

Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

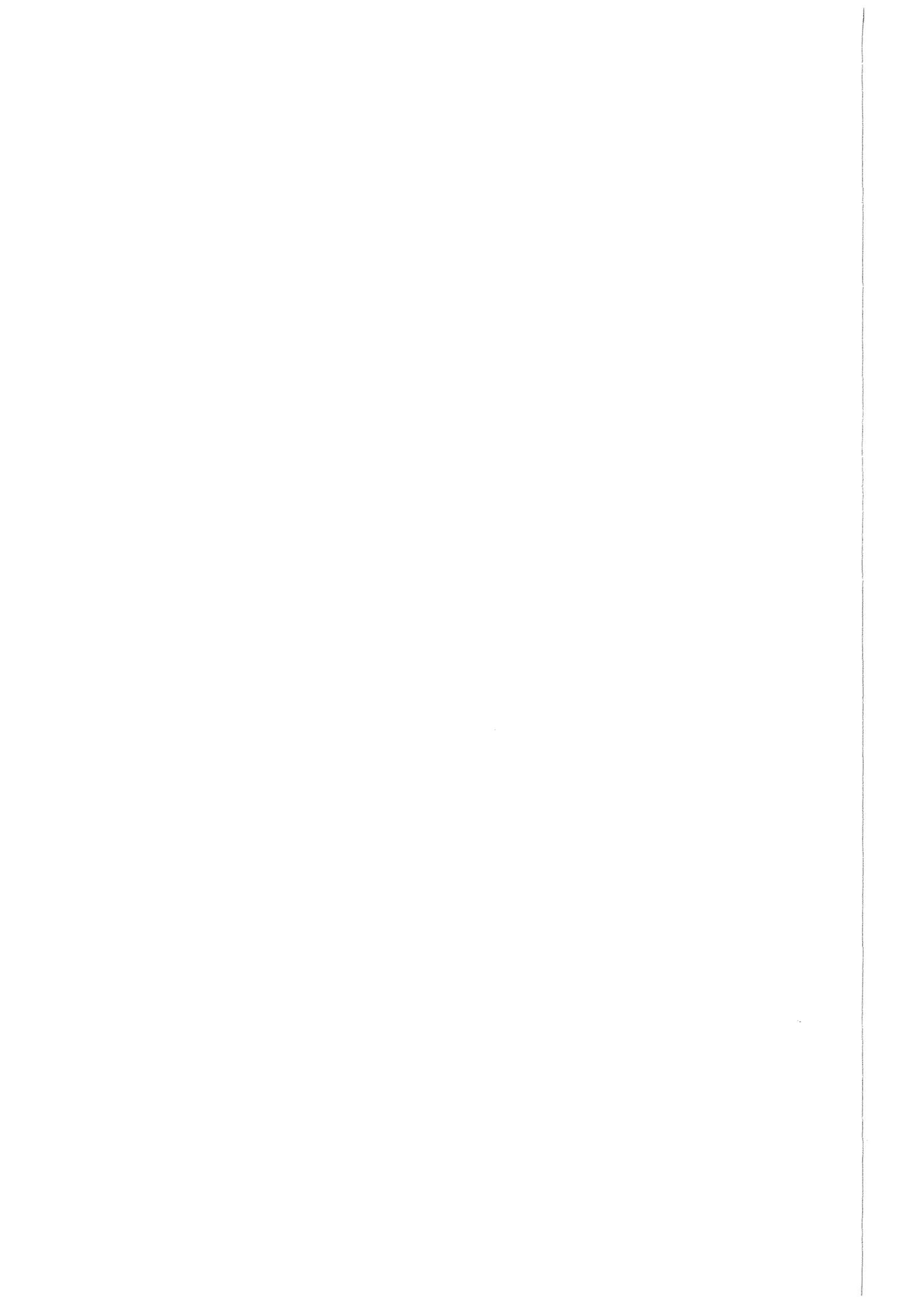
Wissenschaftliche Berichte
FZKA 6157

**Festigkeitsuntersuchungen
an grünen Bäumen mit dem
Fractometer III**

**Beschreibung und
Gebrauchsanweisung**

K. O. Götz, C. Mattheck
Institut für Materialforschung

Februar 1999



Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6157

Festigkeitsuntersuchungen an grünen Bäumen
mit dem Fractometer III

Beschreibung und Gebrauchsanweisung

K. O. Götz, C. Mattheck

Institut für Materialforschung

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
1999

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe
Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)
ISSN 0947-8620

Studies on the Strength of Green Trees Using the Fractometer III

Conventional determination of the strength characteristics of small, clear specimens is mostly accomplished in universal testing machines. For specimen fabrication, the tree has to be felled and cut into pieces. The test method is characterized by a variable size and shape as well as by a variable humidity content of the specimens to be investigated. Furthermore, fixation of the specimen in the holding device, load direction and data evaluation vary depending on the method applied.

Besides conventional determination of the strength with large machines, strength may also be determined by means of the Fractometer III. The Fractometer III has been developed by the "Instrumenta Mechanik Labor GmbH" in cooperation with the Forschungszentrum Karlsruhe. It is applied for measuring the bending, compressive and shear strengths of green wood. In this case, felling of the tree is not required for specimen fabrication.

Festigkeitsuntersuchungen an grünen Bäumen mit dem Fractometer III

Die konventionelle Ermittlung der Festigkeitskenngrößen von kleinen, fehlerfreien Proben erfolgt durchweg an Druckprüfmaschinen. Zur Herstellung der Probe muß bei diesen Prüfverfahren der Baum gefällt und zersägt werden. Unterschiede in diesen Prüfverfahren bestehen in Größe und Form sowie Feuchtigkeitsgehalt der zu untersuchenden Probe. Die Einspannung des Prüflings in der Haltevorrichtung, die Belastungsrichtung und die Auswertung der erhaltenen Meßwerte werden ebenfalls je nach angewandter Methode unterschiedlich durchgeführt.

Neben der konventionellen Ermittlung der Festigkeiten mit Großmaschinen bietet der Fractometer III ebenfalls die Möglichkeit der Festigkeitsbestimmung. Der Fractometer III ist ein vom „Instrumenta Mechanik Labor GmbH“ in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Karlsruhe entwickelte Meßvorrichtung mit der Biege-, Druck- und Scherfestigkeitskennwerte von grünem Holz ermittelt werden können. Zur Herstellung der Probe muß in diesem Prüfverfahren der zu untersuchende Baum nicht gefällt werden.

Inhalt	Seite
1 Einleitung	1
2 Festigkeiten	2
2.1 Scherfestigkeiten	3
2.2 Druckfestigkeiten	4
2.3 Querkzugfestigkeiten	4
3 Der Fractometer III	6
3.1 Aufbau des Fractometer III	7
3.2 Funktionsprinzip des Fractometer III	9
3.2.1 Durchführung der Messungen am Radialkern mit dem Fractometer III	9
3.2.2 Durchführung der Messungen am Tangentialkern mit dem Fractometer III	13
3.3 Umrechnungsfaktoren für den Fractometer III	13
4 Literatur	13

1 Einleitung

Die drei Hauptfunktionen des Holzes sind Festigkeit, Wasserleitung und Nährstoffspeicherung. Jeder Baum ist unterschiedlichen Umwelteinflüssen wie Licht-, Wasser- bzw. Nährstoffangebot ausgesetzt. Verschiedene mechanischen Belastungen wie Wind, Schneelast oder schiefer Wuchs erfordern verschiedene Widerstandskräfte.

Der Baum ist stets bemüht einen Kompromiß zwischen Festigkeit, Wasserleitung und Nährstoffspeicherung einzugehen. Je nach Standort kann der Baum die eine oder andere Hauptfunktion etwas vernachlässigen oder fördern. Das für den Baum optimale Verhältnis dieser drei Hauptfunktionen bestimmt das Erscheinungsbild und die Festigkeiten des einzelnen Baumes.

Für die wissenschaftliche Holzforschung ist es notwendig Beziehungen zwischen einzelnen Festigkeitskenngrößen abzuleiten und Festigkeitsverläufe innerhalb eines Baumes zu erkennen.

