

# **Ermittlung der Querkzugfestigkeit von Voll- und Brettschichtholz**

von

H.J. Blaß, J. Ehlbeck, M. Schmid

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine

Abteilung Ingenieurholzbau

Universität Fridericiana Karlsruhe

Univ.-Professor Dr.-Ing. H.J. Blaß

1998

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

PHYSICS DEPARTMENT

PHYSICS 435



## **Vorwort**

Im ersten Teil „Entwicklung eines Prüfverfahrens“ des Forschungsvorhabens „Ermittlung der Querkzugfestigkeit von Voll- und Brettschichtholz“ wurden neue Prüfverfahren für Brettschichtholz und Vollholz vorgestellt. In diesem zweiten Teil der Untersuchungen werden systematische Versuche mit Vollholz und Brettschichtholz durchgeführt und der Zusammenhang zwischen Querkzugfestigkeit und anderen Festigkeits- und Steifigkeitskenngrößen sowie der Rohdichte untersucht.

Das Forschungsvorhaben entstand im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung (DGfH) mit finanzieller Unterstützung des Deutschen Instituts für Bautechnik in Berlin.

Die Planung der Untersuchungen, die Durchführung der Versuche und deren Auswertung erfolgte durch Herrn Dipl.-Ing. M. Schmid. Für die Herstellung der Versuchskörper sowie der Versuchsvorrichtung und für die Messungen im Labor war Herr J. Lafferthon verantwortlich. Bei der Auswertung haben Frau cand.ing. S. Dietrich und die Herren cand.ing. J. Harich und P. Wagenblast tatkräftig mitgewirkt.

Allen Beteiligten ist für die Mitarbeit zu danken.

Jürgen Ehlbeck

Hans Joachim Blaß

The first part of the report is a general introduction to the project. It describes the objectives of the study and the methods used to collect and analyze the data. The second part of the report is a detailed description of the results of the study. It includes a discussion of the findings and their implications for the field of research. The final part of the report is a conclusion and a list of references.

The results of the study show that there is a significant relationship between the variables being studied. This relationship is consistent across all of the groups and conditions tested. The findings suggest that the theory being tested is supported by the data. However, there are some limitations to the study that should be noted.

## Inhaltsverzeichnis

1	Ziel des Forschungsvorhabens und Prüfverfahren.....	1
1.1	Einleitung.....	1
1.1.1	Volumeneffekt.....	1
1.1.2	Festigkeitskennwerte der Querkzugfestigkeit.....	3
1.2	Prüfverfahren.....	4
2	Versuche mit Vollholz.....	9
2.1	Materialeigenschaften.....	9
2.2	Querkzugfestigkeit von Vollholz.....	18
2.3	Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung.....	42
3	Versuche mit Brettschichtholz.....	49
3.1	Materialeigenschaften .....	49
3.2	Prüfkörper mit dem Bezugsvolumen $V_0 = 0,01 \text{ m}^3$ .....	52
3.3	Versuche mit kleineren Volumen.....	74
3.4	Volumeneffekt.....	87
3.5	Elastizitätsmodul.....	93
4	Zusammenfassung.....	99
	Literatur.....	101
	Anlagen	

1870

The first part of the year was spent in the  
field, and the second part in the  
office. The work was very  
heavy, and I was very  
tired. I was very  
happy to see you  
and to hear from  
you. I hope you  
are well and happy.  
I will write to you  
again soon.

# 1 Ziel des Forschungsvorhabens und Prüfverfahren

## 1.1 Einleitung

In DIN V ENV 1995-1-1 (Eurocode 5 Teil 1-1) Ausgabe 06.94 und in den europäischen Normen DIN EN 338, EN 1194 und DIN EN 384 werden Angaben zur Querkzugbemessung bzw. zur Querkzugfestigkeit von Voll- und Brettschichtholz gemacht, die von den bislang gültigen Vorschriften der DIN 1052 Ausgabe 04.88 und der Änderung DIN 1052 /A1 vom 10.96 abweichen.

### 1.1.1 Volumeneffekt

Der sogenannte Volumeneffekt besagt, daß für größere querkzugbeanspruchte Volumina bei gleicher Spannung eine größere Versagenswahrscheinlichkeit erwartet werden kann. Diese Regelung im Eurocode 5 beruht auf Überlegungen von Weibull, die auch als probabilistische Bruchmechanik bezeichnet werden (Weibull 1939, Gross 1996). Entsprechend Eurocode 5, 5.1.3 muß der Bemessungswert der Querkzugfestigkeit  $f_{t,90,d}$  für Brettschichtholz danach mit dem Faktor  $(V_0 / V)^{0,2}$  multipliziert werden.  $V$  ist das gleichmäßig querkzugbeanspruchte Volumen,  $V_0$  das Bezugsvolumen von  $0,01 \text{ m}^3$ , an dem nach EN 1193 und Eurocode 5 auch der charakteristische Wert der Querkzugfestigkeit  $f_{t,90,k}$  von Brettschichtholz ermittelt werden soll.

Weibull (1939) geht von einer statistischen Verteilung der Festigkeit aus. Somit ist nicht notwendigerweise diejenige Stelle für das Versagen maßgebend, an der die Beanspruchung am größten ist, da hier zufällig auch eine hohe Festigkeit vorhanden sein kann. Die Versagenswahrscheinlichkeit  $S$  berechnet sich nach Weibull zu:

$$S = 1 - e^{-\int f(\sigma,t) dV}, \text{ mit } f(\sigma,t) = f(\sigma \cdot t(x,y,z)) \quad (1).$$

Die Funktion  $f(\sigma \cdot t(x,y,z))$  berücksichtigt die Verteilung der Querkzugbeanspruchung im Volumen. Für ein Volumen unter gleichförmiger Beanspruchung führt dies zu:

$$S = 1 - e^{-V \cdot f(\sigma)} \quad (2).$$

Als Gleichung für  $f(\sigma)$  schlägt Weibull

$$f(\sigma) = (\sigma - \sigma_0) / m)^k \quad (3)$$

vor. Die Versagenswahrscheinlichkeit für ein gleichförmig beanspruchtes Volumen ergibt sich damit zu:

$$S = 1 - \exp(-V((\sigma - \sigma_0) / m)^k) \quad (4).$$

Mit Hilfe der Parameter  $\sigma_0$ ,  $m$  und  $k$  können Versuchsergebnisse dieser dreiparametrischen Weibullverteilung angepaßt werden. Üblicherweise wird der Parameter  $\sigma_V = m \cdot V^{-1/k}$

(5)

eingeführt, so daß die Gleichung für die Versagenswahrscheinlichkeit die Form:

$$S = 1 - \exp(-((\sigma - \sigma_0) / \sigma_V)^k) \quad (6)$$

annimmt. Mit der Annahme  $\sigma_0 = 0$  folgt hieraus die zweiparametrische Weibullverteilung. Sollen zwei unterschiedliche Volumina  $V_1$  und  $V_2$  die gleiche Versagenswahrscheinlichkeit haben, führt dies zu:

