

# Qualitative und quantitative Ermittlung der Mikrozeigenschaften von Holz

## Qualitative and Quantitative Evaluation of the Microtensile Strength of Wood

Von **Laszlo P. Futó**

Institut für Mikrotechnologische Holzforschung, ETH, Zürich

### Zusammenfassung

Festigkeitsuntersuchungen an Mikroprobekörpern sind aus theoretischen und praktischen Gründen sehr wichtig. Insbesondere ist das Studium der Gewebe- und Zellverformung unter Zugbeanspruchung von großem Interesse. In der vorliegenden Arbeit wird ein Gerät beschrieben, das der Ermittlung der Zugfestigkeit an einzelnen Fasern sowie an Mikroprobekörpern von wenigen Mikron Dicke dient und das gleichzeitig die mikroskopische Beobachtung der Verformung und des Zerreißvorganges ermöglicht.

### Summary

Investigations on the strength of micro samples are of great importance for theoretical as well as for practical reasons. In particular, studies on the deformation of the tissue and the cells under tensile stress are of high interest. The present paper describes a device which serves to determine the tensile strength of individual wood fibers and also of micro samples on only a few micrometers in thickness and which at the same time makes possible the microscopic observation of the deformation and the process of rupture.

### Einleitung

Die Festigkeit eines Körpers gibt über seine Verwendbarkeit wertvolle Auskünfte. Beim Holz, einem inhomogenen, anisotropen, geschichteten und porösen Material mit naturbedingten Fehlstellen, treten die Streuung von Festigkeitswerten sowie ihre Abhängigkeit von der Probengröße stark in Erscheinung. Diese Feststellung trifft, wenn man Angaben der Literatur über Grenzwerte von Festigkeiten verfolgt [Kollmann 1951], in erster Linie für die Zugfestigkeiten zu.

Zugfestigkeiten von Objekten mit Bauholzabmessungen, von sorgfältig ausgelesenen genormten Proben, von Mikroschnitten und von Einzelfasern weisen große Unterschiede auf. So können an fehlerfreien, kleinen Proben und noch mehr an Einzelfasern gemessene Zug-Bruch-Spannungen z. B. keinen genauen Anhaltspunkt für die Zugfestigkeit größerer Stücke geben. Die mechanischen Eigenschaften des zellulär aufgebauten Holzes hängen nämlich nicht nur von der submikroskopischen Struktur der Zellwände, sondern auch vom mikroskopischen Gefüge und der mikroskopischen Textur ab. Außerdem entsprechen große Probekörper eher den praktischen Gegebenheiten. Das alles spricht von der Holzverwendung aus gesehen für Untersuchungen an Stücken mit größeren Dimensionen.

Andererseits ist aber zu verstehen, daß die Herstellung von Holzwerkstoffen und die Bemühungen um Verbesserung der Holzeigenschaften durch Zerlegung, Zerkleinerung, Veredelung und Wiedervereinigung des Rohstoffes das Bedürfnis geweckt haben, das mechanische und rheologische Verhalten des Holzes auch im strukturellen Bereich kennenzulernen. Untersuchungen an kleineren Proben, an Mikroschnitten und an Einzelfasern stellen außer ihrer grundlegenden Bedeutung auch interessante Aufgaben für die angewandte Forschung dar. Bei der Probenwahl hat man bisher allgemein Mikroschnitten den Vorzug gegeben; ihre Gewinnung und Behandlung sind einfach im Vergleich zu jenen von Einzelfasern. Von den Festigkeitsuntersuchungen eignen sich Zugfestigkeitsprüfungen für Proben mit kleinen Abmessungen am besten. Das mag der

Grund sein, weshalb die Mehrzahl der Autoren, die an Mikroschnitten Festigkeitswerte, Formänderungen und verschiedene rheologische Gesetzmäßigkeiten zu ermitteln suchten, sich fast ausschließlich der Zugfestigkeitsprüfungen bedienten. Die meisten Untersuchungen, wie z. B. diejenigen von B. A. Jayne [1960], G. Jayne und D. Fengel [1961], G. Ifju und R. W. Kennedy [1962], R. M. Kellog und G. Ifju [1962], A. P. Schniewind [1959] und R. E. Mark [1967] sind mit der Instron-Prüfmaschine (Instron Engineering Corporation, Canton, Mass. USA) durchgeführt worden. Nur in wenigen Fällen [A. Frey-Wyssling 1938; N. H. Kloot 1952; N. Kanaya und T. Yamada 1967] erfolgten die Messungen an eigens konstruierten Vorrichtungen. Ein Bedürfnis, spezielle Prüfgeräte auch nach dem Bau der ersten Instron-Maschine zu konstruieren, ergab sich aus der mangelnden Möglichkeit direkter mikroskopischer Beobachtung bei den vorhandenen kommerziellen Prüfmaschinen. Die von A. Frey-Wyssling im Jahre 1938 verwendete Vorrichtung zur Zugbeanspruchung von Mikroschnitten wurde ursprünglich von H. Ambronn [1892] für Dehnungsmessungen an Gelstreifen konstruiert und durch M. Waechter [1924] so umgebaut, daß die Proben auch eingetaucht in Flüssigkeiten zerrissen werden konnten. Die Möglichkeit mikroskopischer Beobachtung während der manuellen Belastung war schon hier vorgesehen. N. H. Kloot [1952] konnte seine 80 µm dicken Mikroschnitte während der Belastung ebenfalls mikroskopisch beobachten. Auch hier erfolgte die Belastung der Proben manuell. N. Kanaya und T. Yamada [1967] stellen die mikroskopische Beobachtung und die Prüfung von Formänderungen in den Vordergrund. Sie belasten manuell mit Hilfe einer Mikrometerschraube 20 µm dicke Querschnitte unter einem Mikroskop. Das Problem, eine mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit kontinuierlich steigende, mechanische Belastung von Mikroschnitten und die gleichzeitige mikroskopische Beobachtung mit Objektiven hoher Auflösung zu vereinen, ist bisher noch nicht gelöst. In den bis heute bekannten Untersuchungen hat man sich deshalb für eine exakte Ermittlung der Kraft-Dehnungs-Relation oder für Beobachtungen von Formänderungen im mikroskopischen Bereich entscheiden müssen. Es ist aber vor allem in Untersuchungen von imprägnierten sowie von chemisch oder physikalisch vorbehandelten Objekten wichtig, die modifizierten Eigenschaften der Zellgewebe gleichzeitig quantitativ und qualitativ erfassen zu können. Aus diesem Grunde ist die Aufgabe gestellt worden, eine Mikrozerrei-

<sup>1</sup> Die vorliegende Habilitationsschrift ist auf Anregung von Herrn Prof. Dr. H. H. Bosshard entstanden. Für sein großes Interesse und die wertvolle Unterstützung möchte ich ihm herzlich danken. Mein Dank gilt auch Herrn Prof. H. Kühne für wertvolle Ratschläge. Die experimentellen Arbeiten waren nur möglich dank großzügiger Mitfinanzierung durch Mittel der Arbeitsbeschaffungskredite des Bundes zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, wofür auch im Namen des Institutes der beste Dank ausgesprochen sei.

maschine zu konstruieren, welche diesen Anforderungen in weitem Masse gerecht wird.

### Methoden

#### Ermittlung der Mikrozugfestigkeit

Die quantitative Bestimmung von Zugfestigkeit und Dehnung, die mikroskopischen Beobachtungen von Formänderungen und Bruchvorgängen im Gewebe während der Belastung, und das gleichzeitige Registrieren dieser Angaben stellen verschiedene Anforderungen an Zerreißmaschine und Arbeitsmethoden: Die Mikroschnitte müssen zunächst so eingespannt werden können, daß sie ihre Position während der zunehmenden Belastung nicht ändern; nur so ist es möglich, einen beliebig eingestellten Probenabschnitt im Durchlicht des Mikroskopes ständig zu beobachten. Die Reibungen der beweglichen Maschinenteile und die Vibration des Motors müssen ganz ausgeschaltet oder wenigstens auf ein Mindestmaß reduziert werden. Die Belastungen und Belastungsgeschwindigkeiten sollen konstant gehalten oder variiert werden können. Das Registrieren der kleinen Dehnungswerte verlangt eine erhebliche elektronische Verstärkung.

Diesen verschiedenen Aspekten ist bei der Konstruktion der Mikrozerreißmaschine Rechnung getragen worden. Nach Bild 1 besteht das Gerät aus einem Mikroskop oder einer Stereolupe mit Photo- oder Filmausrüstung, einer Einspannvorrichtung für Mikroschnitte und für Fasern, der Zugvorrichtung, dem Dehnungsmesser und dem Registriergerät.

Hauptbestandteil des Instrumentes ist ein Leitz-Laborlux-Mikroskop mit fixiertem Tisch und Tubus-Fokussierung. Je nach Art der Problemstellung, des Objektes und des Verfahrens kann dieses Mikroskop als normales Lichtmikroskop, als Phasenkontrast- oder als Fluoreszenzmikroskop ausgelegt sein. Ein Phototubus ermöglicht das Aufsetzen einer Photo- oder Filmkamera. Eine auswechselbare Einspannvorrichtung, welche unmittelbar mit dem eigens angefertigten Mikroskoptisch zusammengebaut ist, erlaubt die Verschiebung des eingespannten Objektes unter dem Objektiv, und zwar in sagittaler wie auch in transversaler Richtung. Die Verschiebung kann mittels Mikrometerschrauben unabhängig von der Zugbelastung durchgeführt werden. Diese Möglichkeit ist beim Photographieren oder Filmen sehr wichtig und erlaubt, die Kamera während der steigenden Belastung auf die gewünschten Probenabschnitte zu richten. Die Einspannvorrichtung ist so konstruiert, daß der scharf eingestellte Probenabschnitt während des Zugversuchs an derselben Stelle bleibt und sich nur um die Größe der Dehnung bewegt. Die Dehnungen können also auch optisch ermittelt werden. Die waagrecht eingespannte Probe kann durch einen Betätigungshebel mit Hilfe einer Laufwaage statisch oder dynamisch belastet oder entlastet werden. Der Laufwagen mit den wechselbaren Laufgewichten wird durch einen Motor mit Spindeltrieb