Die komplexen Eigenschaften von Holz in anatomischer, physikalischer und mechanischer Hinsicht erschweren die internationale Normierung der Festigkeitsbestimmung. Die Prüfverfahren werden unterteilt in:

- Prüfung von Bauteilen in Bauholzabmessungen (structural timber) und
- Untersuchung an kleinen, fehlerfreien Proben (small clear specimens).

Hierbei variiert jedes Verfahren in seiner Methodik [1].

Die konventionelle Ermittlung der Festigkeitskenngrößen von kleinen, fehlerfreien Proben erfolgt durchweg an Druckprüfmaschinen. Zur Herstellung der Probe muß bei diesen Prüfverfahren der Baum gefällt und zersägt werden. Unterschiede in diesen Prüfverfahren bestehen in Größe und Form sowie Feuchtigkeitsgehalt der zu untersuchenden Probe. Die Einspannung des Prüflings in der Haltevorrichtung, die Belastungsrichtung und die Auswertung der erhaltenen Meßwerte werden ebenfalls je nach angewandter Methode unterschiedlich durchgeführt.

Neben der konventionellen Ermittlung der Festigkeiten mit Großmaschinen bietet der Fractometer III ebenfalls die Möglichkeit der Festigkeitsbestimmung. Der Fractometer III ist ein vom „Instrumenta Mechanik Labor GmbH“ in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Karlsruhe entwickelte Meßvorrichtung mit der Biege-, Druck- und Scherfestigkeitskennwerte von grünem Holz ermittelt werden können. Zur Herstellung der Probe muß in diesem Prüfverfahren der zu untersuchende Baum nicht gefällt werden.

2 Festigkeiten

Die Bestimmung der Festigkeit für einen Werkstoff erfolgt durch die Ermittlung der bei Versagen auftretenden Spannungen. Wird die auftretende Spannung größer als die entsprechende Festigkeit, versagt das Bauteil. Je nach Belastungsart spricht man z. B. von der Biegefestigkeit σ_B , der Zugfestigkeit σ_Z , der Druckfestigkeit σ_D und der Scherfestigkeit τ .

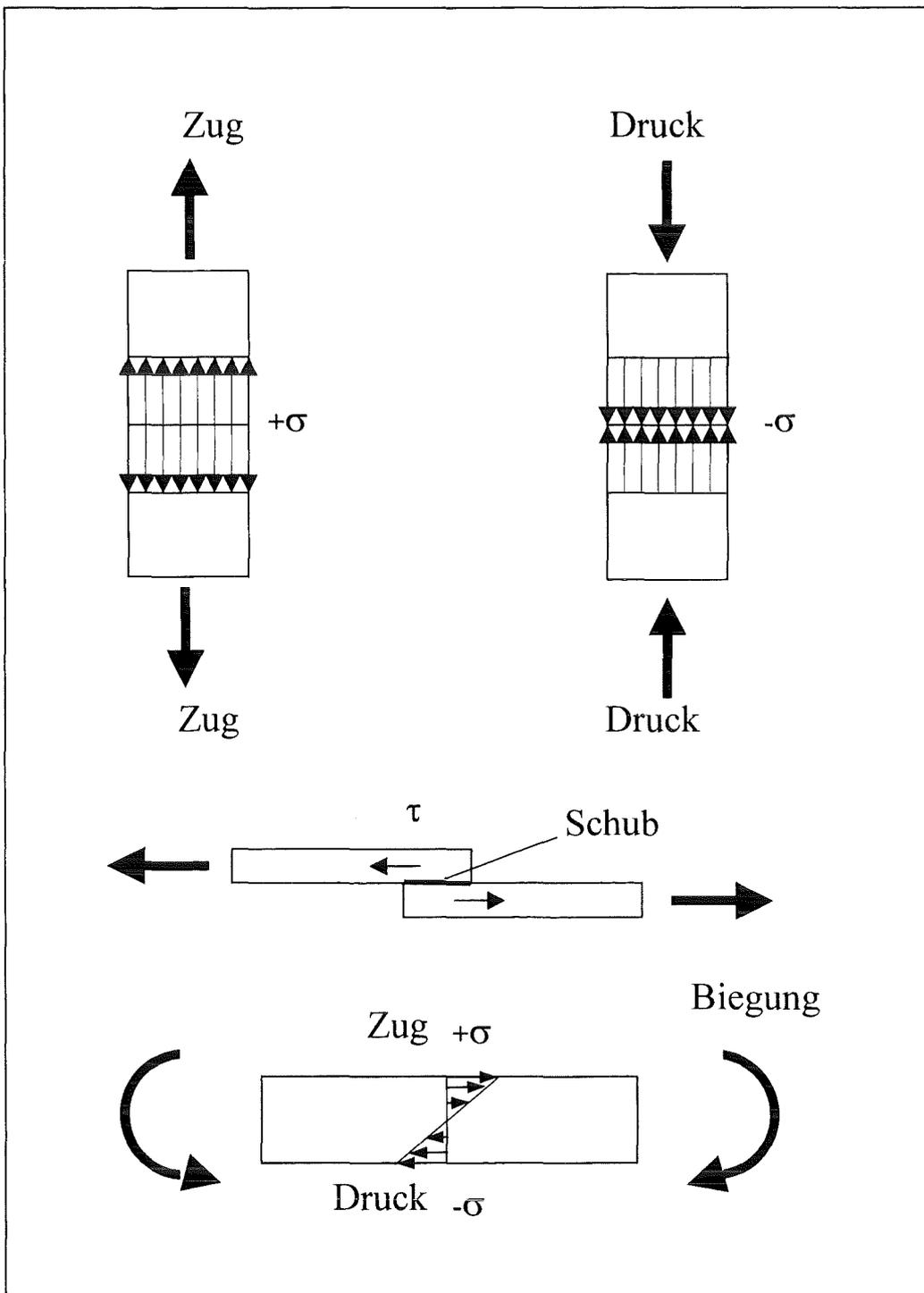
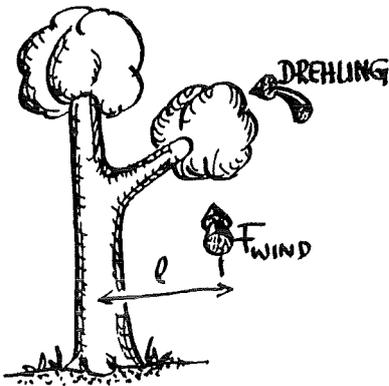


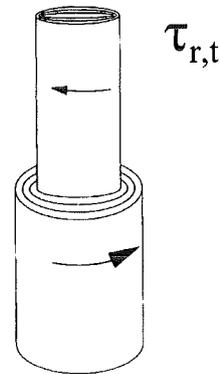
Bild 1: Vereinfachte Klassifizierung der inneren Spannungen in Zug-, Druck- und Schubspannungen, die durch äußere Lasten an einem Bauteil bewirkt werden können.

2.1 Scherfestigkeiten

Windkraft kann über starke Seitenäste auf den Stamm übertragen werden. Der Stamm wird auf Torsion belastet. Die tangentielle Scherfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung $\tau_{r,t}$ ist ein Maß für den Widerstand den der Baumstamm diesem Verdrehen entgegensetzt.



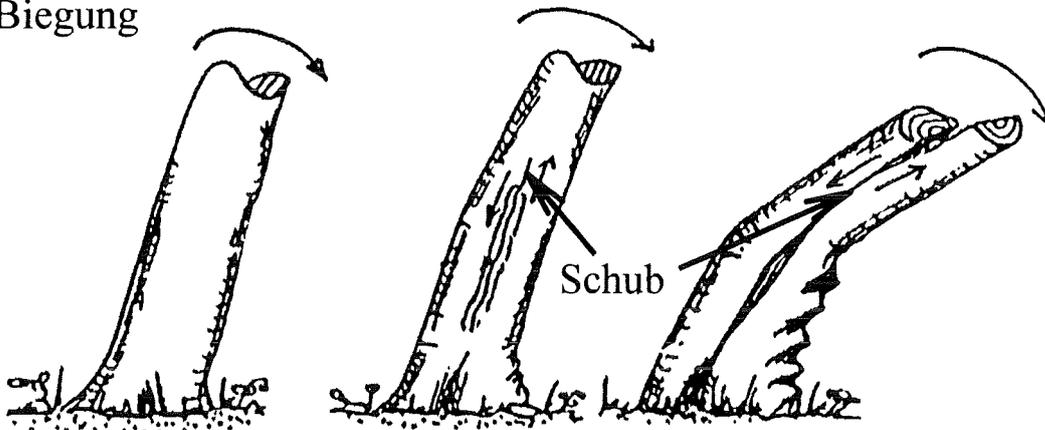
Belastung des Baumes.