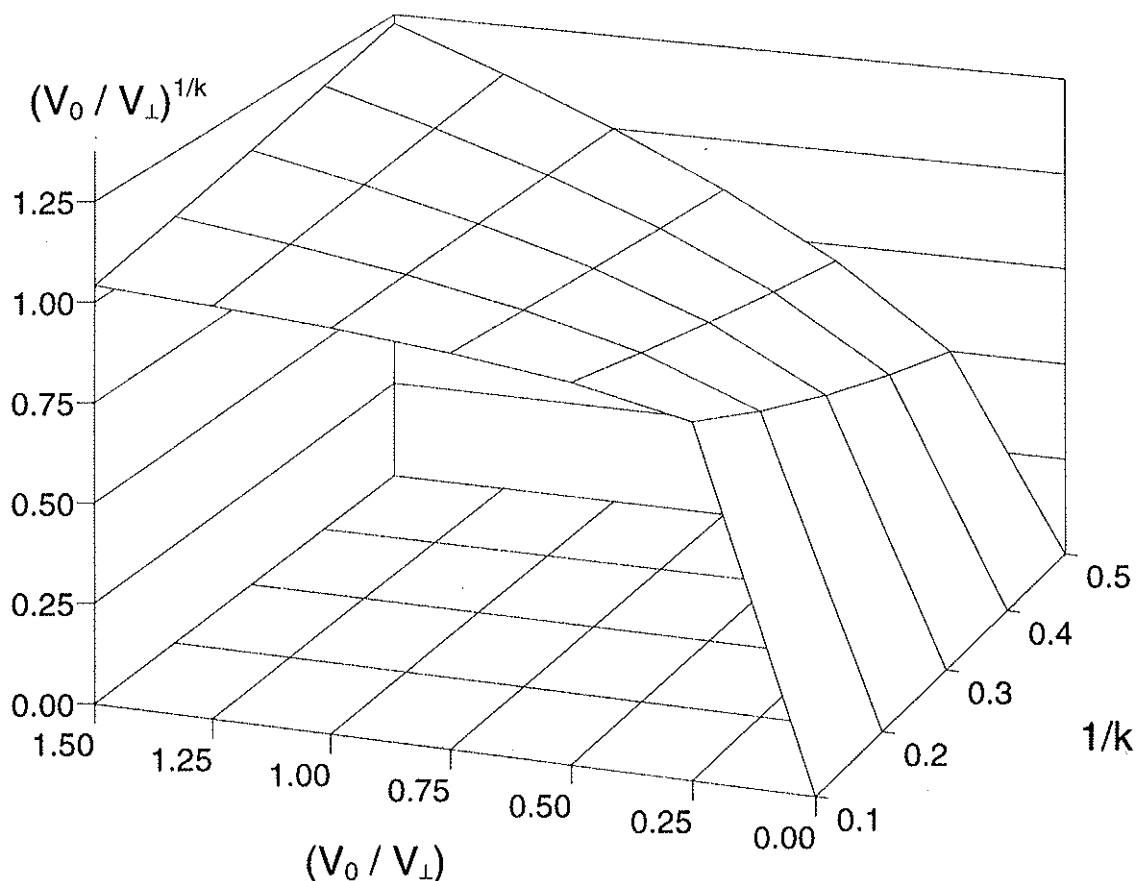
$$\sigma_2 / \sigma_1 = (V_1 / V_2)^{1/k} \quad (7).$$

Andererseits bedeutet dies, daß für querzugbeanspruchte Volumina  $V_{\perp}$ , die von  $V_0$ , das bei der Ermittlung der charakteristischen Festigkeit  $f_{t,90,k}$  verwendet wurde, abweichen,  $f_{t,90,k}$  mit dem Faktor  $(V_0 / V_{\perp})^{1/k}$  zu multiplizieren ist.

Colling (1986) empfiehlt für den Parameter  $k$  der Weibullverteilung  $k = 5$ . Dieser Wert beruht auf Versuchen mit gekrümmten Brettschichholzträgern und Satteldachträgern.

Mit den im vorliegenden Forschungsbericht durchgeführten Versuchen an den Bezugsvolumen  $V_0 = 0,01 \text{ m}^3$  nach EN1193 soll die Annahme, daß dem Versagen für querzugbeanspruchtes Holz die oben beschriebene Weibullverteilung zugrunde liegt und der Wert des Parameters  $k$  der Weibullverteilung überprüft werden.

In Bild 1-1 ist der Einfluß des Volumenverhältnisses  $(V_0 / V_{\perp})$  und des Weibullparameters  $1 / k$  dargestellt.



**Bild 1-1:** Einfluß des Parameters  $k$  und des Verhältnisses  $(V_0 / V_{\perp})$

### 1.1.2 Festigkeitskennwerte der Querkzugfestigkeit

Nach Eurocode 5 sollen die charakteristischen Festigkeits- und Steifigkeitswerte entsprechend den Normen DIN EN 384 und DIN EN 1194 ermittelt werden, Festigkeitsklassen werden in der DIN EN 338 und der DIN EN 1194 angegeben. Dabei soll der charakteristische Wert der Querkzugfestigkeit von Vollholz an einem Probekörper mit einer querkzugbeanspruchten Fläche von 45 mm x 70 mm und einer Höhe von 180 mm ermittelt werden, der von Brettschichtholz an einem Volumen von 0,01 m<sup>3</sup> mit einer vorgegebenen Höhe von 400 mm.

Diese Regelungen sind durch das derzeit gültige nationale Anwendungsdokument (Richtlinie zur Anwendung von DIN EN 1995 Teil 1-1) Ausgabe 02.95 weitestgehend außer Kraft gesetzt worden. Der oben beschriebene Volumeneffekt für Brettschichtholz darf jedoch angewendet werden, so daß sich auch die charakteristischen Werte der Querkzugfestigkeit hier auf ein Bezugsvolumen  $V_0$  von 0,01 m<sup>3</sup> beziehen. Die durch das nationale Anwendungsdokument (NAD) gegebenen charakteristischen Festigkeits- und Steifigkeitswerte beziehen sich auf die Sortierklassen nach der gül-



tigen DIN 4074, „Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit“. Ebenso wie bislang in der DIN 1052 wird hier für alle Sortierklassen von Nadelvollholz ein einheitlicher Wert der Querkzugfestigkeit von  $f_{t,90,k} = 0,2 \text{ N/mm}^2$  (für S7  $f_{t,90,k} = 0,0 \text{ N/mm}^2$ ) angegeben, für alle Festigkeitsklassen von Brettschichtholz  $f_{t,90,g,k} = 0,45 \text{ N/mm}^2$ .

Im Gegensatz dazu nimmt die DIN EN 384 eine Abhängigkeit der charakteristischen Querkzugfestigkeit von der Rohdichte nach der Gleichung

$$f_{t,90,k} = 0,001 \cdot \rho_k \quad (8)$$

an. Entsprechend wird den höheren Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 und DIN EN 1194 auch eine höhere Querkzugfestigkeit zugeordnet.

Untersuchungen mit den in der DIN EN 1193 und im Eurocode 5 vorgeschriebenen Bezugsvolumen zur Ermittlung der Querkzugfestigkeit wurden bislang nur in geringem Umfang durchgeführt.