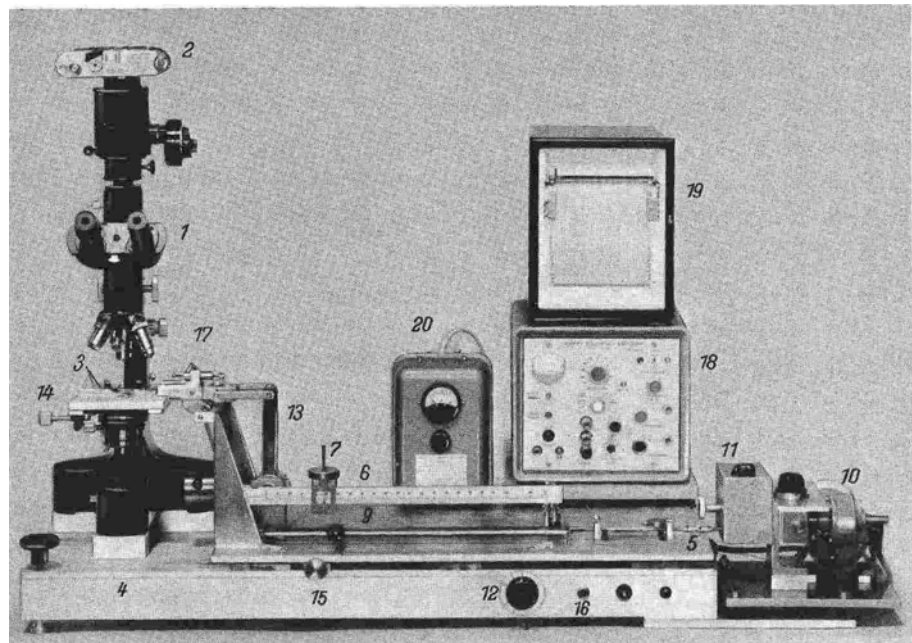


Bild 1. Mikrozerreißmaschine. 1 Mikroskop, 2 Photoausrüstung, 3 Gleittisch mit Einspannvorrichtung, 4 stationäre Grundplatte, 5 mobile Grundplatte, 6 Waage-Balken, 7 Laufgewicht mit wechselbarem Gewichtssatz, 8 Justiergewicht, 9 Antriebsspindel, 10 Elektromotor, 11 Übersetzungs-Schalter, 12 Potentiometer, 13 senkrechter Waagehebel, 14 Antriebskopf für die Quereinstellung, 15 Antriebskopf für die Sagittaleinstellung, 16 Hauptschalter, 17 Induktiver Wegmesser, 18 Volltrans. Trägerfrequenzverstärker, 19 x-y-Linienschreiber, 20 Transformator für Mikroskopbeleuchtung.

auf dem Waagebalken in Bewegung gesetzt. Die Geschwindigkeit des Laufwagens entspricht der bei Zugfestigkeitsuntersuchungen üblichen Belastungsgeschwindigkeit von 600 kp/cm<sup>2</sup> min und kann innerhalb der Grenzen 20 bis 2000 kp/cm<sup>2</sup> min variiert werden. Der Motor und das Getriebe befinden sich außerhalb der Grundplatte, sind erschütterungsfrei befestigt und über eine Gelenkkupplung und Teleskopwelle mit der Spindel verbunden. Die Zugdehnungen der Proben werden von einem induktiven Wegmesser automatisch aufgenommen und durch einen volltransistorisierten Trägerfrequenzverstärker vergrößert. Ein Stufenschalter mit 10 geeichten Verstärkungsstellungen ermöglicht eine bis mehrtausendfache Vergrößerung der Dehnung. Die Zugdehnungen werden auf einem x-y-Linienschreiber in der Funktion der Kraft registriert. Der Papiervorschub kann in drei verschiedenen Geschwindigkeiten eingestellt werden. Das direkte Ablesen (ohne Registrierung) der Zugkräfte und der Dehnungen ist ebenfalls möglich.

#### Herstellung von Probekörpern

Im Rahmen dieser Arbeit ist in einer ersten Versuchsreihe mit der neu konstruierten Mikrozerreißmaschine unmodifiziertes Fichtenholz (*Picea abies* L.) geprüft worden (Kernholz:  $\rho_0 = 0.46$  g/cm<sup>3</sup>, Splintholz:  $\rho_0 = 0.53$  g/cm<sup>3</sup>). Die Probekörper von 20 ... 250  $\mu$ m Dicke wurden mit einem Jung „K“-Mikrotom aus kambiumnahem Splint- und marknahem Kernholz hergestellt. Die möglichen Schnitt- und Belastungsrichtungen stimmen mit den von H. H. Bosshard [1956] in Schwindungsmessungen beschriebenen Meßrichtungen überein (Bild 2).

Zur Gewinnung der Mikroschnitte wird während des Schneidens der unbehandelten, luftgetrockneten Holzklötzchen ein Wasser/Glycerin-Gemisch (1:1) verwendet, um die Geschmeidigkeit des Holzes zu erhöhen (Größe der Holzklötzchen: 20 mm lang, 6 mm breit). Die Schnitte werden anschließend zwischen Objektträgern unter Vakuum

entwässert und damit das Glycerin aus dem Holz entfernt. Zur Beschleunigung dieses Prozesses legt man zwischen die Gläser mit Vorteil zwei Streifen Filterpapier. Nach unserer Feststellung ruft die kurze Behandlung mit verdünntem Glycerin keine nachteilige Veränderungen des Holzes hervor. Anschließend erfolgt, ebenfalls zwischen zwei Objektträgern, die Trocknung der Proben im Klimaraum. Aus den klimatisierten Schnitten werden dann die Probekörper gestanzt

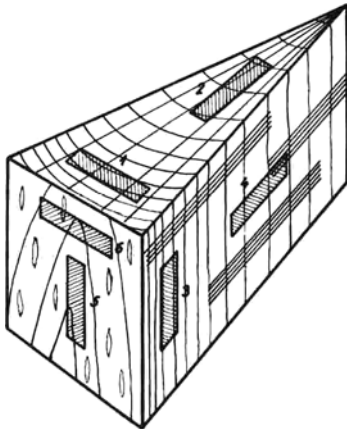


Bild 2. Die möglichen Schnitt- und Belastungsrichtungen der Probe. 1 Quertangential ( $Q_t$ ), 2 Quer-radial ( $Q_r$ ), 3 Radial-längs ( $R_l$ ), 4 Radial-radial ( $R_r$ ), 5 Tangential-längs ( $T_l$ ), 6 Tangential-tangential ( $T_t$ ).

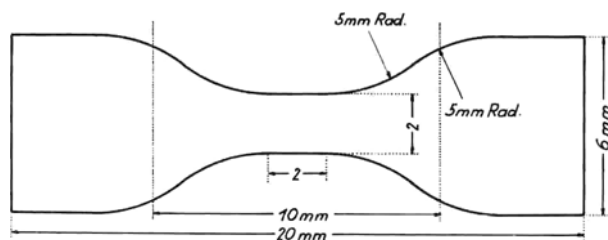


Bild 3. Form und Abmessungen der Probe.

(Bild 3). Das Material wird unter einer Stereolupe sortiert und die fehlerfreien Proben wieder zwischen Glasplatten im Klimaraum aufbewahrt. Die Mikrozerreißmaschine befindet sich im selben Klimaraum. Für jede Belastungsrichtung sind je 20 Proben je Jahrringposition geprüft worden. Die Ergebnisse stellen Mittelwerte dieser Messungen dar.

#### Diskussion

In der Einleitung wurde auf die Wichtigkeit von Festigkeitsuntersuchungen im mikroskopischen Bereich hingewiesen. Die Bedeutung solcher Untersuchungen geht über den theoretischen Rahmen hinaus. Das beweist die große Zahl aus dem Schrifttum bekannter Arbeiten, die sich mit diesem Problemkreis beschäftigen. Gerade auch auf dem Gebiet der Faserprüfungen hat man zahlreiche einschlägige Verfahren und Geräte entwickelt.

Die hier gestellte Aufgabe war die Bearbeitung von Zugfestigkeitsproben an Mikroschnitten. Die im vorstehenden Kapitel beschriebene Mikrozerreißmaschine entspricht dabei dieser Zielsetzung, d. h. der mikroskopischen Auswertung von Veränderungen verschiedenartiger Zellen teils unmodifizierter, teils modifizierter Holzgewebe sowie der Ermittlung von Zugfestigkeiten und Dehnungen während einer kontinuierlichen mechanischen Zugbelastung.

Die meisten Forscher, wie z. B. A. B. Wardrop [1951], H. G. Ruenger und W. Klauditz [1953], W. Klauditz [1957], R. W. Wellwood [1962], W. K. Murphey [1963], G. Ifju [1964] und A. P. Schniewind [1959] haben sich bisher damit begnügt, 60 ... 80  $\mu\text{m}$

dicke und noch dickere Schnitte, oft sogar in feuchtem Zustand, zu zerreißen. Nur wenige haben 10 ... 20  $\mu\text{m}$  dicke Proben untersucht und daran mikroskopische Beobachtungen angestellt. Bei der Verwendung von dünnen Proben muß man sich darüber klar sein, daß durch das Anschneiden von Zellwänden die Festigkeitswerte des Gewebes stark herabgesetzt werden. Die Festigkeit angeschnittener Zellen ist bekanntlich deren Flächenanteil nicht proportional, sondern kleiner [Mark 1967]. Bei der Wahl der Schnittdicke muß deshalb entschieden werden, ob Festigkeit und Dehnung quantitativ ermittelt oder ob nur qualitative Veränderungen beobachtet werden sollen.

