festigkeitseigenschaften von Holz eher vermindern als das Volumen oder das Gewicht [Cartwright u. Mitarb. 1931, 1936, 1958; J. Liese, Stamer 1934; Armstrong 1935; Scheffer 1936; Trendelenburg 1940; v. Pechmann, Schaile 1950; Narayanamurti u. Mitarb. 1951; Mulholland 1954; Göhre 1955; Kennedy 1958; Wazny 1958, 1959; Zenker 1959; Schultze-Dewitz 1962a, 1962b, 1962c, 1963, 1964; Rogalinski u. Mitarb. 1962; Kubiak u. Mitarb. 1962, 1963; Kubiak 1963; Gillwald, Michalak 1963; Kreße, Poller 1963]. Diese mit Basidiomyceten gemachten Erfahrungen konnten nach dem Bekanntwerden der Moderfäuleerreger somit auch auf Untersuchungen über die Beeinflussung von Holz durch diese Organismen übertragen werden [Armstrong, Savory 1959; W. Liese, v. Pechmann 1959; W. Liese, Ammer 1964; Zycha 1964].

Die Ermittlung der verbliebenen Druckfestigkeit nach Pilzangriff stellt auf jeden Fall die einfachste Festigkeitsprüfung dar; ihrer bedienten sich die meisten der genannten Holzforscher. Die Zugfestigkeit verliert bei den für Pilzversuche notwendigen kleinen Probenabmessungen wegen der großen Variationsbreite ihrer Werte an Aussagewert. Sie wurde in dieser Hinsicht nur von K. Rogalinski u. Mitarb. [1962] für Stieleiche und von W. Gillwald u. J. Michalak [1963] für Pappel untersucht. Dem Festigkeitsverlust des durch Basidiomyceten verpilzten Holzes auf statische Biegebeanspruchung widmeten sich neben den ebengenannten Forschern K. St. G. Cartwright u. Mitarb. [1931], K. Göhre [1955], J. Wazny [1959] und M. Kubiak u. Mitarb. [1962]. Mit der Schlagbiegefestigkeit (Bruchschlagarbeit) von Holz nach Basidiomycetenbefall befaßten sich zwar K. St. G. Cartwright u. Mitarb. [1931, 1936]. Jedoch war es offensichtlich erst R. Trendelenburg [1940], der mit seiner vielbeachteten Arbeit den Auftakt für weitere Untersuchungen über das Verhalten dieser Festigkeitseigenschaft gab [v. Pechmann, Schaile

1950; Narayanamurti u. Mitarb. 1951; Kennedy 1958; Wazny 1959; Kubiak u. Mitarb. 1962; Rogalinski u. Mitarb. 1963; Gillwald, Michalak 1963]. Der Einfluß von echten holzerstörenden Pilzen auf die Elastizität von Holz wurde, soweit dem Verfasser bekannt ist, bislang nur von T. C. Scheffer [1936], D. Narayanamurti u. Mitarb. [1951] und J. R. Mulholland [1954] untersucht.

Über die Beziehungen zwischen der Elastizität und der Biegefestigkeit des Holzes nach Pilzangriff scheint offenbar noch nicht gearbeitet worden zu sein. Der Verfasser hatte bereits begonnen, dieser Frage nachzugehen, als ihm der von F. Kollmann gehaltene Vortrag über die Beziehungen zwischen der Elastizität und der Biegefestigkeit von Holz durch einen Bericht [Kollmann 1965] bekannt wurde.¹ Auf die von N. Ghelmezii [1938] aufgezeigten Zusammenhänge zwischen der Elastizität und der statischen sowie dynamischen Biegefestigkeit wird weiter hinten eingegangen.

Versuchsholz und Prüfpilze

Das Versuchsholz lieferten 9 verschiedene Kiefernarten.² Aus diesen wurden Biegestäbe von 12 cm × 1 cm × 1 cm geschnitten. Die Stäbe hatten nach Möglichkeit radiale und tangential-seitenflächen, so daß die Biegebelastung parallel zu den Jahrringen erfolgen konnte. Bei der extrem weitringigen Monterey-Pine (*Pinus radiata*) wurden die Stäbe derart ausgeformt, daß das Spätholz genau in die Mitte der Querschnittflächen zu liegen kam. Von jeder Kiefernart wurden Splint und Kern gemeinsam geprüft.

Die für die Untersuchungen verfügbare Menge der einzelnen Kiefernarten war unterschiedlich. Ihre Verteilung auf die einzelnen Pilzarten zeigen die Bilder 1 und 2 und die Tabellen 1 und 2.

¹ Herr Prof. Dr.-Ing. F. Kollmann war so freundlich, mir das Manuskript des im April 1965 in Spokane (USA) gehaltenen Vortrages „Relationship between Elasticity and Bending Strength“ zur Einsichtnahme zuzuleiten, wofür ich vielmals danke.

² Für die Übersendung von Holz der verschiedenen Kiefern möchte ich den Herren Prof. Dr.-Ing. F. Kollmann, Prof. Dr.-Ing. G. Giordano (Florenz), Dozent Dr. A. T. Entscheff (Sofia) und E. W. B. Da Costa (Melbourne) meinen aufrichtigen Dank aussprechen.