Aicher und Dill-Langer (1995 und 1997) untersuchten je 44 Prüfkörper mit einem Volumen von  $0,01 \text{ m}^3$  und  $0,03 \text{ m}^3$  im Rahmen eines von der Europäischen Kommission finanzierten AIR Forschungsvorhabens in Kurzzeitversuchen. Weitere Versuche wurden zur Ermittlung der Zeitstandfestigkeit unter verschiedenen Klimabedingungen durchgeführt. Das untersuchte Material wurde eigens für dieses Forschungsvorhaben in Schweden maschinell sortiert und in Finnland verleimt. Die verwendeten Lamellen konnten der Festigkeitsklasse C35 oder C40 nach DIN EN 338 zugeordnet werden, d.h. das Brettschichtholz entsprach etwa den Festigkeitsklassen BS16 und BS18 nach DIN 1052 bzw. NAD zum Eurocode 5. Die Auswertung erfolgte für beide Festigkeitsklassen gemeinsam. Die Lamellendicke und die Querschnittsmaße waren konstant.

Die Versuche im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollten dagegen mit Brettschichtholz aller Festigkeitsklassen nach DIN 1052-1/A1 durchgeführt werden, das der laufenden Produktion deutscher Brettschichtholzhersteller entnommen werden sollte. Zusätzlich wurden noch kleinere Prüfkörper aus ein, zwei und drei Lamellen untersucht. Mit Hilfe statistischer Untersuchungen sollten aus den an diesen kleinen Volumen ermittelten Werten der Querkzugfestigkeit diejenige von größeren Volumen abgeleitet und die Anwendbarkeit des oben beschriebenen Volumeneffektes nach Weibull überprüft werden.

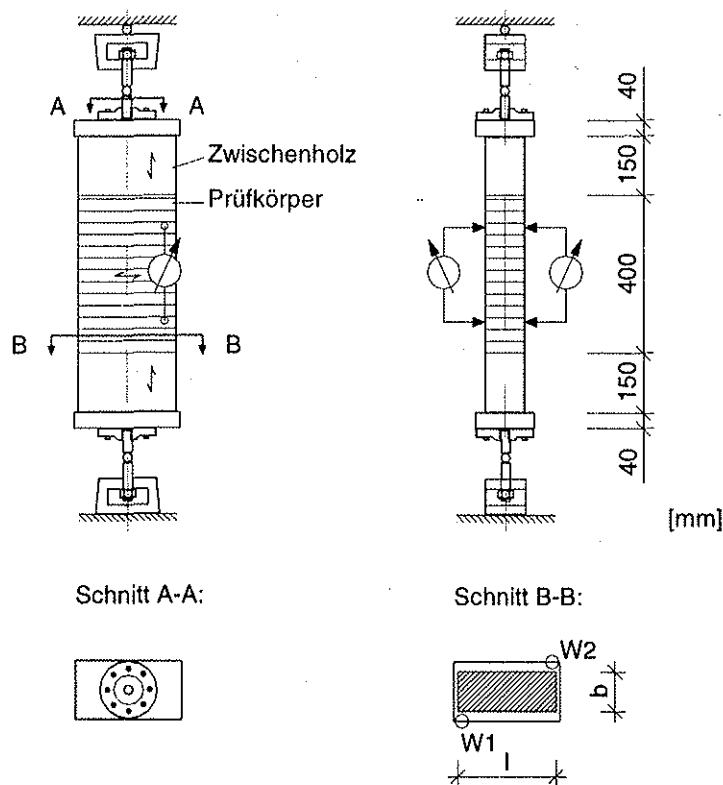
## 1.2 Prüfverfahren

In der DIN EN 1193 werden Prüfverfahren für die Ermittlung der Querkzugfestigkeit  $f_{t,90}$  und des Elastizitätsmoduls quer zur Faserrichtung  $E_{t,90}$  beschrieben. Diese Prüfverfahren beruhen im wesentlichen auf den Ergebnissen eines Forschungs-

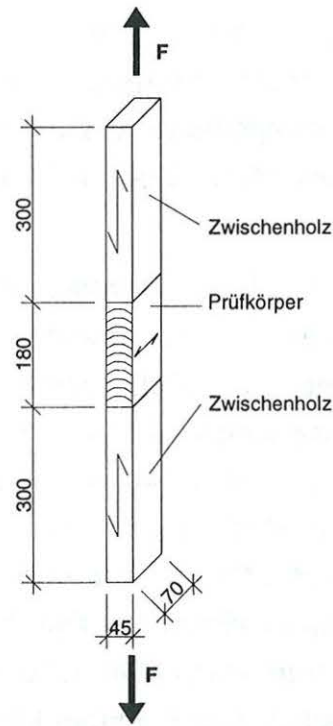


vorhabens von Ehlbeck und Kürth (1994). Um eine gleichmäßige Spannungsverteilung zu erreichen, werden Zwischenhölzer, die parallel zur Faserrichtung beansprucht werden, mit einem Zweikomponentenklebstoff an die eigentlichen Prüfkörper angeklebt. Bild 1-2 zeigt den Versuchsaufbau für Brettschichtholz, Bild 1-3 den Versuchsaufbau für Vollholz.

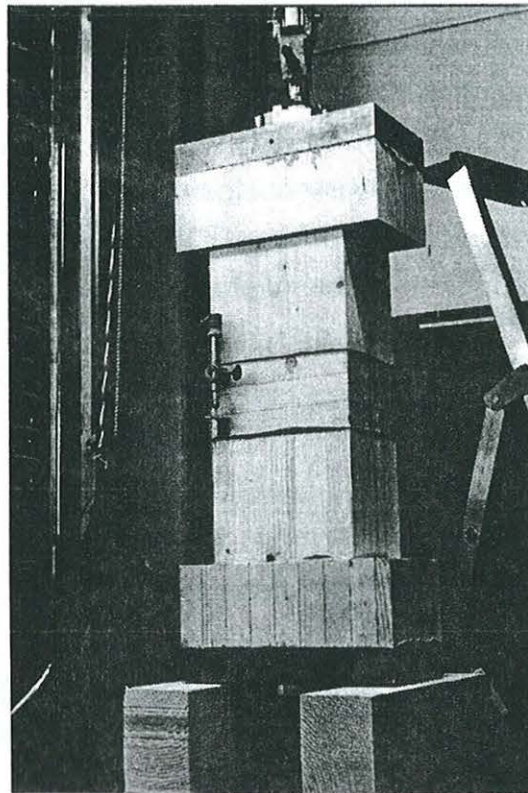
Da die Höhe  $h$  der Prüfkörper aus Brettschichtholz nach DIN EN 1193 mit 40 cm vorgegeben ist, muß folglich auch die querzugbeanspruchte Fläche immer  $250 \text{ cm}^2$  betragen, um das Bezugsvolumen von  $10000 \text{ cm}^3 = 0,01 \text{ m}^3$  der Brettschichtholzkörper nach Eurocode 5 zu untersuchen. Da unterschiedliche Abmessungen  $b \cdot l$  nach Bild 1-2 geprüft wurden, hätte die aufwendig herzustellende Klebung zwischen Stahlplatte und Zwischenholz mehrfach ausgeführt werden müssen. Deshalb wurde die Versuchsanordnung nach Bild 1-2 geändert, und ein weiteres Zwischenholz mit den Abmessungen der Stahlplatte eingefügt. Der für alle Prüfungen von Brettschichtholzkörpern verwendete Versuchsaufbau ist dem Foto in Bild 1-4 zu entnehmen, hier am Beispiel eines Versuches mit einem kleineren querzugbeanspruchten Volumen.