Was die Wahl der Probenform betrifft, vertreten die verschiedenen Autoren unterschiedliche Meinungen. Viele Arbeiten, wie z. B. jene von A. Ylinen [1942], A. B. Wardrop [1951], F. L. Brown [1963], S. Fujita und K. Nakato [1965] und A. Takahashi und T. Yamada [1966] berichten über Zugversuche, welche an spindelförmig ausgestanzten Mikroschnitten durchgeführt wurden. G. Ifju und seine Mitarbeiter [1965] zitieren dagegen einige Vorteile rechteckiger Proben und vertreten die Ansicht, daß die Festigkeitswerte derselben etwa 2 ... 12% größer wären. Andere Autoren, wie z. B. W. Klauditz [1957], J. E. Stone und D. W. Glayton [1961], G. Ifju [1964], R. W. Wellwood, G. Ifju und J. W. Wilson [1965], M. Salamon [1966] und R. W. Kennedy [1966] befürworten ebenfalls rechteckige Proben. Wenn man bedenkt, daß die meisten Länder für genormte Festigkeitsproben verschiedene Vorschriften haben, ist kaum zu hoffen, daß bezüglich der Probenform von Mikroschnitten in absehbarer Zeit eine internationale Verständigung erzielt wird. Eher einig ist man sich darüber, wie breit die mittlere Zone der Proben sein soll. Die Formulierung von R. E. Mark [1967] ist durchaus annehmbar, wonach die kritische Zone der Proben so zu beschränken ist, daß diese nur eine Sorte von Zellen enthält (mit Ausnahme der Markstrahlzellen, welche quer orientiert sind zu den Tracheiden). R. E. Marks Proben sind radial-längs orientiert und haben *Hantel-* oder *Sanduhr-*Form. Die kritische Zone der Proben wird auf 0,20 mm Breite und 0,75 mm Länge ausgestanzt. Es ist klar, daß eine rechteckige Form für eine so zarte Mittelzone kaum vorstellbar wäre, und daß die *dumbbell-* oder *hourglass-*Form wegen des Einspannens durchaus berechtigt ist. Andererseits muß bemerkt werden, daß in unserem Falle die 2 mm breite Mittelzone für die  $Q_r$ - und  $R_r$ -Richtungen überdimensioniert ist; ihre Auswirkungen werden im nächsten Kapitel ausführlich behandelt.

Theoretische und praktische Überlegungen führten zu Festigkeitsuntersuchungen an Mikroprobekörpern.

Es sind bereits verschiedene Geräte bekannt, die der Zugfestigkeitsprüfung von Fäden, Einzelfasern und Mikroschnitten dienen. Die mit diesen Geräten geprüften Mikroschnitte sind in der Regel 60 bis 80  $\mu\text{m}$  dicke und noch dickere Probekörper, aus denen sich maximale Zugfestigkeitswerte ermitteln lassen. Einige Forscher, die Verformungen und Ribbildungen in den verschiedenen Zellen während der Belastung verfolgen wollten, legten das Hauptgewicht auf die mikroskopische Beobachtung und belasteten 10 bis 20  $\mu\text{m}$  dicke Mikroprobekörper unter dem Objektiv eines Mikroskopes manuell. Der Verfasser hat sich das Ziel gesetzt, beide Probleme zu vereinigen und eine Maschine zu konstruieren, die in der Lage ist, Fasern und dünne Mikroschnitte, aber auch dickere Mikroproben unter dem Objektiv eines Mikroskopes mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit mechanisch zu zerreißen. Im Rahmen dieser Arbeit wird vor allem der Aufbau und die Funktionsweise dieser neuen Mikrozerreißmaschine erörtert.

Im zweiten Teil der Arbeit werden einige Versuche beschrieben, welche das Ziel haben, geeignete Methoden für weitere systematische Arbeiten mit der Mikrozerreißmaschine zu ermitteln. Es wurde vor allem die Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Probendicke und vom Jahrringbau untersucht und die Ermittlung der Dehnungen und des Bruchgeschehens in allen möglichen Hauptbelastungsrichtungen an Fichtenproben (*Picea abies* L.) vorgenommen. Der Einfluß der Probenform auf die Zugfestigkeit bleibt weiterhin eine offene Frage. Es wurde dagegen festgestellt, daß die Breite der mittleren Probenzone, der Holzart und dem Jahrringbau entsprechend, von Belastungsrichtung zu Belastungsrichtung individuell gewählt werden soll. Vor allem in den  $Q_t$ - und  $R_t$ -Richtungen ist die Zugfestigkeit stark von der Probenbreite abhängig. In den  $T_r$ - und  $T_t$ -Belastungsrichtungen ist die Lage der Mikroprobenkörper innerhalb des Jahrringes sehr für die Größe der Dehnungen und Bruchspannungen maßgebend. Um die Resultate richtig deuten zu können, muß deshalb die Lage der Proben bei diesen Belastungsrichtungen genau definiert werden. Nur so ist es möglich, Festigkeitswerte in den  $R_t$ - und  $T_t$ -Richtungen miteinander vergleichen zu können. Um die Abhängigkeit der Zugbeanspruchungen von der Probendicke feststellen zu können, wurden entsprechende Versuche in der  $Q_t$ - und  $Q_r$ -Richtung unternommen. Es ist anzunehmen, daß die maximalen Zugfestigkeitswerte in allen Schnittrichtungen durch die Dimensionen der tragenden Holzzellen bestimmt werden. Es ist deshalb zu erwarten, daß die minimalen Probendicken, welche für die Ermittlung maximaler  $\sigma_{zB}$ -Werte notwendig sind, von Holzart zu Holzart und von Belastungsrichtung zu Belastungsrichtung unterschiedliche Größen aufweisen. Diesbezüglich müssen noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Man darf dabei die durch das Mikrotomieren bedingten Störungen, welche vor allem bei den dünnen Schnitten auftreten können, nicht außer acht lassen.

Das Anschneiden von Zellwänden bei dünnen Proben setzt die Festigkeitswerte des Gewebes ohnehin stark herab.

Obschon das Schwergewicht der Untersuchung bei diesen 10 ... 30  $\mu\text{m}$  dicken Proben auf mikroskopischen Beobachtungen liegt, die eine Analyse der Wirkungen verschiedener Zellwandmodifikationen auf die mechanischen und rheologischen Eigenschaften der Holzsubstanz ermöglichen, wird die quantitative Ermittlung von Festigkeit und Dehnung als Vergleichsbasis auch bei diesen Schnitten nicht vernachlässigt. Man ist sich dabei klar, daß die ermittelten Spannungs- und Dehnungswerte von dünnen Mikroschnitten nicht auf Makroproben übertragen werden können, sondern nur als Vergleichswerte im selben Dickenbereich zu betrachten sind. Trotzdem mißt man den Zugversuchen an dünnen Mikroschnitten große methodische Bedeutung bei, da sie Möglichkeiten zur Feststellung der Wirksamkeit holzvergütender Modifikationen eröffnen.

#### Vorversuche zur Anwendbarkeit der Versuchseinrichtung in qualitativer Hinsicht

Die vorliegenden Experimente sollen die Anwendbarkeit der Mikrozerreißmaschine zur Messung von Zugfestigkeiten und Verformungsmerkmalen darlegen. Es hat sich bei der Bearbeitung erwiesen, daß die damit verbundenen methodischen Fragen noch einer weiteren Klärung bedürfen, um das gesteckte Ziel in der notwendigen Reproduzierbarkeit zu erreichen.

#### Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Probendicke

Wenn die Zug-Bruchspannungen ( $\sigma_{zB}$ ) makroskopischer Holzproben von der Probengröße abhängen, ist eben-

falls zu erwarten, daß eine Abhängigkeit zwischen diesen beiden Faktoren im Mikroschnittbereich vorliegt. Diese Frage wird an 28, 35, 40, 45, 50, 80 und 110  $\mu\text{m}$  dicken, quer-tangentialen ( $Q_t$ ) Splint- und Kernschnitten erörtert. Dabei ist die eine Hälfte der Proben aus dem mittleren Abschnitt des Frühholzes, die andere aus dem Spätholz ausgestanzt worden. Die Ergebnisse dieser Meßreihe sind in Bild 4 dargestellt.

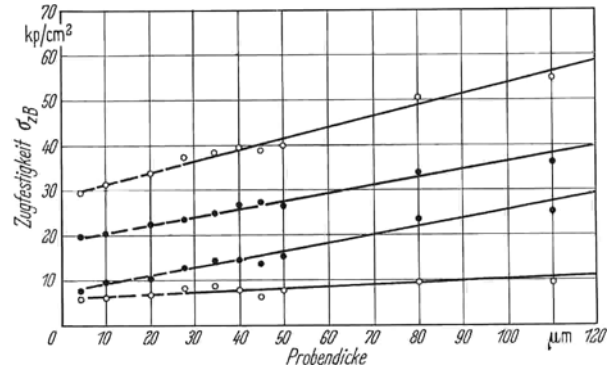


Bild 4. Abhängigkeit der Zug-Bruchspannungen von der Probendicke bei quer-tangentialen Spätholz- ( $SH$ ) und Frühholzproben ( $FH$ ).

1  $Q_t - SH_K$ , 2  $Q_t - SH_S$ , 3  $Q_t - FH_S$ ,  
 4  $Q_t - FH_K$ .

Das Diagramm zeigt eine steigende Tendenz der Zug-Bruchspannungen in Funktion der Probendicke, wobei die einzelnen Kurven einen unterschiedlichen Verlauf nehmen. Die Größe der Zug-Bruchspannungen hängt davon ab, welchen Stellen im Stammquerschnitt die Proben entnommen wurden. Die höhere Festigkeit der Spätholzzonen ( $SH$ ) gegenüber Frühholz ( $FH$ ) ist deutlich. Der Anteil des Frühholzes in den breiten Kernholzjahrringen ( $K$ ) ist größer als in den engeren Jahrringen des Splints ( $S$ ). Die auf 2 mm Breite ausgestanzten Proben im Kern-Frühholz ( $FH_K$ ) bestehen ausschließlich aus weitlumigen Frühholztracheiden, welche kleinere Festigkeit und größere Dehnung aufweisen als die dickwandigen und englumigen Spätholztracheiden. Die aus den Splint-Frühholzzonen ausgeschnittenen Proben besitzen dagegen immer auch einen kleinen Anteil Spätholzzellen. Um festzustellen, wo die steigende Tendenz der Festigkeitskurven aufhört, müssen dickere Proben als 110  $\mu\text{m}$  geprüft werden. Aus dieser Überlegung hat man bei den quer-radialen ( $Q_r$ ) im Splint- und im Kernholz die Probendicke von 28  $\mu\text{m}$  bis 250  $\mu\text{m}$  herangezogen (Bild 5). In diesem Diagramm ist die Festigung interessant, daß die  $\sigma_{zB}$ -Kurven bei rd. 160 ... 170  $\mu\text{m}$  Probendicke kulminieren. Der Kurvenabschnitt unterhalb von 28  $\mu\text{m}$  Probendicke ist mit Hilfe des Zugkraftdiagrammes durch Extrapolation ermittelt worden. Der Verlauf des Kurvenabschnittes unterhalb des Kulminationspunktes hängt wahrscheinlich mit der Herstellung von Mikroschnitten zusammen, indem sich die durch das Mikrotomieren bedingten Störungen um so mehr bemerkbar machen, je dünner die

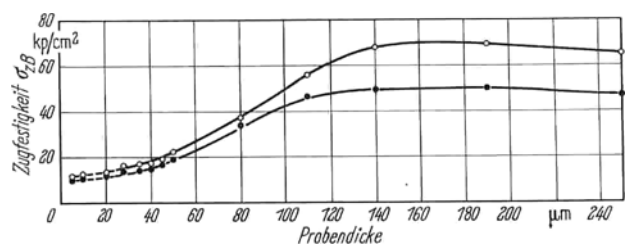


Bild 5. Abhängigkeit der Zug-Bruchspannungen von der Probendicke bei quer-radialen Splint- ( $S$ ) und Kernholzproben ( $K$ ). 1  $Q_r - S$ ; 2  $Q_r - K$ .