Schematische Darstellung der Scherebene und der Belastungsrichtung an einem Baumstamm.

Über die Baumkrone wird durch Windkraft Biegung auf den Stamm übertragen. Diese Biegung bewirkt im Stamm Druck-, Zug- und Schubspannungen. Die radiale Scherfestigkeit in Faserrichtung $\tau_{r,l}$ und die tangentielle Scherfestigkeit in Faserrichtung $\tau_{t,l}$ sind Widerstände denen der Baumstamm einem Versagen durch Schubspannungen entgegensetzt.

Biegung



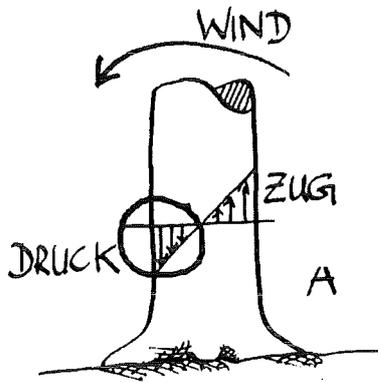
Belastung des Baumes.



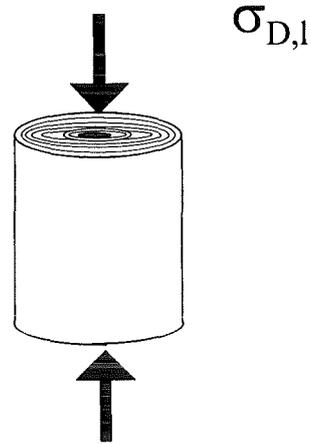
Schematische Darstellung der Scherebenen und der Belastungsrichtungen an einem Baumstamm.

2.2 Druckfestigkeiten

Durch Biegung des Stammes wird Druckspannung in axialer Richtung auf den Stamm übertragen. Die axiale Druckfestigkeit $\sigma_{D,l}$ ist der Widerstand, den der Baum einem Versagen durch axialen Druck entgegensetzt.



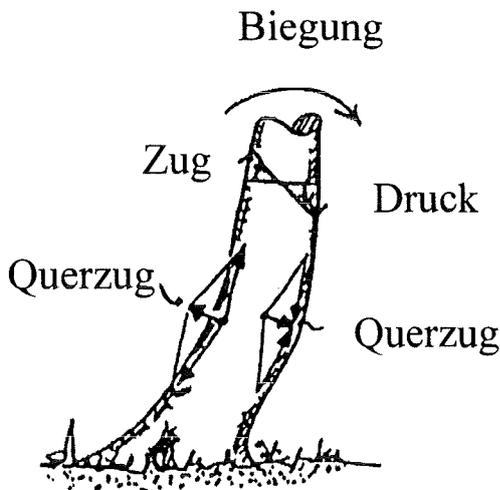
Belastung des Baumes.



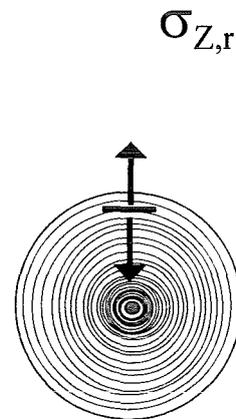
Schematische Darstellung der Belastungsrichtung an einem Baumstamm.

2.3 Querzugfestigkeiten

Durch Biegung des Stammes wird Zugspannung in axialer Richtung auf den Stamm übertragen. In den Wurzelanläufen und in gekrümmten Stämmen kommt es dabei zu Querzugspannungen bzw. radialen Zugspannungen. Die radiale Zugfestigkeit $\sigma_{Z,r}$ ist der Widerstand, den der Baumstamm einem Versagen durch eine Querzugspannung entgegensetzt. Diese Festigkeit wirkt der Entstehung von Unglücksbalken entgegen.

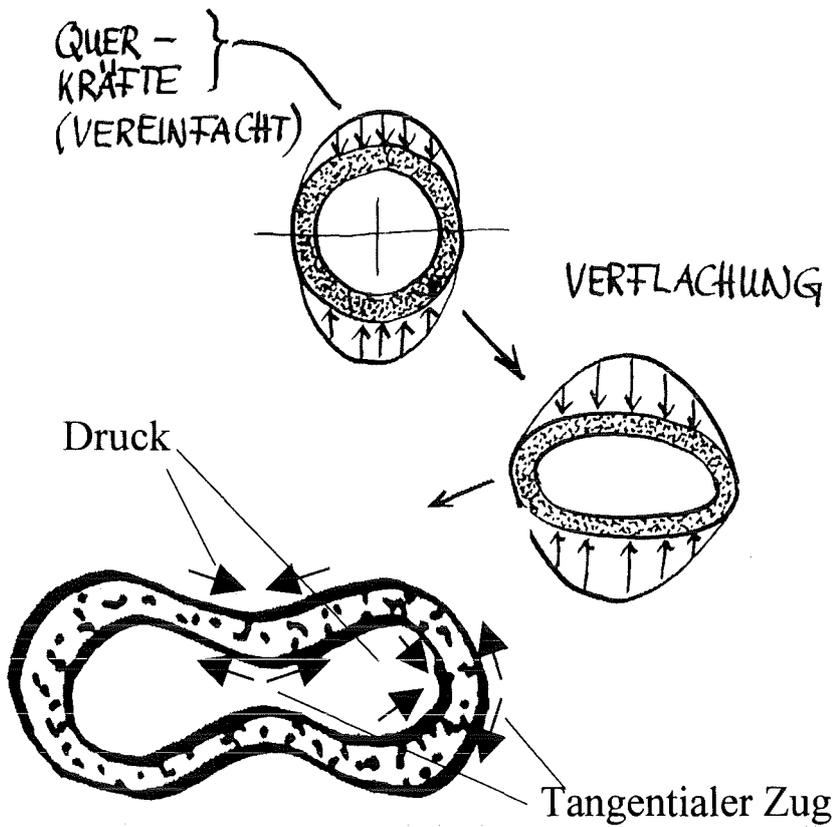
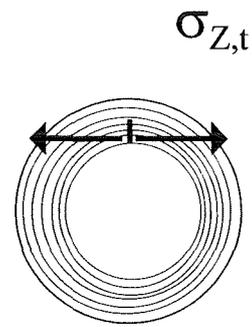
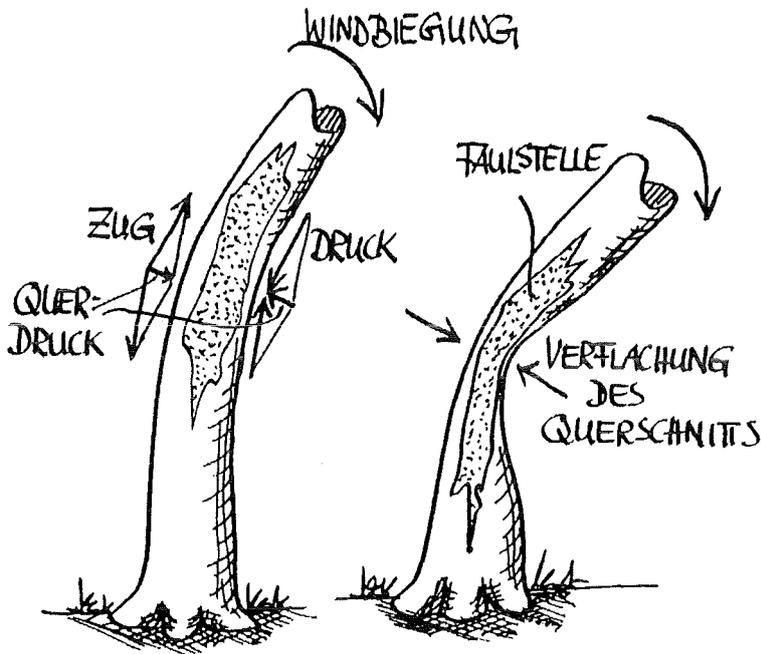


Belastung des Baumes.