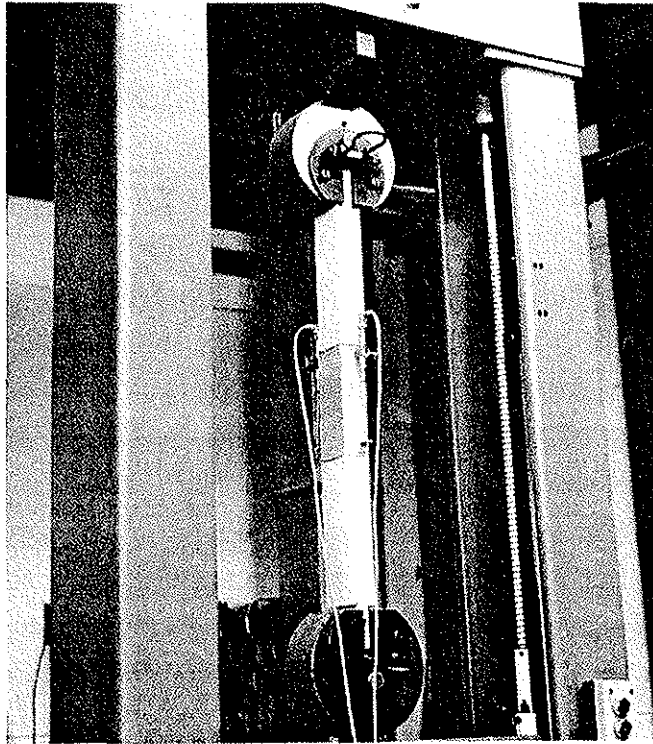
**Bild 1-2:** Versuchsaufbau für die Prüfkörper aus Brettschichtholz



**Bild 1-3:** Versuchsanordnung für Vollholz



**Bild 1-4:** Versuchsaufbau für Brettschichtholz, hier mit einem Prüfkörper aus drei Lamellen



**Bild 1-5:** Foto eines Versuches mit Vollholz

Die Wegaufnehmer werden nahe den Ecken an diagonal gegenüberliegenden Stellen angebracht. Bei der Auswertung werden die Wege gemittelt. Der Elastizitätsmodul quer zur Faser  $E_{t,90}$  wird nach DIN EN1193 mit den Last-Verschiebungswerten bei 10% und 40% der maximalen Kraft  $F_{t,90,max}$  nach folgender Gleichung ermittelt:

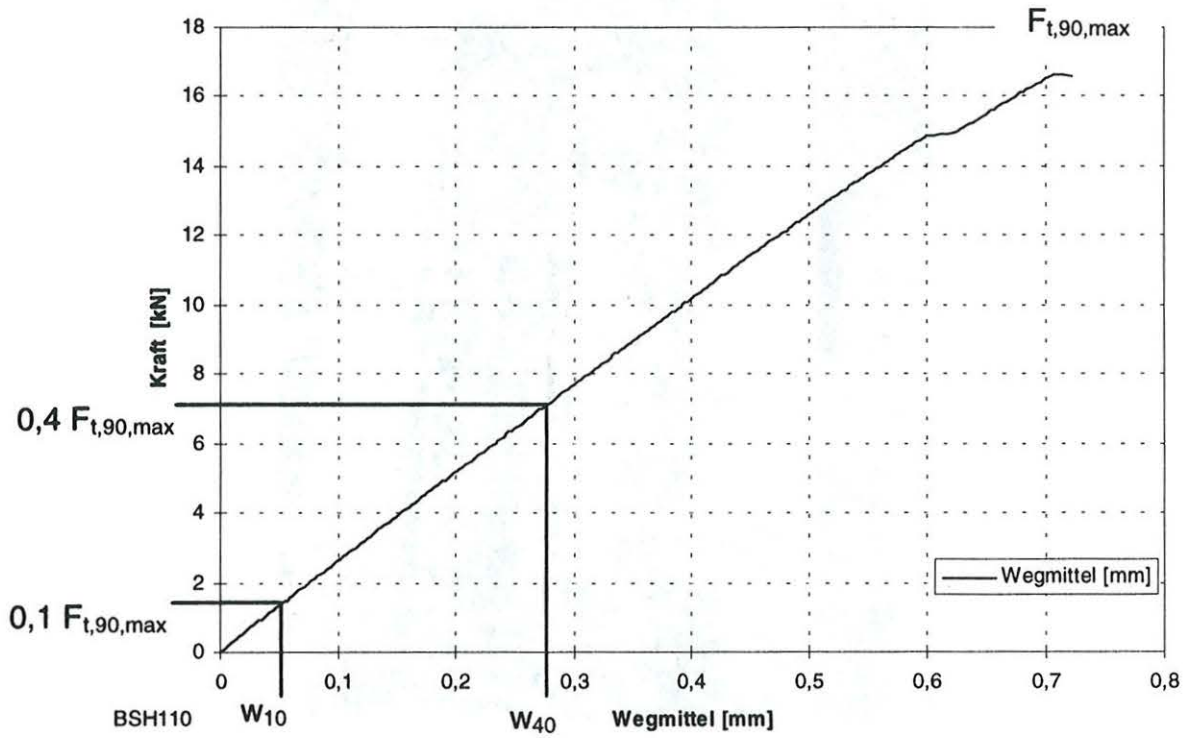
$$E_{t,90} = \frac{(F_{40} - F_{10}) h_0}{(w_{40} - w_{10}) b l} \quad (9),$$

dabei ist  $h_0$  die Meßlänge,  $b$  die Breite und  $l$  die Länge des Prüfkörpers. Die Querkzugfestigkeit selbst wird zu

$$f_{t,90} = F_{t,90,max} / (b l) \quad (10)$$

berechnet.

Bild 1-6 zeigt ein Diagramm eines Versuches mit den zur Auswertung herangezogenen Werten.



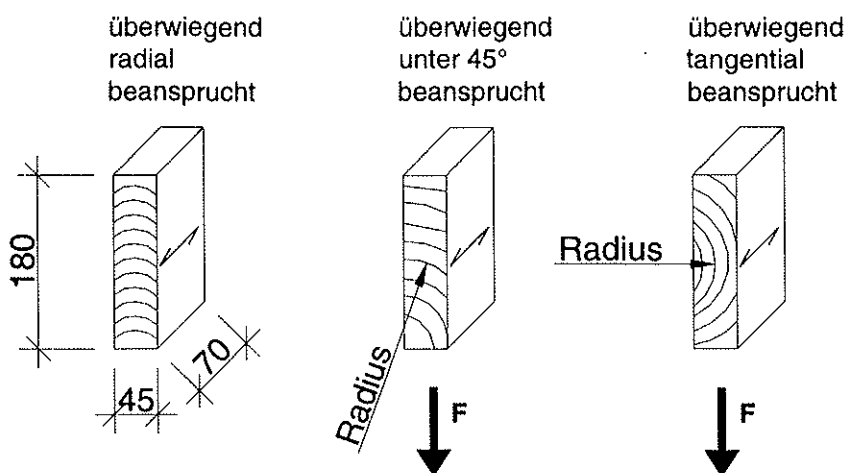
**Bild 1-6:** Last-Verformungsdiagramm eines Versuches mit einem 40 cm hohen Brettschichtholzkörper