Schnitte sind. Die Reibungen an der Maschine, welche in diesem Bereich noch stören könnten, sind praktisch null.

Der Einfluß der Schnittdicke auf die Festigkeit ist in beiden Belastungsrichtungen  $Q_t$  und  $Q_r$  untersucht worden, mit spezieller Berücksichtigung der Versuche in der  $Q_r$ -Richtung. Der Verlauf der  $\sigma_{zB}$ -Kurve in Bild 5 kann kaum allein mit dem Dimensionsverhältnis zwischen Durchmesser und Länge der Tracheidenabschnitte erklärt werden. Abgesehen von mikroskopischen und submikroskopischen Fehlstellen ist die Zug-Bruchspannung von der Röhrenlänge theoretisch unabhängig. Obschon die Zahl der nicht durchschnittenen Überlappungen der Tracheidenspitzen bei den dickeren Schnitten häufiger ist, scheint die Kurvenkulmination eher mit den längs angeschnittenen Markstrahlen (MS) in Zusammenhang zu stehen. Anlaß zu dieser Annahme bietet die Tatsache, daß erstens die durchschnittliche Markstrahlhöhe ebenfalls bei rd. 160 ... 170  $\mu\text{m}$  liegt, ferner zeigen die mikroskopischen Beobachtungen, daß die Festigkeit in der Querbelastrungsrichtung in erster Linie durch die längsgezogenen Markstrahlzellen bestimmt wird (Bilder 13 und 14). Es ist anzunehmen, daß die Kulmination der  $\sigma_{zB}$ -Kurven in Funktion der Proben-dicke in allen Schnittrichtungen durch die Dimension der tragenden Holzelemente bestimmt wird. Die Betrachtungen über die Holzstruktur in Zusammenhang mit Druckfestigkeitsuntersuchungen von Makroproben haben H. Kühne [1962] auf ähnliche Folgerungen gebracht, wenn er feststellt, daß das Tragsystem, welches die Kräfte aufnehmen muß, grundsätzlich verschieden sei, je nachdem, ob die Kräfte, längs, radial oder tangential wirken. Es wird somit eine interessante Aufgabe sein, die Zusammenhänge zwischen Probendicke und Zugspannungen in allen Belastungsrichtungen zu ermitteln und mit den mikroskopischen Beobachtungen zu vergleichen.

*Abhängigkeit der  $\sigma_{zB}$ -Werte vom Jahrringbau*

Über Festigkeitsunterschiede zwischen Frühholz und Spätholz findet man in der Literatur viele Angaben. Diesbezüglich bringen vor allem zahlreiche Untersuchungen an Einzelfasern, die hier nicht behandelt werden, klare Ergebnisse. Aber auch Zugversuche an Mikroschnitten [Ifju, Kennedy 1962] ergaben für Spätholz wesentlich höhere Festigkeitswerte als für Frühholz, besonders wenn die Festigkeit auf den Zellwandquerschnitt bezogen wurde anstatt auf den Gesamtquerschnitt. In eigenen Untersuchungen (Bild 4) konnten nun ebenfalls deutlich höhere Festigkeiten des Spätholzes ermittelt werden. Schließlich sind in Bild 5 die Festigkeitsunterschiede zwischen Splint und Kern auf Unterschiede zwischen Früh- und Spätholz zurückzuführen. Die höheren  $\sigma_{zB}$ -Werte des Splintholzes sind auf dessen kleineren Frühholzanteil zurückzuführen. Wie noch weiter unten anhand von Mikroaufnahmen gezeigt werden kann, erfolgt der Riß bei Bruchbelastung in den meisten Fällen in den leichteren Frühholzzonen. Festigkeitsunterschiede zwischen Spätholz und Frühholz kommen am schönsten in Bild 6 zum Ausdruck an der allmählichen Zunahme der  $\sigma_{zB}$ -Werte gegen das Spätholz hin und dem sprunghaften Übergang der Festigkeit vom Spät- ins Frühholz.

*Ermittlung der Dehnung an Mikroprobenkörpern von 20  $\mu\text{m}$  Dicke*

Die Bedeutung der Holzstruktur und der Orientierung der Holzgewebe für die Holzfestigkeit wird klar ersichtlich, wenn man die in allen geprüften Schnittrichtungen gemessenen mittleren Kraftdehnungswerte miteinander vergleicht. Bild 7 stellt die großen Unterschiede der Kraft-

dehnungs-Relationen dar. Dabei zeigt sich, daß die Zugkräfte in den Längsrichtungen und vor allem in den Spätholzzonen (Kurven 1 und 2) wesentlich größer sind als in den Querrichtungen. Der große Unterschied zwischen den radialen und den tangentialen Längsrichtungen scheint im ersten Augenblick unverständlich zu sein. Als Erklärung diene der Hinweis, daß es sich hier um Mittelwerte und nicht um Spitzenwerte handelt. Aus Bild 6 ist zu entnehmen, wie sich die Zugspannungen in der tangentialen

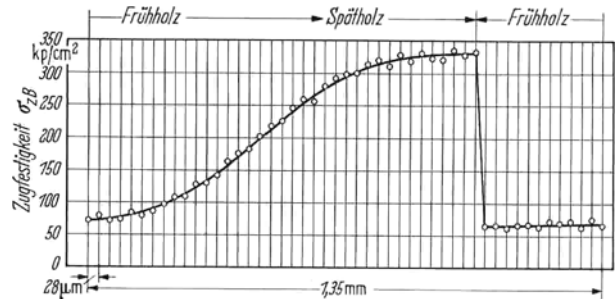


Bild 6. Veränderung der Zug-Bruchspannungen aufeinanderfolgender 28  $\mu\text{m}$  dicker Fichtenproben in Früh- und Spätholz. Belastungsrichtung:  $T_t$ .

Längsrichtung in verschiedenen Jahrringzonen verändern. Maximale Zugkräfte in der tangentialen Längsrichtung im Spätholz ergeben meistens Proben, die in der Nähe von Jahrringgrenzen ausgeschnitten werden. Sie zeigen in der Regel höhere Werte als die Radial-Längs-Proben. Bei den letzteren spielt wiederum die Jahrringbreite und dementsprechend der Spätholzanteil im Probenquerschnitt eine große Rolle.

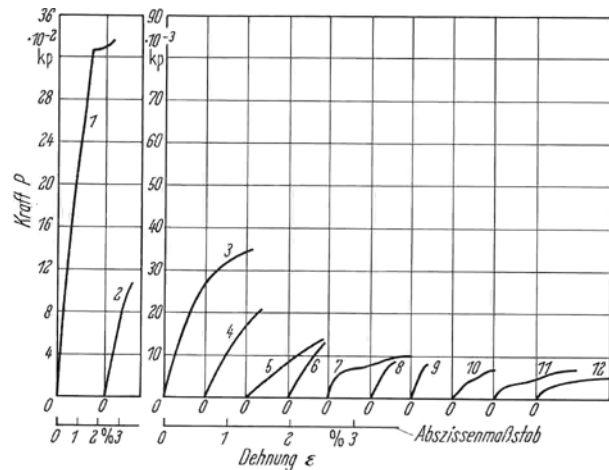


Bild 7. Kraft-Dehnungsdiagramme 28  $\mu\text{m}$  dicker Proben.  
 1  $R_t - S$       4  $Q_t - SH_K$       7  $T_t - SH_s$       10  $Q_t - FH_s$   
 2  $T_t - SH_s$       5  $R_r - S$       8  $Q_r - S$       11  $T_t - FH_s$   
 3  $T_t - FH_s$       6  $Q_t - SH_s$       9  $Q_r - K$       12  $Q_t - FH_K$

Der unterschiedliche Verlauf der einzelnen Kurven ist sehr augenfällig. Das starke Auseinandergleiten des Holzgefüges in der  $T_t$ - und  $Q_r$ -Richtung erklärt, warum die E-Moduli bei diesen Proben nicht ermittelt werden konnten.

Der Zusammenhang zwischen Kraft und Dehnung ist in Bild 8 noch anschaulicher dargestellt als in Bild 7. Die Mittelwerte der Bruch-Zugkräfte ( $P_{zB}$ ), der Bruchdehnung ( $\epsilon$ ) und der Bruchdehnungszahlen ( $\alpha$ ) werden hier direkt nebeneinander gesetzt. Die Reihenfolge der Proben ist nach den Größen der Zugkräfte bei Bruch gewählt worden, ähnlich wie in Bild 7. Der innere Zusammenhang zwischen den Werten kann wie folgt dargestellt werden:

Zug-Bruchkraft, Bruchdehnung und Bruchdehnungszahl sind bei einer gewissen Probendicke von drei Faktoren

stark abhängig: von der Richtung der Tracheiden, von der Richtung der Markstrahlen und vom Früh- und Spätholzanteil in den Proben.