Schematische Darstellung der Belastungsrichtung an einem Baumstamm.

Durch Biegung des hohlen Stammes wird Druckspannung in radialer Richtung auf den Stamm übertragen. Der hohle Stamm kann hierbei verflachen. Auf der Innenseite des hohlen Stammes kommt es auch zu Zugspannungen in tangentialer Richtung. Die tangentielle Zugfestigkeit $\sigma_{z,t}$ ist der Widerstand, den der Baum einem Versagen durch tangentialen Zug entgegensetzt.



Schematische Darstellung der Belastungsrichtung an einem Baumstamm.

Belastung des Baumes.

3 Der Fractometer III

Der Fractometer III ist eine Meßvorrichtung zur Bestimmung von Biegefestigkeits-, Druckfestigkeits- und Scherfestigkeitskennwerten von grünem Holz. Bestimmt werden diese Kennwerte mittels eines Bohrkerns mit einem Durchmesser von 5 mm. Der Bohrkern wird mit einem Zuwachsbohrer radial bzw. tangential aus dem Baum entnommen (Bild 2).

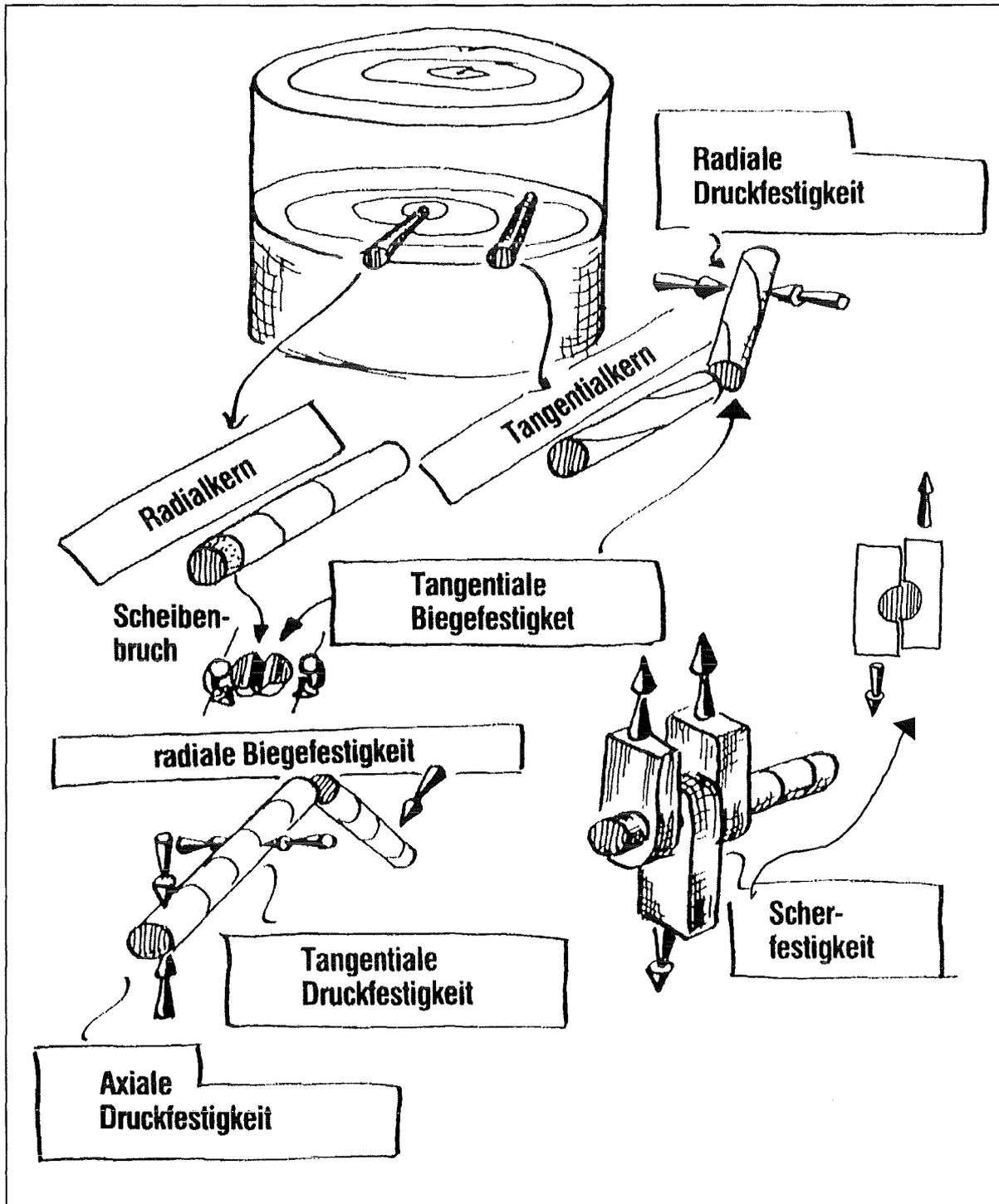


Bild 2: Festigkeitsgrößen, die sich durch Bruch eines Radial- bzw. Tangentialbohrkerns bestimmen lassen [2].

3.1 Aufbau des Fractometer III

Im Wesentlichen besteht der Fractometer III aus fünf Komponenten (Bild 3):

- (a) Handrad zur Krafteinleitung;
- (b) Kraftmeßuhr;
- (c) verstellbarer Hebelarm;
- (d) Einspannvorrichtung für Probestücke;
- (e) Wegmeßuhr;