## 2 Versuche mit Vollholz

### 2.1 Materialeigenschaften

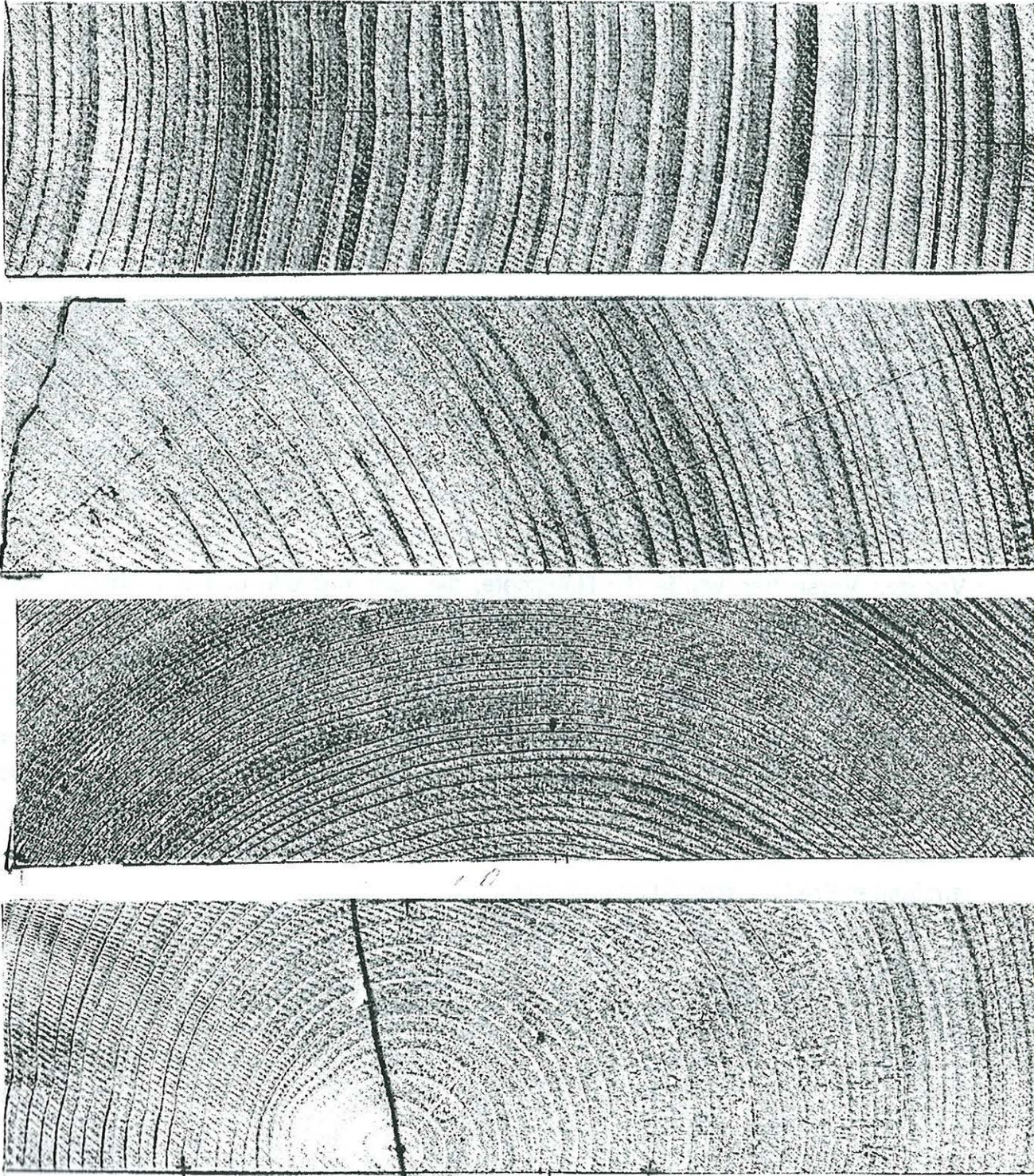
187 Versuche mit Vollholzprüfkörpern wurden durchgeführt. Das Holz wurde den Enden von Bohlen entnommen, deren Biegefestigkeit und Elastizitätsmodul parallel zur Faser im Rahmen eines anderen Vorhabens bestimmt wurden. Die Zuordnung der ermittelten Werte der Biegefestigkeit und des Elastizitätsmoduls war jedoch nicht mehr in allen Fällen möglich. Für diejenigen Prüfkörper, die nach Bild 2-1 überwiegend radial oder unter  $45^\circ$  beansprucht wurden, konnten der Elastizitätsmodul und die Biegefestigkeit nicht mehr ermittelt werden. Es wurden nahezu fehlerfreie Stücke entnommen, da angenommen wurde, daß Äste die Querkzugfestigkeit erhöhen. Die Prüfkörper wiesen keine sichtbaren Trockenrisse auf.

Vor den Versuchen wurde die Rohdichte, die Jahrringbreite und der Abstand der Mitte der Prüfkörper zur Markröhre ermittelt. Zur Ermittlung dieses Abstandes wurden Kopien der Querschnitte auf ein Digitalisierbrett gelegt, dann wurde ein Jahrring mit einem möglichst großen Bogenabschnitt mit einem CAD-System aufgenommen. Der Abstand dieses Jahrrings zum Mark wurde als Radius des Bogens bestimmt. Die Distanz in radialer Richtung zwischen diesem Jahrring und dem Mittelpunkt des Prüfkörpers wurde addiert bzw. subtrahiert. Bei den überwiegend radial beanspruchten Hölzern mit einem sehr kleinen Bogenabschnitt der Jahrringe sind die so ermittelten Werte vorsichtig zu bewerten.