Die Bruchdehnungszahlen ( $\alpha$ ) sind im Spätholz parallel zur Faser in den radialen und tangentialen Längsrichtungen am kleinsten, obwohl die absoluten Bruchdehnungen ( $\epsilon$ ) in diesen Richtungen die größten Werte aufweisen (siehe Säulengruppen 1 und 2). Das Kraft-Dehnungsdiagramm in Bild 7 zeigt, daß die Proben in

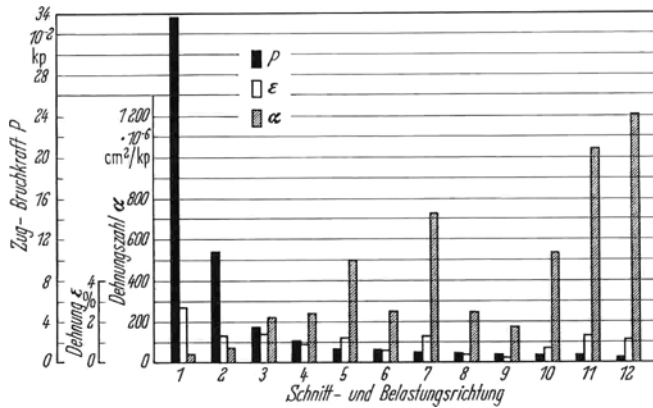


Bild 8. Verteilung der Zug-Bruchkräfte ( $P$ ), Bruchdehnungen ( $\epsilon$ ) und Bruchdehnungszahlen ( $\alpha$ ) 28  $\mu$ m dicker Fichtenproben.

- |                |                |                |                 |
|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 1 $R_l - S$    | 4 $Q_t - SH_K$ | 7 $T_l - SH_S$ | 10 $Q_r - FH_S$ |
| 2 $T_l - SH_S$ | 5 $R_r - S$    | 8 $Q_r - S$    | 11 $T_l - FH_S$ |
| 3 $T_l - FH_S$ | 6 $Q_t - SH_S$ | 9 $Q_r - K$    | 12 $Q_t - FH_K$ |

diesen zwei Belastungsrichtungen einen elastischen Bereich besitzen und der Bruch verhältnismäßig unvermittelt eintritt.

In der tangentialen Längsrichtung im Frühholz (Säulengruppe 3) hat die Dehnungszahl im Vergleich zum Spätholz sehr stark zugenommen (Säulengruppe 2). Das entsprechende Kraftdehnungsdiagramm (Bild 7, Kurve 3) zeigt, daß das Holzgefüge im Frühholz während der Belastung viel stärker auseinandergleitet, als im Spätholz (Bild 7, Kurve 2). Der Bruch erfolgt trotzdem plötzlich.

Die Bruchdehnungszahlen ( $\alpha$ ) sind, mit Ausnahme der radialen Schnitte, am größten bei den Schnitttrichtungen, in welchen die Tracheiden und die Markstrahlen gleichzeitig quer belastet werden, d. h. bei den  $Q_r$ - und  $T_r$ -Richtungen (Säulengruppen 12, 11, 10 und 7). Hier finden sich ebenfalls in den Frühholzzonen die Spitzen. Wie die entsprechenden Kraft-Dehnungsdiagramme zeigen, sind diese Schnitte nicht elastisch, sie zeigen auch bei kleinen Belastungen plastische Verformungen, sie fließen. Der Bruch erfolgt allmählich.

Das Kraftdehnungsdiagramm in der  $R_r$ -Richtung (Bild 7, Kurve 5) zeigt einen abweichenden, beinahe geraden Verlauf. Die Bruchdehnung ( $\epsilon$ ) und Bruchdehnungszahl ( $\alpha$ ) sind in diesem Falle groß, obschon nur die Tracheiden, nicht aber die Markstrahlen quer belastet werden. Die scheinbare Ausnahme läßt sich dadurch erklären, daß die Schnitttrichtungen mit den Markstrahlrichtungen nicht immer völlig übereinstimmen. Bei dieser Schnitttrichtung sind alle Ergebnisse von den Längen der Markstrahlbänder in den Proben abhängig. Lange Markstrahlzonen vermindern sofort beträchtlich die  $\epsilon$ - und  $\alpha$ -Werte und erhöhen die Zugfestigkeiten.

#### Mikroskopische Untersuchung der Rißbildung von Mikroprobekörpern verschiedener Dicke

Viele bisher im Zusammenhang mit den Belastungskurven abgegebene Erklärungen sind den mikroskopischen Beobachtungen zu danken. Weitere Folgerungen aus den Beobachtungen werden in diesem Kapitel angeführt.

Dabei sollen die sechs Belastungsrichtungen in den drei Schnitttrichtungen einzeln behandelt werden:

#### Quer|tangential ( $Q_t$ )

Die in der Mitte der Proben ausgestanzten Spätholzproben des Kerns sind schmaler als 2 mm. Kern-Spätholzproben enthalten deshalb immer einen Anteil Frühholz. Weil die Dehnung des Spätholzes kleiner ist als diejenige des Frühholzes, beginnt der Riß regelmäßig im Spätholz, und zwar in den breiteren Markstrahlen. Der Riß folgt dann durch die ganze Breite der Probe demselben Markstrahl. Im Kern-Frühholz erfolgt der Bruch anders. Hier sind die Frühholzzonen breit genug, daß man die Mittelzone der Proben aus reinem Frühholz formen kann. Der Riß entsteht bei den dickeren Mikroschnitten fast ausschließlich im Tracheidengewebe, und zwar reißen, wie Bild 9 zeigt, die Wände der Tracheiden durch. Es kommt namentlich bei dünneren Mikroschnitten vor, daß der Bruch sich dem breiteren Markstrahl entlang zieht (Bild 10). Im Splintholz sind die Jahrringe schmaler, manche Spätholzproben aber breit genug, daß sich die kritischen, 2 mm breiten Mittelzonen aus reinem Spätholz ausstanzen lassen. Interessanterweise erfolgt der Riß zu etwa 90% in den Mittellamellen der Tracheiden (Bild 11) und nicht den Markstrahlen entlang. In der Nähe des Frühholzes werden auch hier einige Tracheidenwände gebrochen.

Die Frühholzzonen im Splintholz sind schmaler als 2 mm. Aus diesen Zonen gewonnene Proben enthalten deshalb immer einen Teil Spätholz, wie Bild 12 zeigt. Die Spannungen während der Belastung werden zuerst vom Spätholz aufgenommen. Der Riß beginnt demzufolge immer im Spätholz. Im Frühholz zerreißen die Tracheidenwände und, mit zunehmender Wanddicke in der Zuwachszone, die Mittellamellen (Bild 12).

#### Quer|radial ( $Q_r$ )

Die Bilder 13 und 14 zeigen 110  $\mu$ m dicke Querschnitte aus dem marknahen Kernholz, welche in radialer Richtung belastet werden. Die Markstrahlen sind in diesem Falle längs gezogen. Erst nach 108 g Belastung sieht man die Rißbildung in einem breiten Markstrahl (Bild 13, Pfeil); bei 109 g Belastung erfolgt der Bruch über den ganzen Querschnitt, und zwar vollständig im Frühholz (Bild 14). Aus Bild 14 wird sodann ersichtlich, daß die Tracheidenwände brechen.

Die Bilder 15 und 16 zeigen Splintholzabschnitte von 20  $\mu$ m dicken Proben, unbelastet und nach dem Bruch. Die Bruchbelastung beträgt 15 g. Zellwände, Tüpfel, selbst Mittellamellen werden zerrissen. Hier und da sieht man auch, daß die Zellwände in einzelne Fibrillenbündel ausfransen.

#### Radial|längs ( $R_l$ )

Für die weiteren Schnitttrichtungen wird nur kambiumnahes Holz verwendet. Bild 17 zeigt eine 20  $\mu$ m dicke, radial geschnittene und parallel zur Tracheidenachse eingespannte Probe in unbelastetem Zustand. Bild 18 ist zu entnehmen, daß der Riß im Spätholz unter 240 g Belastung in einem Markstrahl beginnt und sich anfänglich diesem Markstrahl entlang in das Frühholz hinein fortsetzt. Im Frühholz tritt der Riß aus dem Markstrahl, geht durch das Tracheidengewebe und durchquert sogar die im Wege stehenden Markstrahlen (Bild 19). Im benachbarten Spätholz verläuft der Riß wieder entlang eines Markstrahles. In den Bildern 20 und 21 ist der Riß in zwei aufeinanderfolgenden Zonen 140fach vergrößert dargestellt. Es kommt, vermutlich dank der Zirkularanordnung der Fibrillen, nur selten vor, daß Hoftüpfel beschädigt werden. Bild 21 zeigt

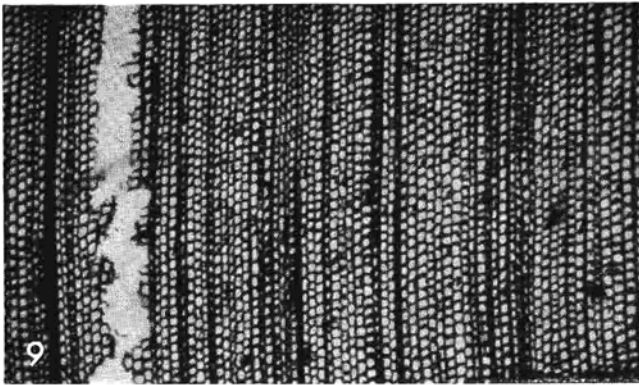


Bild 9.  $Q_r - FH_K$ : Probendicke  $110 \mu\text{m}$ ; der Riß entsteht fast ausschließlich im Tracheidengewebe. Vergr. 25 : 1.

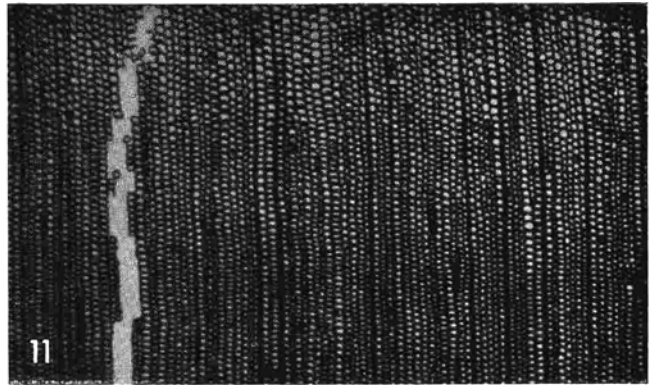


Bild 11.  $Q_r - SH_s$ : Probendicke  $28 \mu\text{m}$ ; Riß sogar bei dünnen Proben in den Mittellamellen der Tracheiden. Vergr. 25 : 1.