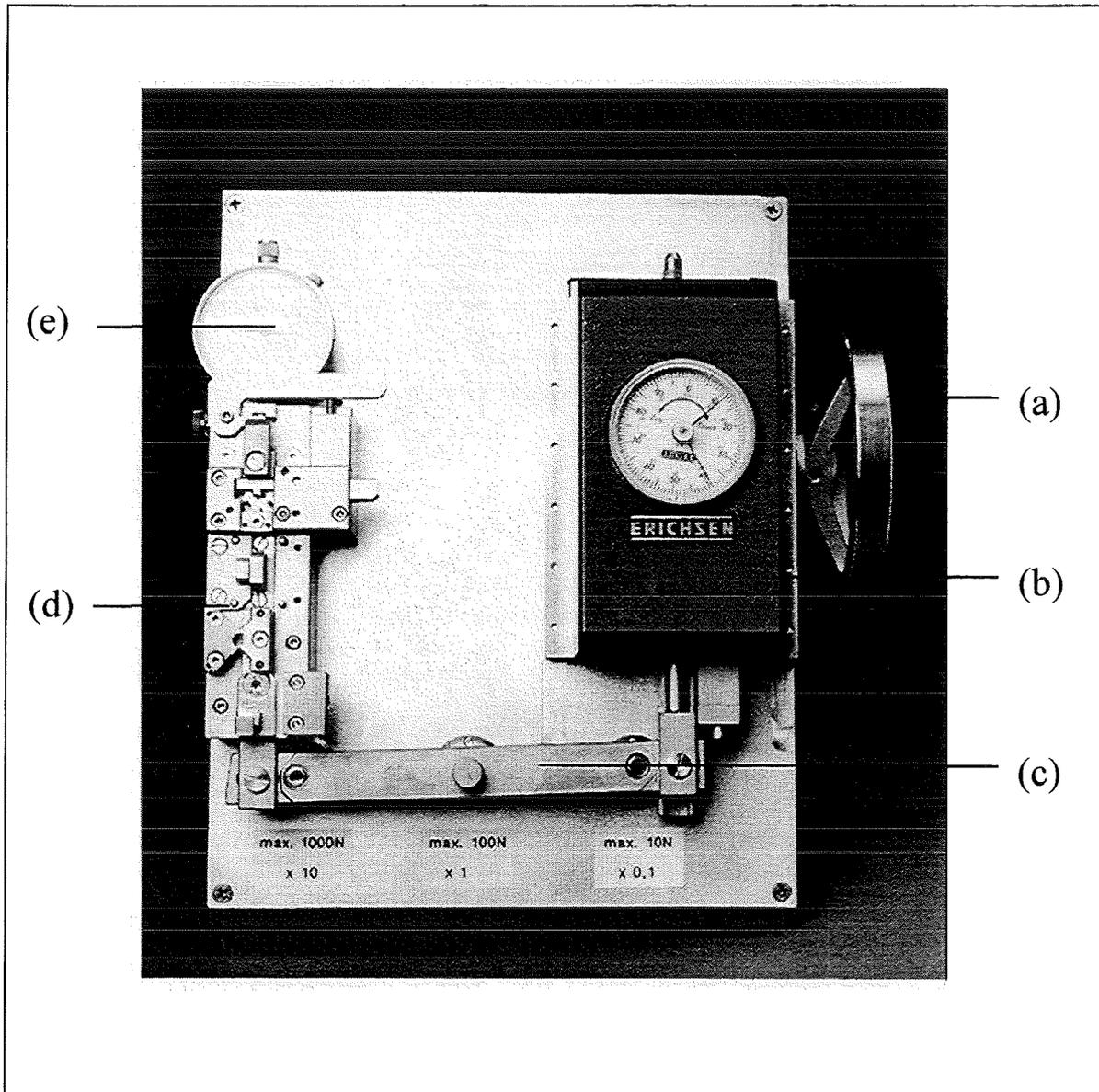


Bild 3: Der Fractometer III mit seinen fünf Komponenten.

Die Einspannvorrichtung für Probenstücke (Bild 4) besteht aus fünf Komponenten. Folgende Festigkeitskenngrößen können bestimmt werden:

- (1) die radiale Biegefestigkeit;
- (2) die radiale Scherfestigkeit;
- (3) die tangentielle Scherfestigkeit;
- (4) die axiale Druckfestigkeit;
- (5) die tangentielle Biegefestigkeit;

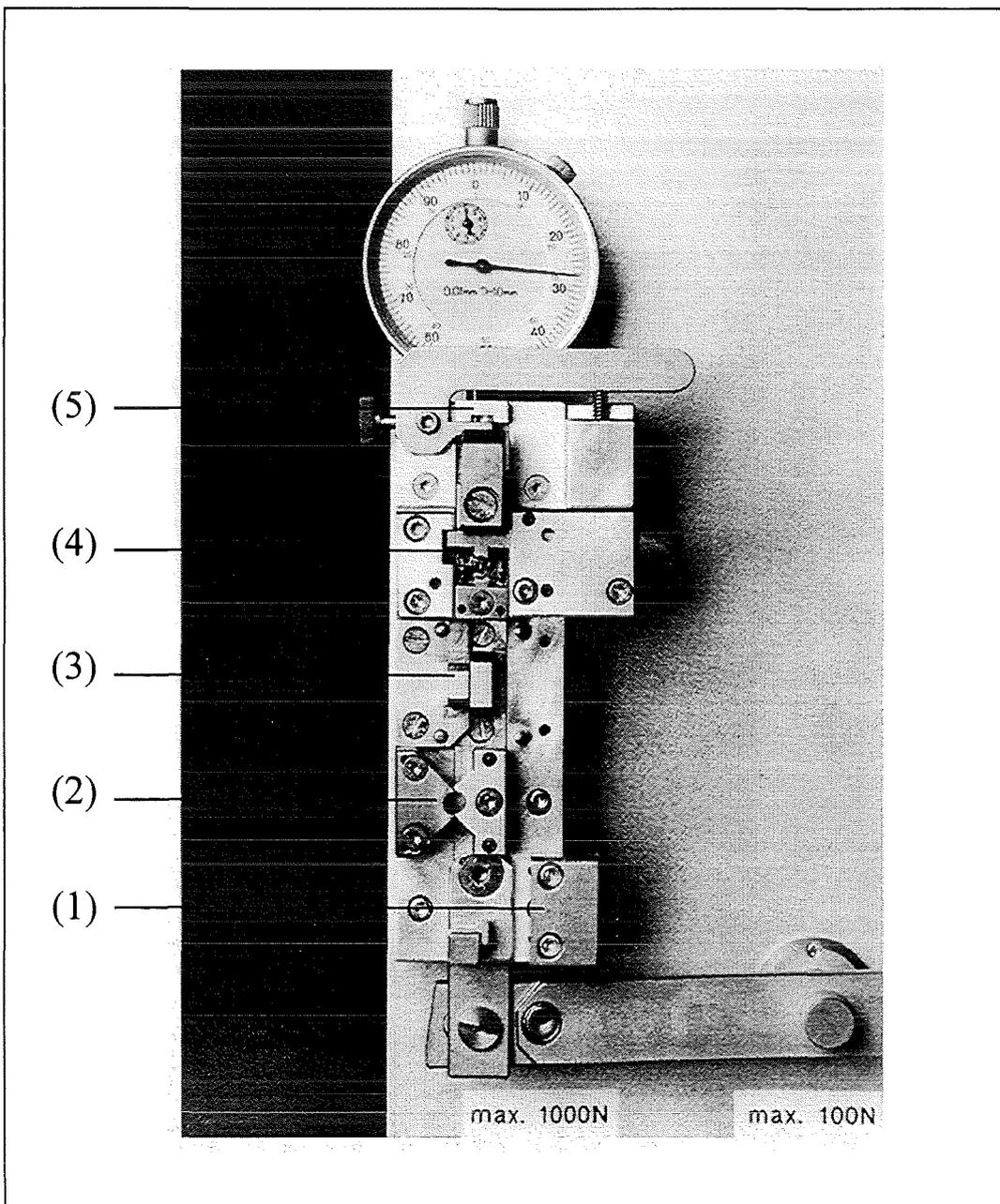


Bild 4: Die Einspannvorrichtung des Fractometer III.

3.2 Funktionsprinzip des Fractometer III

Zur Bestimmung eines Festigkeitskennwertes wird eine Probe bzw. ein Probensegment in die entsprechende Einspannvorrichtung eingelegt und entsprechend der Faserrichtung ausgerichtet. Durch langsames, kontinuierliches Drehen des Handrades wird über den verstellbaren Hebelarm eine Kraft auf die Einspannvorrichtung und somit auf die Probe übertragen. Die Kraft wird so lange erhöht, bis die Probe versagt. Gemessen wird die bis zum Versagen der Probe maximal aufgebrachte Kraft. Diese Kraft wird an der Kraftmeßuhr mittels Schleppeizer angezeigt. Über die Hebelverhältnisse und die Geometrie des Fractometers können die auftretenden Festigkeiten errechnet werden. Die Wegmeßuhr dient zur Ermittlung der bis zum Bruch der Probe zurückgelegten Strecke

3.2.1 Durchführung der Messungen an Radialkernen mit dem Fractometer III

Die Bestimmung der radialen Biegefestigkeit erfolgt in der Komponente Nr. 1 der Einspannvorrichtung (Bild 4). Hierbei wird wegen der noch folgenden Meßgänge ein Bohrkern in 35 mm lange Probenstücke gebrochen und die maximale Kraft bis zum Bruch ermittelt (Bild 5). Beim radialen Biegebruch versagt die Probe zuerst auf der Zugseite. Deshalb kann die radiale Biegefestigkeit als Maß für die radiale Zugfestigkeit verwendet werden.