**Bild 2-1:** Anordnung der Jahrringe bei den Prüfkörpern.





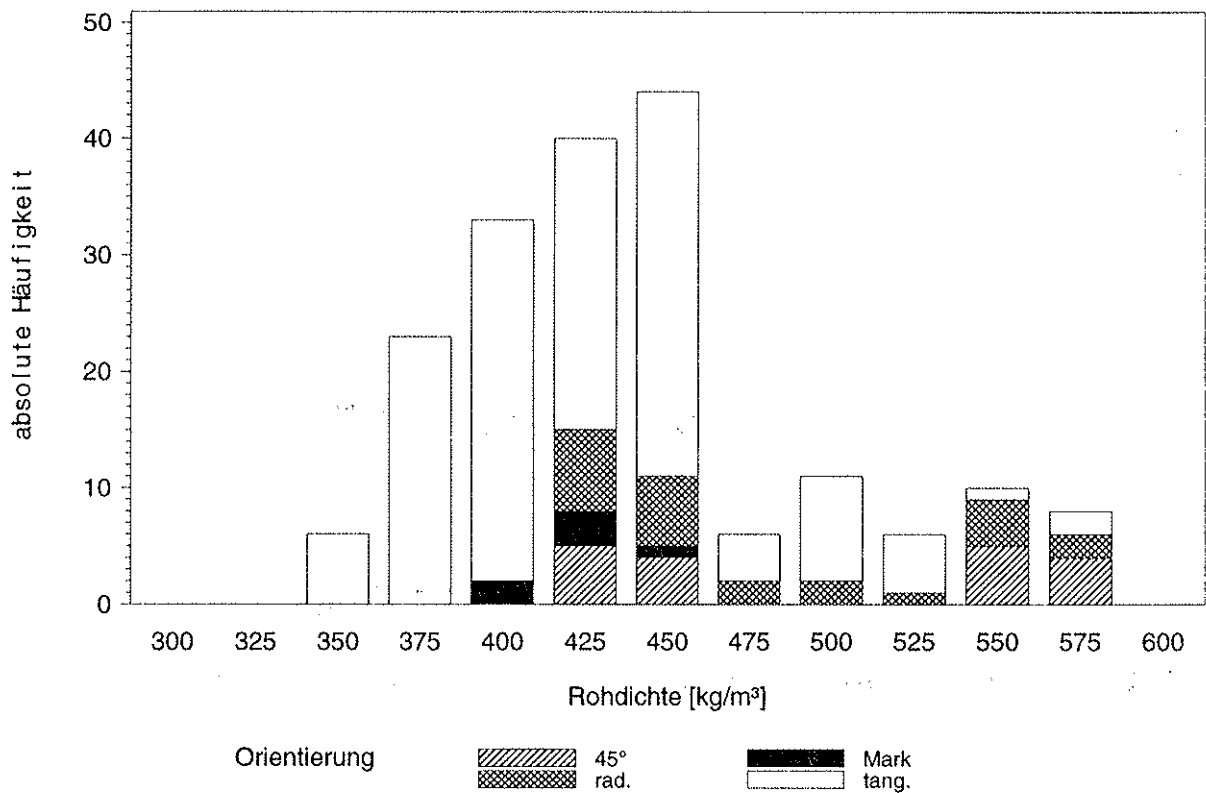
**Bild 2-2:** Prüfkörper überwiegend radial, unter 45°, tangential beansprucht und mit Mark (von oben nach unten)

In den folgenden Diagrammen und Tabellen sind die o.g. Eigenschaften zusammengefaßt. Der Parameter Orientierung berücksichtigt die überwiegende Beanspruchung nach Bild 2-1 und 2-2.

Da das Holz sehr lange im Normalklima 20/65-1 nach DIN 50014 gelagert worden war, wurde die Holzfeuchte nur bei einigen Prüfkörpern bestimmt. Der Mittelwert be-



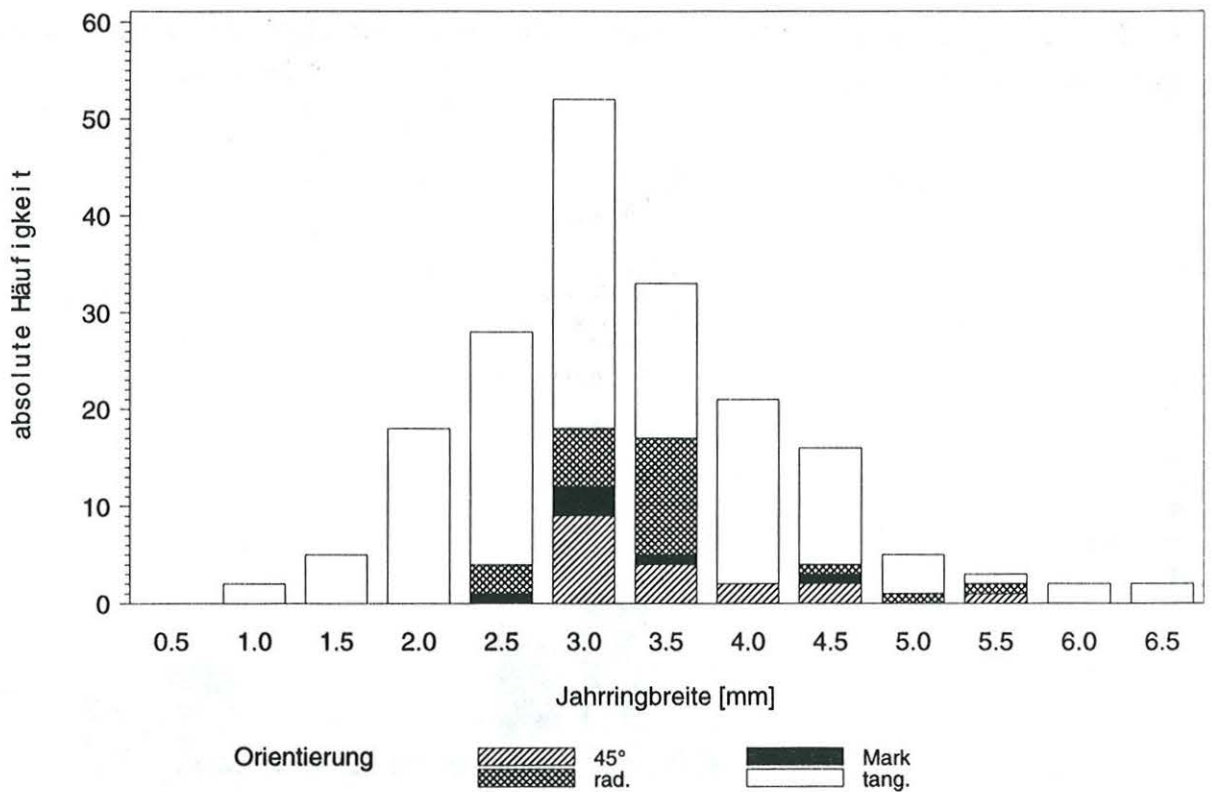
trug 12,5%, die Standardabweichung 0,20%. Die ermittelten Rohdichten  $\rho$  beziehen sich auf diese Holzfeuchte.



**Bild 2-3:** Häufigkeitsverteilung der Normalrohndichte

**Tabelle 2-1:** Normalrohndichte der Prüfkörper

Orientierung der Jahrringe nach Bild 2-1	Anzahl	Mittelwert [kg/m³]	Minimum [kg/m³]	Maximum [kg/m³]	5% - Fraktile [kg/m³]	Standardabweichg. [kg/m³]
radial beansprucht	24	477	423	569	423	52,1
unter 45° beansprucht	18	497	421	579	-	66,3
tangential beansprucht	139	427	341	579	364	45,7
mit Mark	6	423	401	453	-	19,0
alle zusammen	187	440	341	579	367	54,1