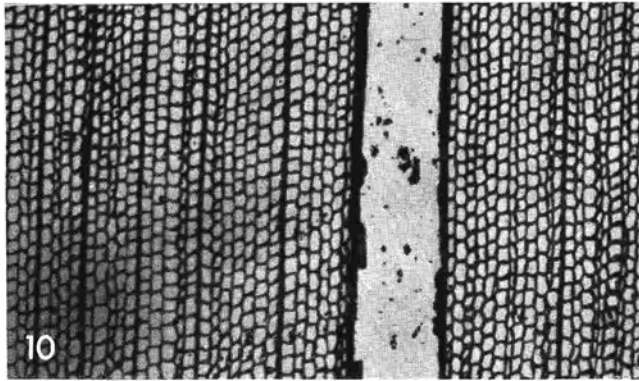


Bild 10.  $Q_r - FH_K$ : Probendicke  $35 \mu\text{m}$ ; Bruch am breiten Markstrahl entlang. Vergr. 45 : 1.

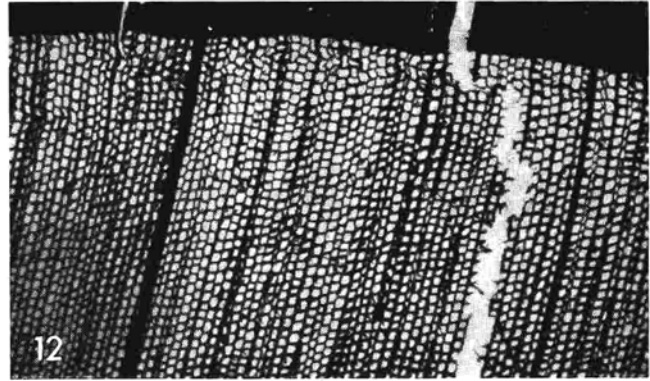


Bild 12.  $Q_r - FH_s$ : Probendicke  $110 \mu\text{m}$ ; Frhholzzone ist schmalere als die 2 mm-Probenbreite. Im Spätholz reißen die Mittellamellen, im Frühholz die Tracheidenwände. Vergr. 25 : 1.

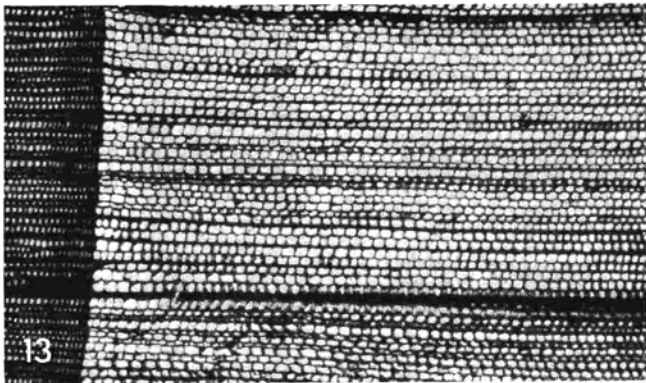


Bild 13.  $Q_r - K$ : Probendicke  $110 \mu\text{m}$ ; Rißbeginn in einem Markstrahl erst nach 108 g Belastung (Pfeil). Vergr. 25 : 1.

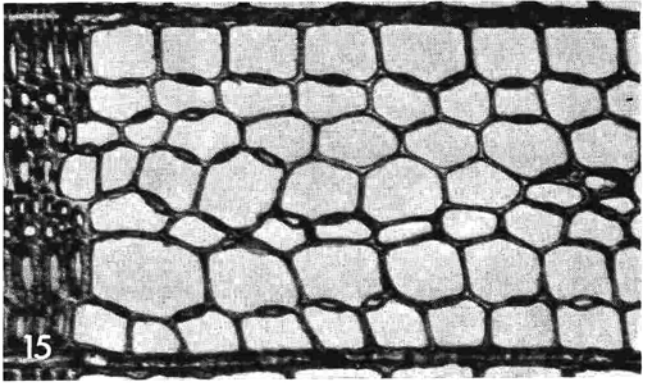


Bild 15.  $Q_r - S$ : Probendicke  $20 \mu\text{m}$ ; die Probe ist unbelastet. Vergr. 200 : 1.

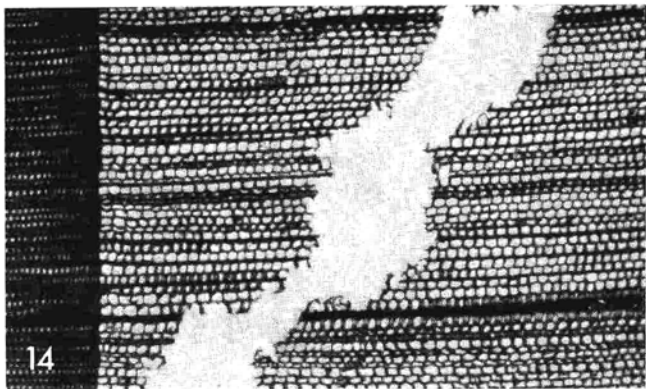


Bild 14. Mikroaufnahme derselben Probe wie Bild 13. Bei 109 g Belastung reißen plötzlich die Tracheidenwände im Frühholz. Vergr. 25 : 1.

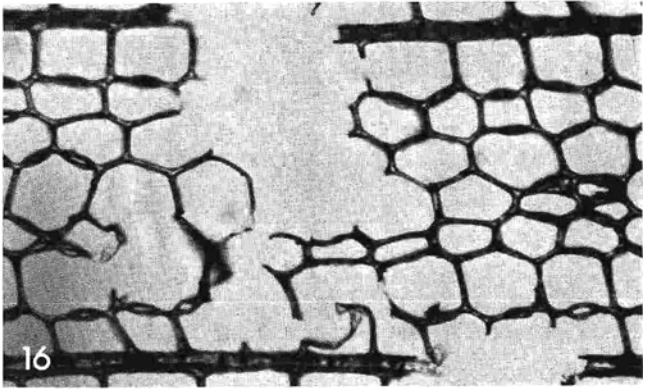


Bild 16. Dieselbe Probe wie Bild 15. Bruchbelastung = 15 g. Zellwände, Tüpfel und Mittellamellen sind zerrissen. Manche Zellwände in einzelne Fibrillenbündel ausgefranst. Vergr. 200 : 1.

deutlich, daß diese Feinstrukturen nach dem Bruch in der Regel intakt bleiben und ohne Zweifel zur Festigkeit der radialen Wände von Tracheiden beitragen.

*Radial|radial (R<sub>r</sub>)*

Wenn ein radialer Mikroschnitt in radialer Richtung belastet wird, erfolgt der Bruch gewöhnlich im Frühholz. Bild 22 zeigt im Spätholz einen längsgeschnittenen Harzkanal, welcher den Querschnitt der Probe an dieser Stelle sehr abschwächt. Der Bruch erfolgte trotzdem an einer anderen Stelle im Frühholz. Interessant ist die Rolle der Markstrahlen bei Belastung in der R<sub>r</sub>-Richtung: Ihre Festigkeit in der Längsrichtung ist nämlich deutlich größer als die Querfestigkeit der Tracheiden. In Bild 23 wird das Tracheidengefüge sichtlich durch die Markstrahlen zusammengehalten. Diese Erscheinung ist unabhängig von der Dicke der Proben. Die Länge der Markstrahlbänder ist hingegen der Festigkeit der radial belasteten Radialschnitte direkt proportional. Wenn die Schnittrichtung mit der Markstrahlrichtung genau übereinstimmt und die längsgeschnittenen Markstrahlbänder die ganze Frühholzzone durchqueren, erfolgt der Riß interessanterweise im Spätholz, dort, wo die Markstrahlzone aufhört. Die Längzugfestigkeit der Markstrahlen ist also größer als die Querszugfestigkeit der durchschnittenen Längstracheiden oder die Mittellamelle zwischen den intakten Längstracheiden.

*Tangential|längs (T<sub>l</sub>)*

Die Zugfestigkeit dieses Zellgefüges wird durch die längs orientierten Tracheiden positiv und durch die quergezogenen Markstrahlen negativ beeinflusst. Die positive Wirkung der Tracheiden kommt vor allem in den dichten Spätholz zonen deutlich zum Ausdruck (Bild 24). Die Bilder 25 und 26 zeigen einen breiten Markstrahl mit Harzkanal. Bei dieser 140fachen Vergrößerung sieht man deutlich, wie stark die Markstrahlzellen im Rißfeld beschädigt werden. Der Riß verzweigt sich im Frühholz öfter (Bild 27) als im Spätholz. Auch gleitet das Gefüge im Frühholz stärker auseinander.

*Tangential|tangential (T<sub>t</sub>)*

Wird das tangentielle Gefüge quer belastet, so ergeben sich sehr niedrige Festigkeitswerte. Das gilt sowohl für Frühholz wie für Spätholz (Bilder 28 und 29). Das Gefüge gleitet vor allem im Frühholz (Bild 29) stark auseinander. Der Bruch weicht den Markstrahlen aus. Selbst breite Markstrahlen mit Harzkanälen werden von den Rissen selten erfaßt. Die Querszugfestigkeit der Mittellamellen und der durchschnittenen Tracheidenwände ist kleiner als jene der quer gezogenen Markstrahlen.