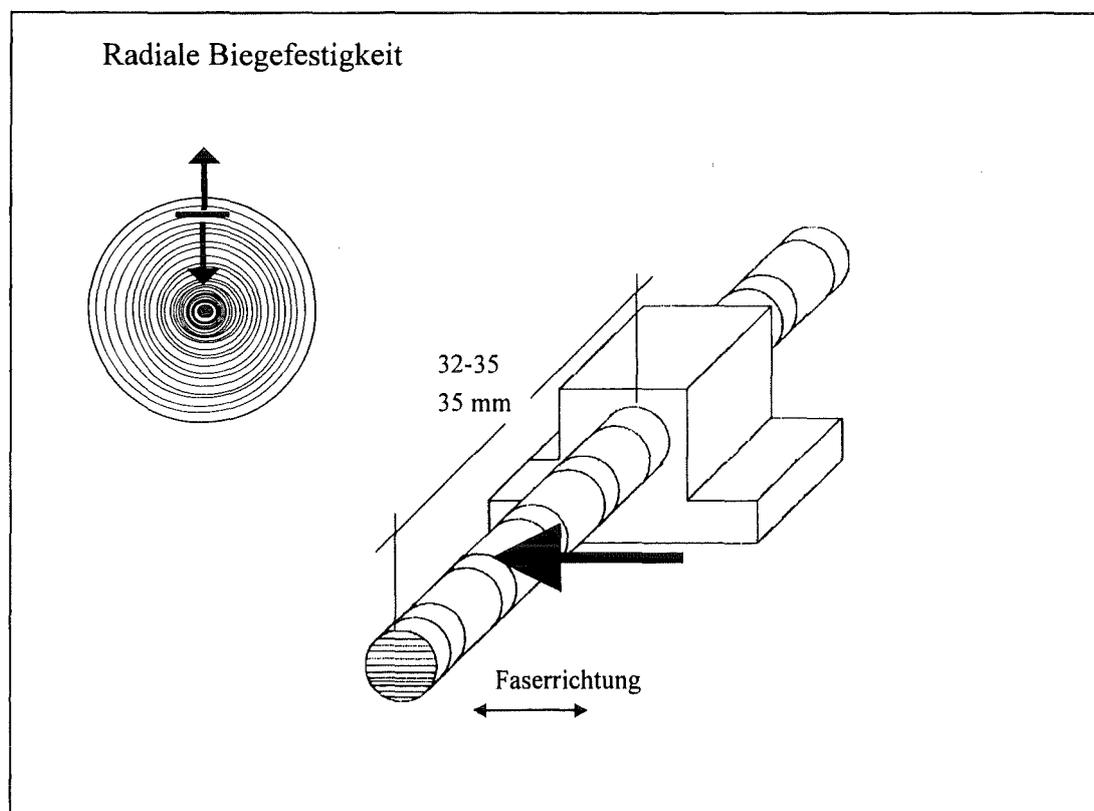


Bild 5: Schematische Darstellung der Belastung und der Ausrichtung der zu untersuchenden Probe bei der Bestimmung der radialen Biegefestigkeit.

Von jedem so erhaltenen Probenstück wird anschließend mit einer Rasierklinge eine 1 - 2 mm starke Scheibe abgeschnitten. Dies ist notwendig um die durch den Biegefestigkeitsversuch am Bruchende delaminierten Holzfasern bzw. Holzstrahlen zu beseitigen. Anschließend wird das 32 mm lange Probenstück in drei Segmente mit 5 mm Länge und jeweils einem Segment mit einer Länge von 2 mm und 15 mm geteilt (Bild 6).

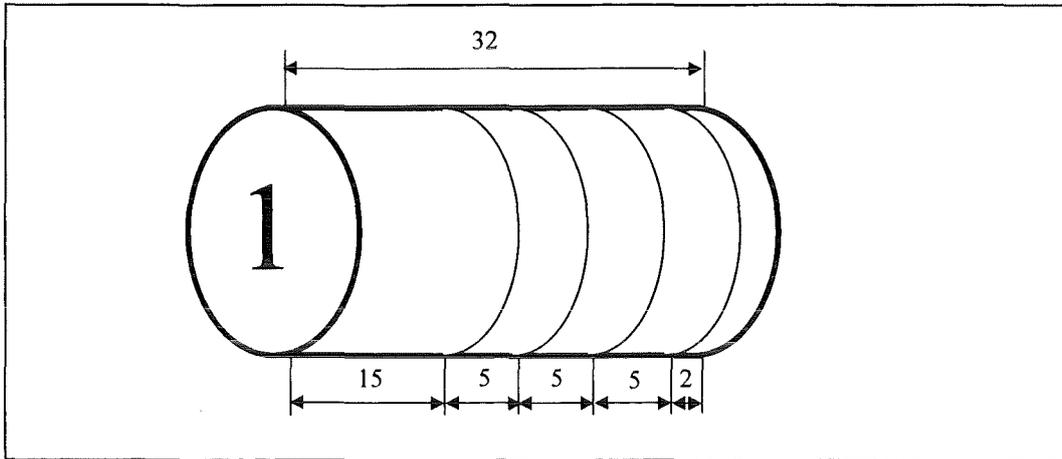


Bild 6: Unterteilung der Probe Nr.1 in fünf Segmente für Folgemessungen.

Die Bestimmung der tangentialen Scherfestigkeit in und senkrecht zur Faserrichtung erfolgt in der Komponente Nr. 3 der Einspannvorrichtung (Bild 4). Hierbei werden jeweils 5 mm von dem 15 mm langen Probensegment abgeschert. Bei der Bestimmung der tangentialen Scherfestigkeit in Faserrichtung wird die Probe parallel zur Faserrichtung bis zur Scherung belastet und die maximale Scherkraft ermittelt (Bild 7). Anschließend wird das von der Probe abgescherte Segment entfernt. Zur Ermittlung der tangentialen Scherfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung wird die restliche Probe um 90 Grad gedreht bis die Holzfasern senkrecht zur Belastungsrichtung stehen und wiederum bis zum Versagen belastet (Bild 8).

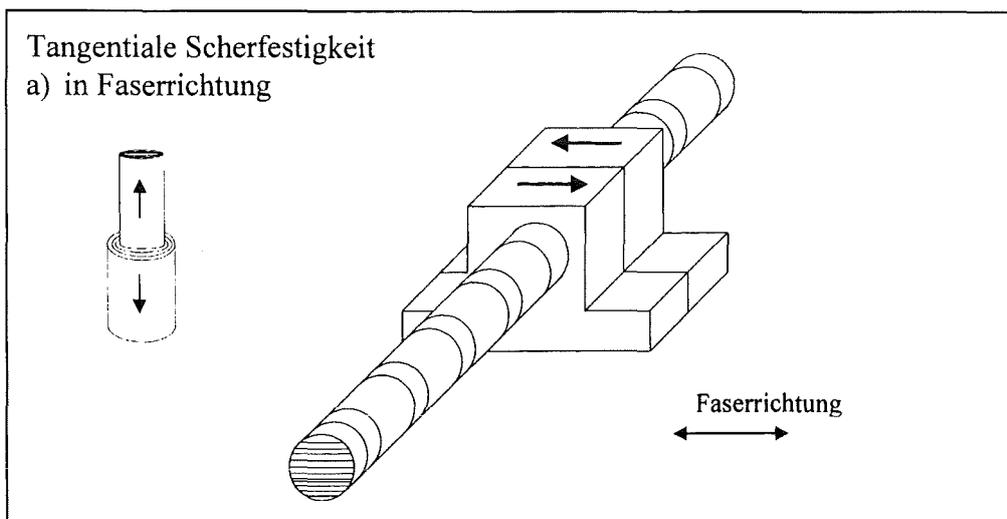


Bild 7: Schematische Darstellung der Belastung und der Ausrichtung der zu untersuchenden Probe bei der Bestimmung der tangentialen Scherfestigkeit in Faserrichtung.