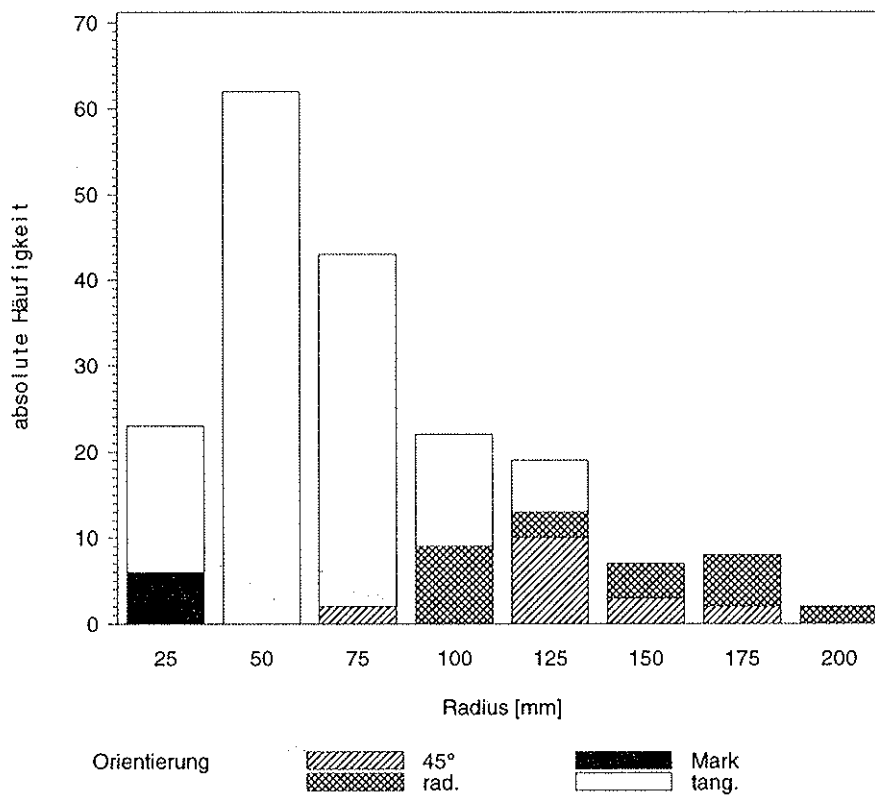


**Bild 2-4:** Häufigkeitsverteilung der mittleren Jahringbreite nach DIN 4074, Teil 1, Abs. 4.3

**Tabelle 2-2:** Mittlere Jahringbreite der Prüfkörper

Orientierung der Jahringe nach Bild 2-1	Anzahl	Mittelwert [mm]	Minimum [mm]	Maximum [mm]	5% - Fraktile [mm]	Standardabweichg. [mm]
radial beansprucht	24	3,5	2,4	5,4	2,5	0,7
unter 45° beansprucht	18	3,6	2,9	5,3	-	0,7
tangential beansprucht	139	3,2	1,1	6,4	1,7	1,0
mit Mark	6	3,3	2,7	4,4	-	
alle zusammen	187	3,3	1,1	6,4	1,9	1,0



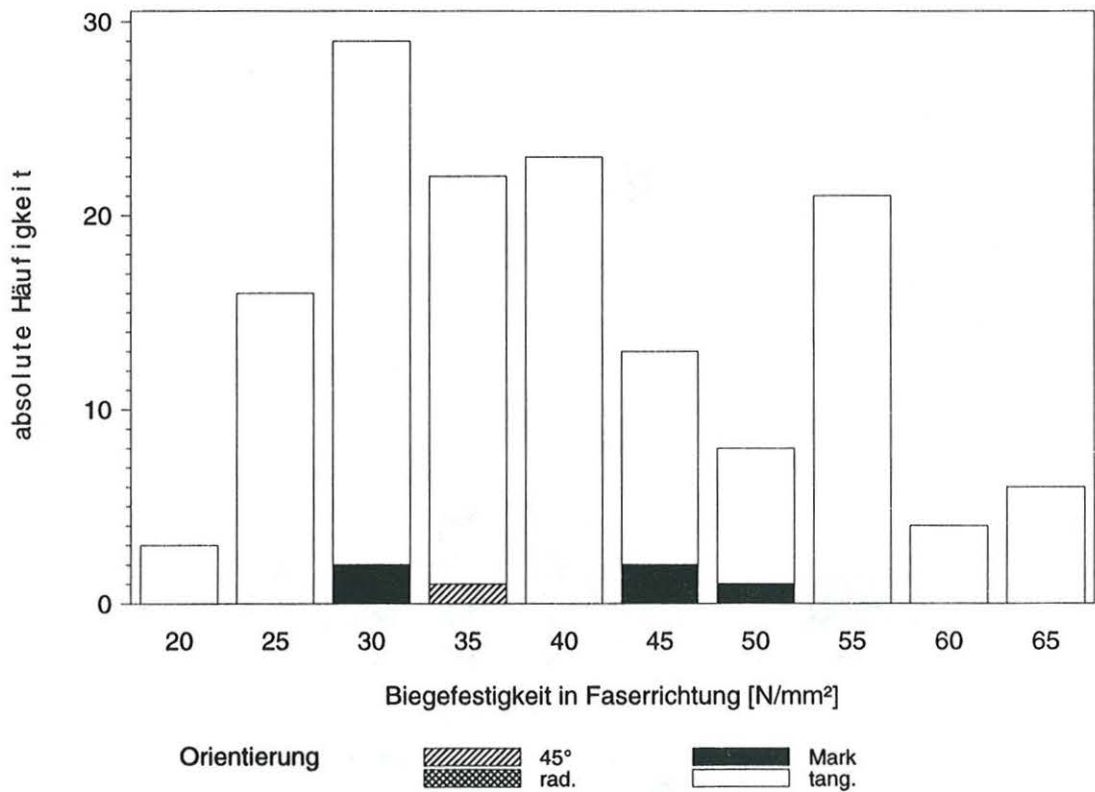


**Bild 2-5:** Häufigkeitsverteilung des Abstands zum Mark

**Tabelle 2-3:** Abstand des Querschnittschwerpunktes der Prüfkörper zum Mark nach Bild 2-1

Orientierung der Jahrringe nach Bild 2-1	Anzahl	Mittelwert [mm]	Minimum [mm]	Maximum [mm]	5% - Fraktile [mm]	Standardabweichg. [mm]
radial beansprucht	24	138	91	193	94	36
unter 45° beansprucht	17	127	68	171	-	26
tangential beansprucht	139	63	28	136	31	23
mit Mark	6	23	11	36	-	8
alle zusammen	186	77	11	193	31	40