*Diskussion*

Die meisten Zusammenhänge der registrierten und berechneten Parameter werden erst durch die mikroskopischen Beobachtungen des Verformungs- und Bruchgeschehens deutlich. Wie schon festgestellt wurde, ist bei der Prüfung von einzelnen Gewebeabschnitten von größter

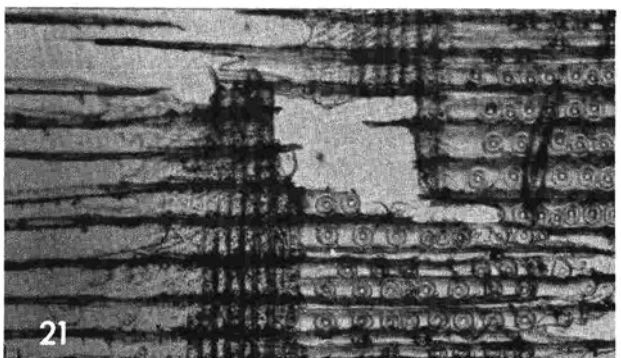
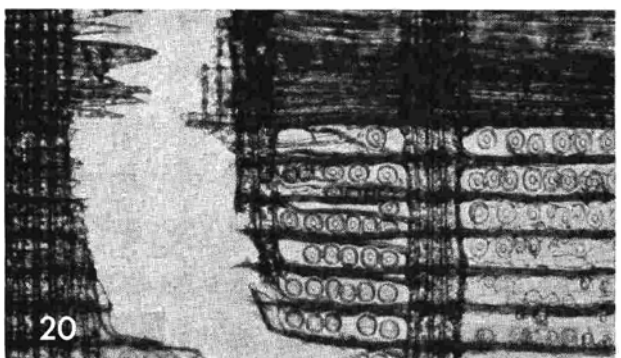
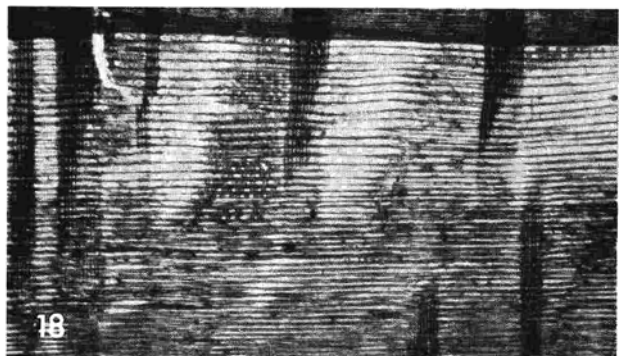
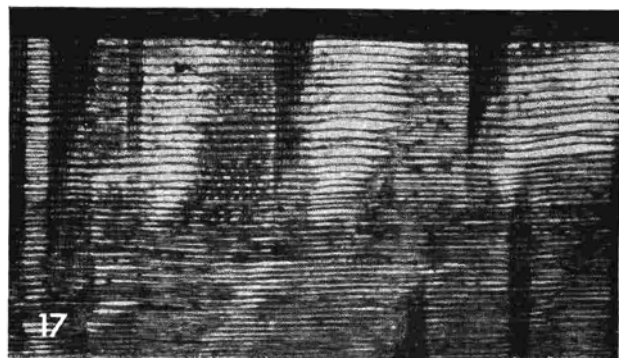


Bild 17. R<sub>l</sub> — S: Probendicke 20 µm, unbelastet. Vergr. 25 : 1.

Bild 18. Dieselbe Probe wie Bild 17. Rißbeginn im Spätholz unter 240 g Belastung. Vergr. 25 : 1.

Bild 19. Dieselbe Probe wie Bild 17. Unter 292 g erfolgt der Riß im ganzen Querschnitt. Vergr. 25 : 1.

Bild 20. Dieselbe Probe wie Bild 17. Rißbeginn. Vergr. 140 : 1.

Bild 21. Dieselbe Probe wie Bild 17. Rißbild im Frühholz mit intakt gebliebenen Hofftöpfeln; Vergr. 140 : 1.



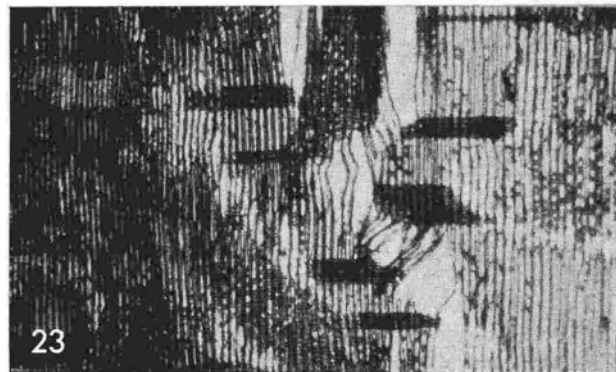
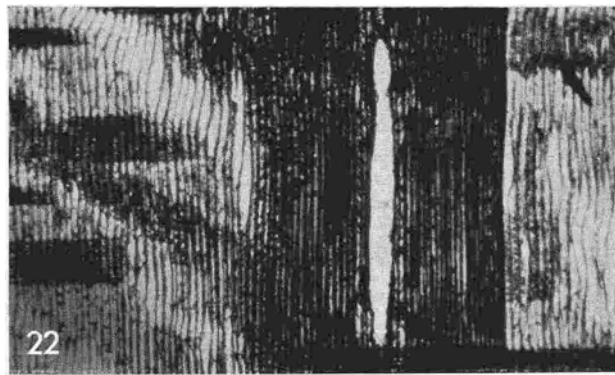


Bild 22.  $R_T - S$ : Probendicke  $20\ \mu\text{m}$ , unbelastet. Ein Harzkanal schwächt den Querschnitt ab. Der Riß erfolgt trotzdem nicht an dieser Stelle. Vergr. 25 : 1.

Bild 23. Dieselbe Probe wie Bild 22. Riß unter 14 g Belastung im Frühholz. Das Markstrahlgewebe hält das zerissene Gewebe zusammen. Vergr. 25 : 1.

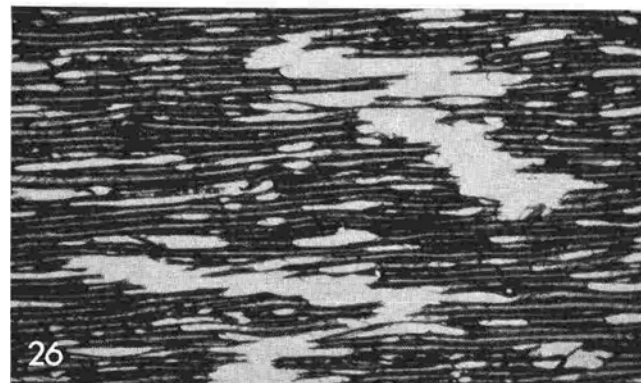
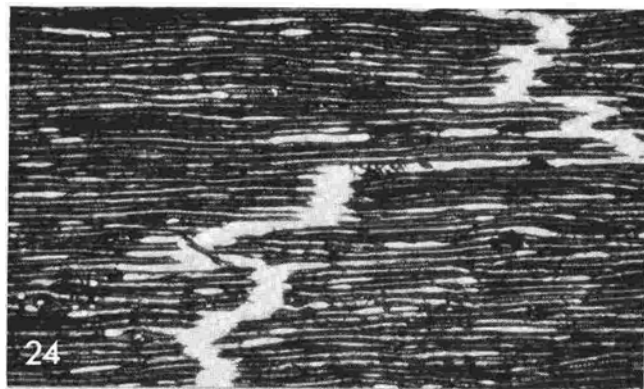


Bild 24.  $T_L - SH_S$ : Probendicke  $20\ \mu\text{m}$ ; unter 80 g Belastung zerrissene Tracheiden und Markstrahl-Zellen. Vergr. 25 : 1.

Bild 26.  $T_L - FH_S$ : Probendicke  $20\ \mu\text{m}$ ; unter 49 g Belastung zerrissene Tracheiden und Markstrahl-Zellen. Sehr stark auseinandergeglittenes Gefüge. Vergr. 25 : 1.

Wichtigkeit, daß die Probendimensionen dem Jahrringbau der geprüften Holzart angepaßt werden. Die Breite von 2 mm unserer Mikroproben hat zum Beispiel zur Folge, daß die  $Q_T - SH$ -Proben auch einen Anteil Frühholz enthalten. Die Ergebnisse in dieser Richtung müssen deshalb für das Spätholz mit Vorbehalt akzeptiert werden. Die Breite der mittleren Zone kann von Holzart zu Holzart verschieden gewählt und den verschiedenen Zonen innerhalb der Jahrringbreiten angepaßt werden. In bestimmten Belastungsrichtungen, wie z. B. in den  $T_T$ - und den  $T_L$ -Richtungen, ist die Probenbreite von der Holzstruktur praktisch unabhängig. Dafür ist die Lage dieser tangentialen Mikroschnitte innerhalb des Jahrringes sehr für die Größe der Dehnungen und Zugspannungen maßgebend. Auf Grund dieser Tatsache sind die tangentialen Mikroschnitte für Jahrringsanalysen geeignet (Bild 6). N. H. Kloot [1951] hat diesbezuglich eindrucksvolle Untersuchungen durchgeführt und die Kurven der Spannungsveränderungen durch Projektion auf die Querschnittsbilder der Jahrringe sehr anschaulich dargestellt. Dazu ist noch zu sagen, daß die maximalen  $T_L$ -Zugspannungen in den Sptholzonen bei ein und derselben Holzart von Jahrring zu Jahrring beträchtlich schwanken. Die bisherigen Untersuchungen weisen aber darauf hin, daß ein Zusammenhang zwischen den Jahrringbreiten und den maximalen  $T_L$ -Zugspannungen besteht. Das ist sicherlich auch der Fall in der  $T_L$ -Belastungsrichtung, wo zusätzlich noch der Markstrahlanteil mitwirkt (Bild 29).

Die Rolle der Markstrahlen ist übrigens ein Problem für sich. Reine Markstrahlgewebe zu prüfen ist sehr schwierig. Wir haben uns bis jetzt damit begnügt, das Verhalten der Fichtenmarkstrahlen als eines Teils des gesamten Zellverbandes in allen möglichen Belastungsrichtungen zu

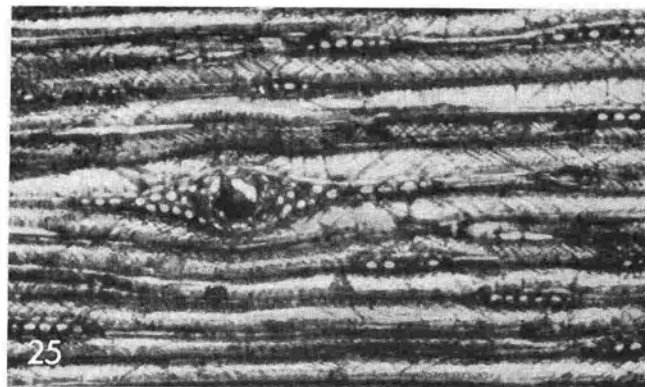


Bild 25.  $T_L - SH_S$ : Probendicke  $20\ \mu\text{m}$ ; breite Markstrahlen mit Harzkanal in unbelastetem Zustand. Vergr. 140 : 1.