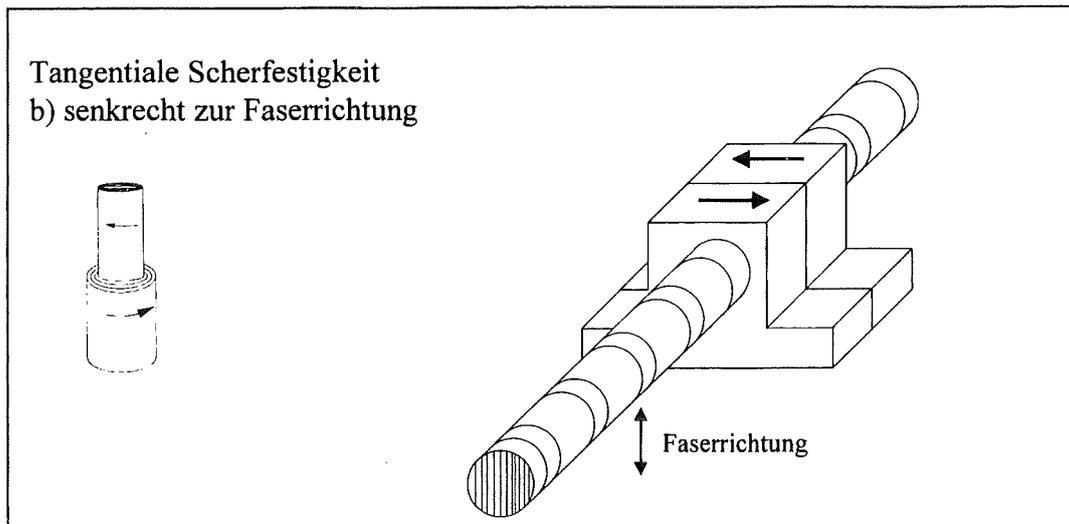


Bild 8: Schematische Darstellung der Belastung und der Ausrichtung der zu untersuchenden Probe bei der Bestimmung der tangentialen Scherfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung.

Die Bestimmung der radialen Scherfestigkeit in Faserrichtung erfolgt in der Komponente Nr.2 der Einspannvorrichtung (Bild 4). Als Probe wird eines der drei 5 mm langen Probensegmente verwendet. Das Probesegment wird parallel zur Faserrichtung bis zum Versagen belastet und die maximale Scherkraft ermittelt (Bild 9).

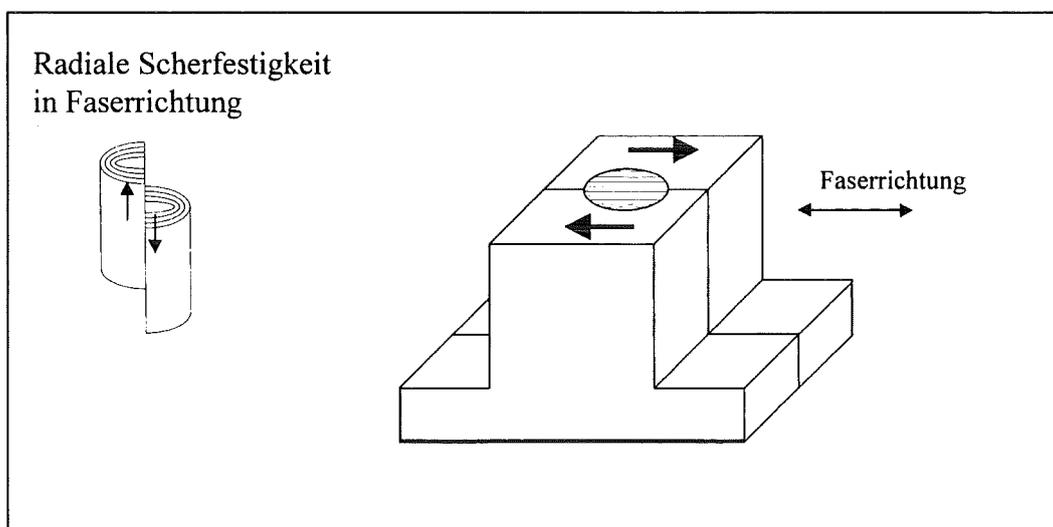


Bild 9: Schematische Darstellung der Belastung und der Ausrichtung des zu untersuchenden Probensegments bei der Bestimmung der radialen Scherfestigkeit in Faserrichtung.

Die Bestimmung der axialen Druckfestigkeit erfolgt in der Komponente Nr. 4 der Einspannvorrichtung (Bild 4). Als Probe wird eines der drei 5 mm langen Probensegmente verwendet. Das Probesegment wird parallel zur Faserrichtung bis zum Versagen belastet und die maximale Druckkraft ermittelt (Bild 10).

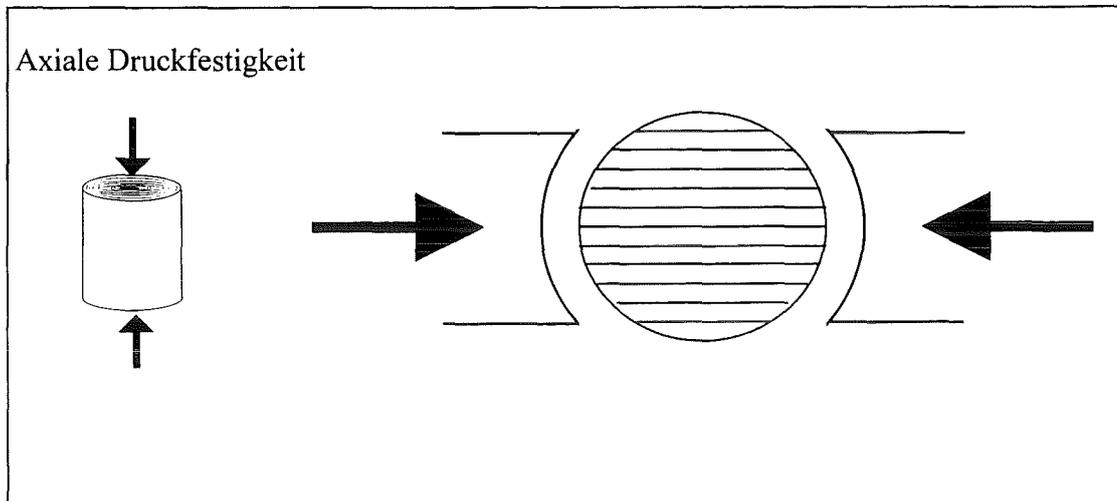


Bild 10: Schematische Darstellung der Belastung und der Ausrichtung des zu untersuchenden Probensegments bei der Bestimmung der axialen Druckfestigkeit.

Die Bestimmung der tangentialen Biegefestigkeit erfolgt in der Komponente Nr. 5 der Einspannvorrichtung (Bild 4). Als Probe wird das 2 mm lange Probesegment verwendet. Das Probesegment wird senkrecht zur Faserrichtung bis zum Versagen belastet und die maximale Kraft bis zum Bruch ermittelt (Bild 11). Beim tangentialen Biegebruch versagt die Probe zuerst auf der Zugseite. Deshalb kann die tangentielle Biegefestigkeit als Maß für die tangentielle Zugfestigkeit verwendet werden.

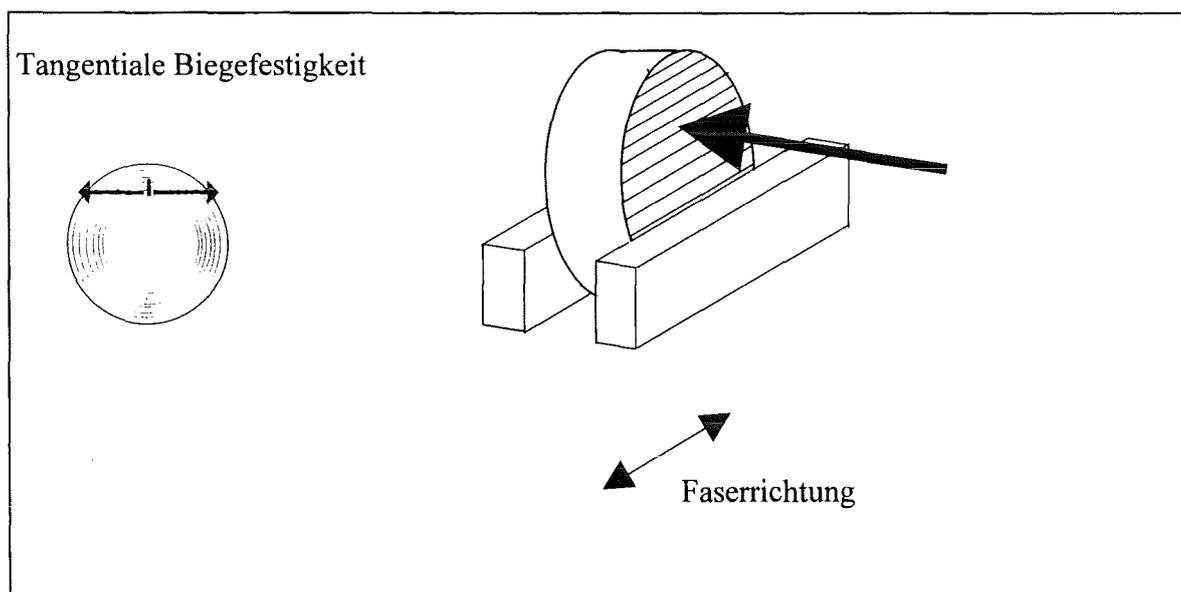


Bild 11: Schematische Darstellung der Belastung und der Ausrichtung des zu untersuchenden Probensegments bei der Bestimmung der tangentialen Biegefestigkeit.

3.2.2 Durchführung der Messungen an Tangentialkernen mit dem Fractometer III

Die Bestimmung der tangentialen Biegefestigkeit erfolgt in der Komponente Nr. 1 der Einspannvorrichtung (Bild 4). Hierbei wird der Bohrkern radial belastet und die maximale Kraft bis zum Bruch ermittelt (Bild 12). Zur Bestimmung der tangentialen Biegefestigkeit an einem Tangentialkern bestehen somit nur sehr wenig Möglichkeiten zum Vergleich mit dem Scheibchenbruch an Radialkernen.

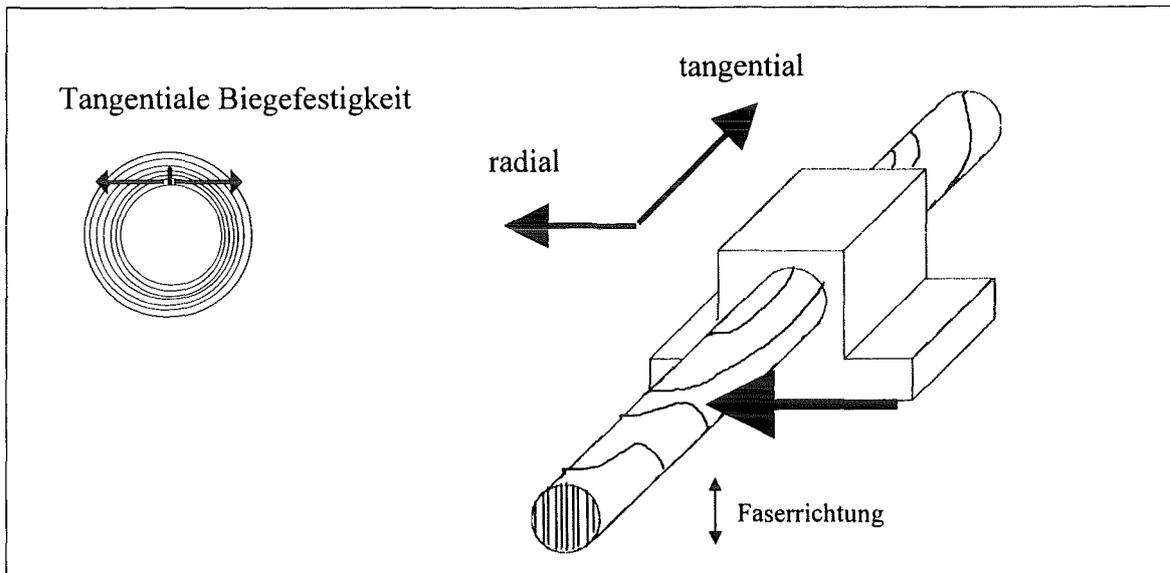


Bild 12: Schematische Darstellung der Belastung und der Ausrichtung des zu untersuchenden Bohrkerns bei der Bestimmung der tangentialen Biegefestigkeit.

3.3 Umrechnungsfaktoren für den Fractometer III

Nach der Bestimmung der verschiedenen Bruchkräfte ist es notwendig diese in die entsprechenden Festigkeiten umzurechnen. Die verschiedenen Drehpunkte des Hebelarms und die geometrischen Abmessungen der zu untersuchenden Probe und des Fractometer III spielen hierbei eine wichtige Rolle. Die Linear-Kraftmeßdose mit Analoganzeige ist für einen Bereich von 10 N bis 100 N ausgelegt. Je nach gesuchter Kenngröße und Holzqualität müssen die Hebelverhältnisse geändert werden:

Linke Position des Drehpunktes: die auf der Meßuhr angezeigte Kraft wird im Verhältnis 1:10 übertragen, d.h.:

$$F_{ist} = F_{Meßuhr} \cdot 10$$

Mittlere Position des Drehpunktes: die auf der Meßuhr angezeigte Kraft wird im Verhältnis 1:1 übertragen, d.h.:

$$F_{ist} = F_{Meßuhr}$$

Rechte Position des Drehpunktes: die auf der Meßuhr angezeigte Kraft wird im Verhältnis 10:1 übertragen, d.h.:

$$F_{ist} = F_{Meßuhr} \cdot 0,1$$

Für jede der fünf Komponenten des Meßblocks muß der Umrechnungsfaktor zwischen der Bruchkraft F_{ist} und der daraus resultierenden Festigkeit ermittelt werden.

Komponente Nr. 1:

Radiale Biegefestigkeit $\sigma_{B,r}$ am Radialkern und tangentielle Biegefestigkeit $\sigma_{B,t}$ am Tangentialkern:

$$\sigma_{B,r} = \sigma_{B,t} = \frac{M}{W} = \frac{F \cdot l}{\pi \cdot d^3 / 32} = 0,85 \cdot F \quad \text{in MPa}$$

F = Kraftanzeige der Meßuhr

M = Moment

W = Widerstandsmoment des Kreiszylinders

l = Abstand zwischen Krafteinleitung und Einspannung (10,5 mm)

d = Durchmesser Bohrkern (5 mm)

Komponente Nr. 2:

Tangentiale Scherfestigkeit in Faserrichtung und senkrecht zur Faserrichtung ($\tau_{r,t}$, $\tau_{t,t}$):

$$\tau_{r,t} = \tau_{t,t} = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi \cdot r^2} = \frac{F}{19,6} \quad \text{in MPa}$$

F = Kraftanzeige der Meßuhr

r = Radius des Bohrkerns (2,5 mm)

Komponente Nr. 3:

Radiale Scherfestigkeit in Faserrichtung ($\tau_{t,t}$):

$$\tau_{t,t} = \frac{F}{A} = \frac{F}{b \cdot h} = \frac{F}{24} \quad \text{in MPa}$$

F = Kraftanzeige der Meßuhr

b = Breite der Scherfläche (5 mm)

h = Höhe der Scherfläche (4,8 mm)

Komponente Nr. 4:

Axiale Druckfestigkeit ($\sigma_{D,t}$) am Radialkern:

$$\sigma_{D,t} = \sigma_{D,r} = \sigma_{D,r} = \frac{F}{A} = \frac{F}{b \cdot h} = \frac{F}{15,6} \quad \text{in MPa}$$

F = Kraftanzeige der Meßuhr

b = Breite der Druckstempel (3,075 mm)

h = Höhe der Druckstempel (5,075 mm)

Komponente Nr. 5:

Tangentiale Biegefestigkeit $\sigma_{B,t}$ mit einem Radialkern (Scheibchenbruch):

$$\sigma_{B,t} = \frac{M}{W} = \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2 / 6} = 0,57 \cdot F \quad \text{in MPa}$$

F = Kraftanzeige der Meßuhr

l = Abstand zwischen Krafteinleitung und Einspannung (1,9 mm)

b = Breite der Scheibe (5,0 mm)

h = Höhe der Scheibe (2,0 mm);

Vorsicht: die Höhe der Scheibe geht in obige Gleichung quadratisch ein. Bei einer Höhe h = 1,9 mm folgt: $\sigma_{B,t} = 0,63 \cdot F$

4 Literatur

- [1] Kollmann F.:
Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe
Springer-Verlag, 1982
- [2] Mattheck C.:
Wood - The Internal Optimization of Trees
Springer Verlag, Heidelberg, 2nd edition, 1997