Bild 27. Dieselbe Probe wie Bild 25. Vergrößertes Ribild mit dem beschädigten Markstrahl. Vergr. 140 : 1.

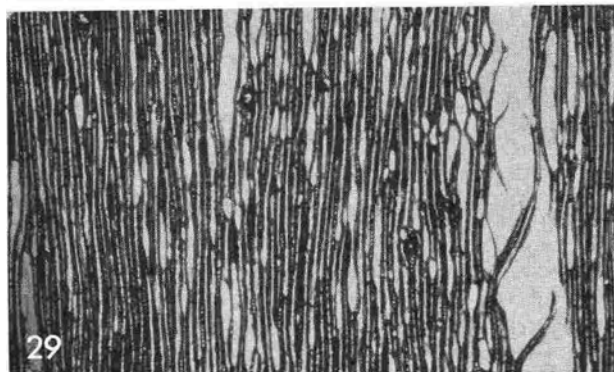
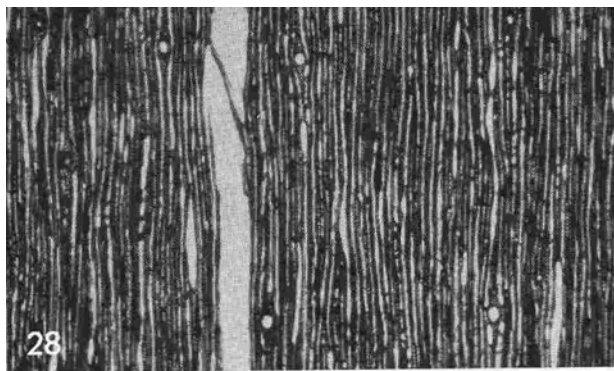


Bild 28.  $T_L - SH_S$ : Probendicke 20  $\mu\text{m}$ ; schon unter 9 g Belastung zerrißt das quer gezogene Tracheidengewebe. Die Markstrahl-Zellen bleiben intakt. Vergr. 25 : 1.

Bild 29.  $T_L - FH_S$ : Probendicke 20  $\mu\text{m}$ ; Bruchbelastung 7 g. Stark auseinandergeslittenes Gewebe. Intakte Markstrahlen wie im Spätholz. Vergr. 25 : 1.

analysieren. Es besteht kein Zweifel darüber, daß die Markstrahlen neben der physiologischen auch eine statische Rolle im Holzgewebe spielen. Sie sind tragende Elemente eben in jenen kritischen Richtungen, in welchen die Querfestigkeit der Tracheiden versagt. Vor allem in den  $Q_T$ - und  $R_T$ -Richtungen sieht man die positive Wirkung dieser Querlemente deutlich. In diesen Richtungen sind sie längs belastet. Aber auch in den schwächsten  $Q_L$ - und  $T_L$ -Richtungen ist eine versteifende Rolle der quer belasteten Markstrahlen zu erkennen, vor allem, wenn sie nicht angeschnitten wurden (Bild 29). Ohne Zweifel setzt die unterschiedliche Schwindung des Markstrahl- und des Grundgewebes [H. H. Bosshard 1956; F. Kollmann 1967] auch die Bedeutung der Markstrahlen für die Holzfestigkeit herab. Man ist versucht, Verfahren zu finden, mittels derer sich gleichzeitig die Holzfestigkeiten erhöhen und die Schwindungsanisotropie des Holzes künstlich verringern lassen. Unter diesem Gesichtspunkt sind auch die hier beschriebene Mikrozerreißmaschine und die mit ihr zusammenhängenden Arbeitsmethoden als Mittel zu betrachten, die Eigenschaften des Holzes als Roh- und Werkstoff dauernd zu verbessern.

### Schrifttum

Ambrohn, H.: Anleitung zur Benutzung des Polarisationsmikroskopes. Leipzig 1892, Zit. bei: Ambrohn-Frey [1926].  
 --, u. A. Frey: Das Polarisationsmikroskop. Leipzig 1926: Akad. Verlagsges.  
 Bosshard, H. H.: Über die Anisotropie der Holzschwindung. Holz Roh-Werkstoff 14 (1956) 285/295.  
 Brown, F. L.: A Tensile Strength Test for Comparative Evaluation of Wood Preservatives. For. Prod. J. 13 (1963) 405/412.  
 Frey-Wyssling, A.: Die mikroskopische Holzstruktur bei technischer Überbeanspruchung. Ber. No. 119 der EMPA. Zürich 1938.

Frey-Wyssling, A. u. K. Mühlethaler: Ultrastructural Plant Cytology, pp. 34/40. New York 1965: Elsevier. Zit. bei R. E. Mark [1967].  
 Fujita, S. u. K. Nakato: Studies on the Drying Check. I. The Behaviour of Shrinkage under Tensile Load. Japan. Wood Res. Soc. 11 (1965) 36/40. Zit. bei: R. E. Mark [1967].  
 Ifju, G.: Tensile Strength Behaviour as a Function of Cellulose in Wood. For. Prod. J. 14 (1964) 366/372.  
 --, u. R. W. Kennedy: Some Variables Affecting Microtensile Strength of Douglas-fir. For. Prod. J. 12 (1962) 213/217.  
 --, R. W. Wellwood u. J. W. Wilson: Improved Microtechniques for Wood Tensile Strength and Related Properties. For. Prod. J. 15 (1965) 13/14.  
 Jayne, B. A.: Some Mechanical Properties of Wood Fibers in Tension. For. Prod. J. 10 (1960) 316/322.  
 Jayme, G., u. D. Fengel: Beobachtungen an Ultradünnschnitten von Fichtenholz. Holz Roh-Werkstoff 19 (1961) 50/55.  
 Kanaya, N., u. T. Yamada: The Deformation of Hinoki Wood by Transverse Tensile Test. Wood Research, Bulletin of the Wood Res. Inst. Kyoto Univ., Japan, No. 41, 1967.  
 Kellog, R. M., u. G. Ifju: Influence of Specific Gravity and certain other Factors on the Tensile Properties of Wood. For. Prod. J. 12 (1962) 463/730.  
 Kennedy, R. W.: Intra-Increment Variation and Heritability of Specific Gravity, Parallel-to-Grain Tensile Strength and Stiffness. TAPPI 49 (1966) 292/296.  
 Klauditz, W.: Zur biologisch-mechanischen Wirkung der Acetylgruppen im Fertigungsgewebe der Laubhölzer. Holzforsch. 11 (1957) 47/55.  
 --: Zur biologisch-mechanischen Wirkung der Cellulose und Hemicellulose im Festigungsgewebe der Laubhölzer. Holzforsch. 11 (1957) 110/116.  
 --: Zum Cellulose- und Zugholzgehalt des Holzes von Pappeln. Holzforsch. 11 (1957) 158/174.  
 Kloot, N. H.: A Micro-testing Technique for Wood. Austral. J. of Appl. Sci. 3 (1952) 125/143.  
 Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Berlin/Göttingen/Heidelberg 1951: Springer.  
 --: Verformung und Bruchgeschehen bei Holz als einem anisotropen, inhomogenen, porigen Festkörper. VDI-Forschungsheft 520. Düsseldorf 1967: VDI-Verlag.  
 Kühne, H.: Zeitabhängige, mechanische Formänderungen poröser, inhomogener Materie, erörtert am Beispiel des Holzes und der Holzwerkstoffe. Materialprüf. 4 (1962) 320.  
 Mark, R. E.: Cell Wall Mechanics of Tracheids. New Haven and London 1967: Yale Univ. Press.  
 Murphey, W. K.: Cell-Wall Crystallinity as a Function of Tensile Strain. For. Prod. J. 13 (1963) 150/155.  
 Ruenger, H. G., u. W. Klauditz: Über Beziehungen zwischen der chemischen Zusammensetzung und den Festigkeits-eigenschaften des Stammholzes von Pappeln. Holzforsch. 7 (1953) 43/59.  
 Salamon, M.: Effects of Drying Severity on Properties of Western Hemlock. For. Prod. J. 16 (1966) 39/46.  
 Schniewind, A. P.: Transverse Anisotropy of Wood: A Function of Gross Anatomic Structure. For. Prod. J. 9 (1959) 350/359.  
 Stone, J. E., u. D. W. Clayton: The Use of Microtome Sections for Measuring the Change in Strength of Spruce Fibers due to Pulping. Zit. bei: R. E. Mark [1967]. Pulp Paper Mg. Can. 60 (1961) T 475/T 484.  
 Takahashi, A., u. T. Yamada: Studies on the Drying Set of Wood. I. Tensile Creep in Relation to the Non-Equilibrium State in the Wood-Water System, Especially the Dependence on Load. J. Japan Wood Res. Soc. 12 (1966). Zit. bei: R. E. Mark [1967].  
 Waechtler, M.: Koll. Beih. 20, 158 (1924). Zit. bei: Ambrohn-Frey [1926].  
 Wardrop, A. B.: Cell Wall Organization and the Properties of the Xylem. I. Cell Wall Organization and the Variation of Breaking Load in Tension of the Xylem in Conifer Stems. Austr. J. Sci. Res. 4 (1951) 391/414. Zit. bei: R. E. Mark.  
 Wellwood, R. W.: Tensile Testing of Small Wood Samples. Pulp Paper Mag. Can. 63 (1962) T 61/T 67. Zit. bei: R. E. Mark [1967].  
 --, G. Ifju u. J. W. Wilson: Intra-Increment Physical Properties of Certain Western Canadian Coniferous Species. In: W. A. Côté Jr.: Cellular Ultrastructure of Woody Plants, pp. 539/549. New York 1965: Syracuse University Press.  
 Ylinen, A.: Über den Einfluß des Spätholzanteils und der Rohdichte auf die Festigkeit und elastischen Eigenschaften des Nadelholzes. Acta Forest. Fenn. 50 (1942) 1/30. Zit. bei: R. E. Mark [1967].