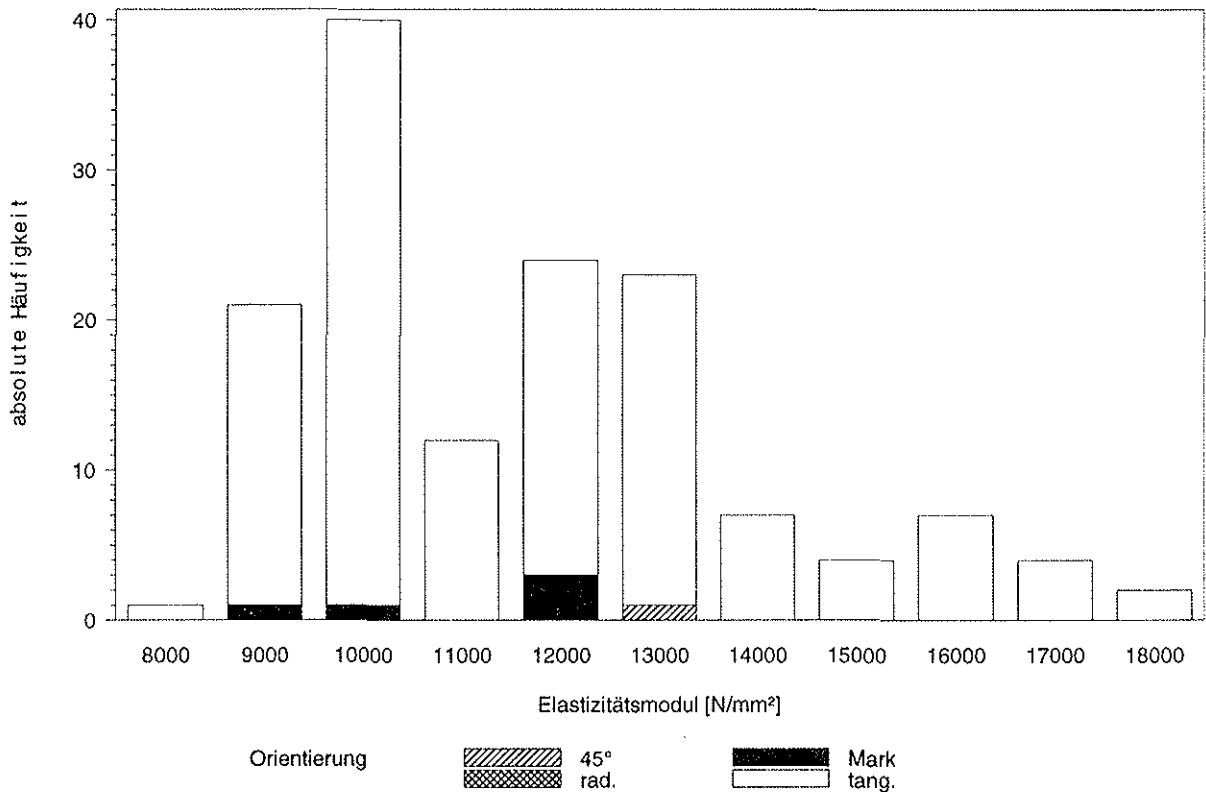
Wie bereits oben erwähnt, konnte die Zuordnung der Biegefestigkeit und des Elastizitätsmoduls in Faserrichtung nicht mehr in allen Fällen erfolgen. Dies betraf insbesondere die überwiegend radial oder unter 45° beanspruchten Hölzer.



**Bild 2-6:** Häufigkeitsverteilung der Biegefestigkeit in Faserrichtung

**Tabelle 2-4:** Biegefestigkeit in Faserrichtung der Prüfkörper

Orientierung der Jahrringe nach Bild 2-1	Anzahl	Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	Minimum [N/mm <sup>2</sup> ]	Maximum [N/mm <sup>2</sup> ]	5% - Fraktile [N/mm <sup>2</sup> ]	Standardabweichg. [N/mm <sup>2</sup> ]
unter 45° beansprucht	1	36,6				
tangential beansprucht	139	40,2	21,3	64,2	24,0	11,7
mit Mark	5	41,5	31,2	49,5	-	8,9
alle zusammen	145	40,2	21,3	64,2	24,0	11,6



**Bild 2-7:** Häufigkeitsverteilung des statischen Elastizitätsmoduls in Faserrichtung

**Tabelle 2-5:** statischer Elastizitätsmodul in Faserrichtung der Prüfkörper

Orientierung der Jahrringe nach Bild 2-1	Anzahl	Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	Minimum [N/mm <sup>2</sup> ]	Maximum [N/mm <sup>2</sup> ]	5% - Fraktile [N/mm <sup>2</sup> ]	Standardabweichg. [N/mm <sup>2</sup> ]
unter 45° beansprucht	1	12800				
tangential beansprucht	139	11700	8380	17600	9020	2180
mit Mark	5	11100	9350	12400	-	1430
alle zusammen	145	11700	8380	17600	9020	2150

In der Tabelle 2-6 sind die Korrelationskoeffizienten der verschiedenen Parameter zusammengefaßt. In der Anlage sind die entsprechenden Diagramme dargestellt.

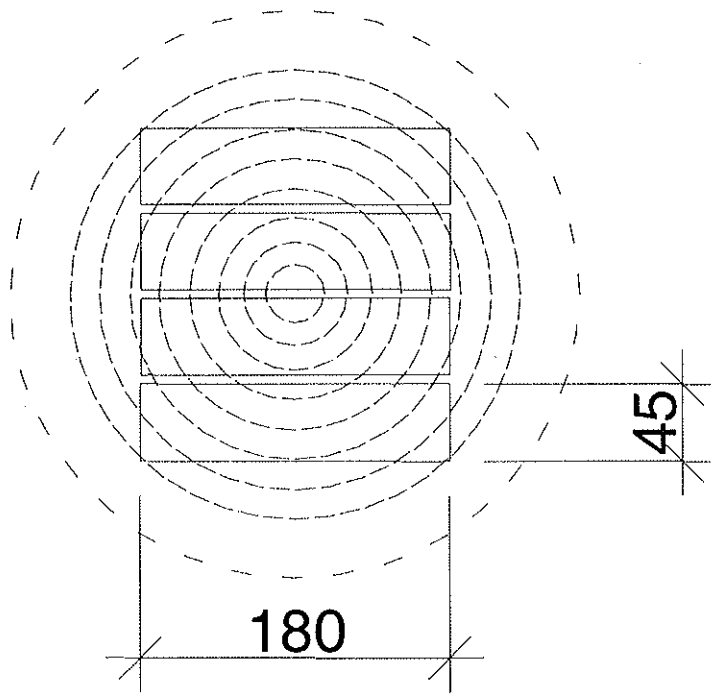
**Tabelle 2-6:** Korrelationskoeffizienten der vor den Querkzugversuchen bestimmten Parameter

	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Jahr- ringbreite [mm]	Biegefestigkeit in Faserrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]	E-modul in Faserrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]	Abstand zum Mark [mm]
Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	-	-0,235	0,398	0,492	0,424
Jahrringbreite [mm]	-0,235	-	-0,521	-0,516	-0,025
Biegefestig- keit in Faser- richtung [N/mm <sup>2</sup> ]	0,398	-0,521	-	0,853	0,309
E-modul in Faserrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]	0,492	-0,516	0,853	-	0,330
Abstand zum Mark [mm]	0,439	-0,036	0,304	0,329	-

Aus den dargestellten Häufigkeitsverteilungen ist ersichtlich, daß die Teilmenge der Versuchskörper die Grundgesamtheit der Eigenschaften recht gut erfaßt.

Inwiefern dies auch für die Unterscheidung in die verschiedenen Beanspruchungsrichtungen nach Bild 2-1 zutrifft, ist schwierig zu beurteilen. Die Wahrscheinlichkeit, daß eine Bohle mit einer Dicke von 45 mm und einer Höhe von 180 mm als Seitenbrett aus dem Stamm geschnitten wird, ist bei den üblichen zum Einschlag kommenden Baumdurchmessern sicherlich groß. Ein Seitenbrett wie im Bild 2-8 dargestellt, wird in den Querkzugversuchen überwiegend tangential beansprucht. Insofern kann davon ausgegangen werden, daß auch die Häufigkeitsverteilung der Beanspruchungsrichtungen für den vorgeschriebenen Querschnitt von 45 mm x 180 mm repräsentativ ist.

In den Abschnitten 2.2 und 2.3 wird gezeigt, daß die mechanischen Eigenschaften von der Beanspruchungsrichtung der Prüfkörper beeinflußt werden. Deshalb erfolgt die Auswertung in diesen Abschnitten getrennt je nach Beanspruchungsrichtung und für alle Prüfkörper gemeinsam.



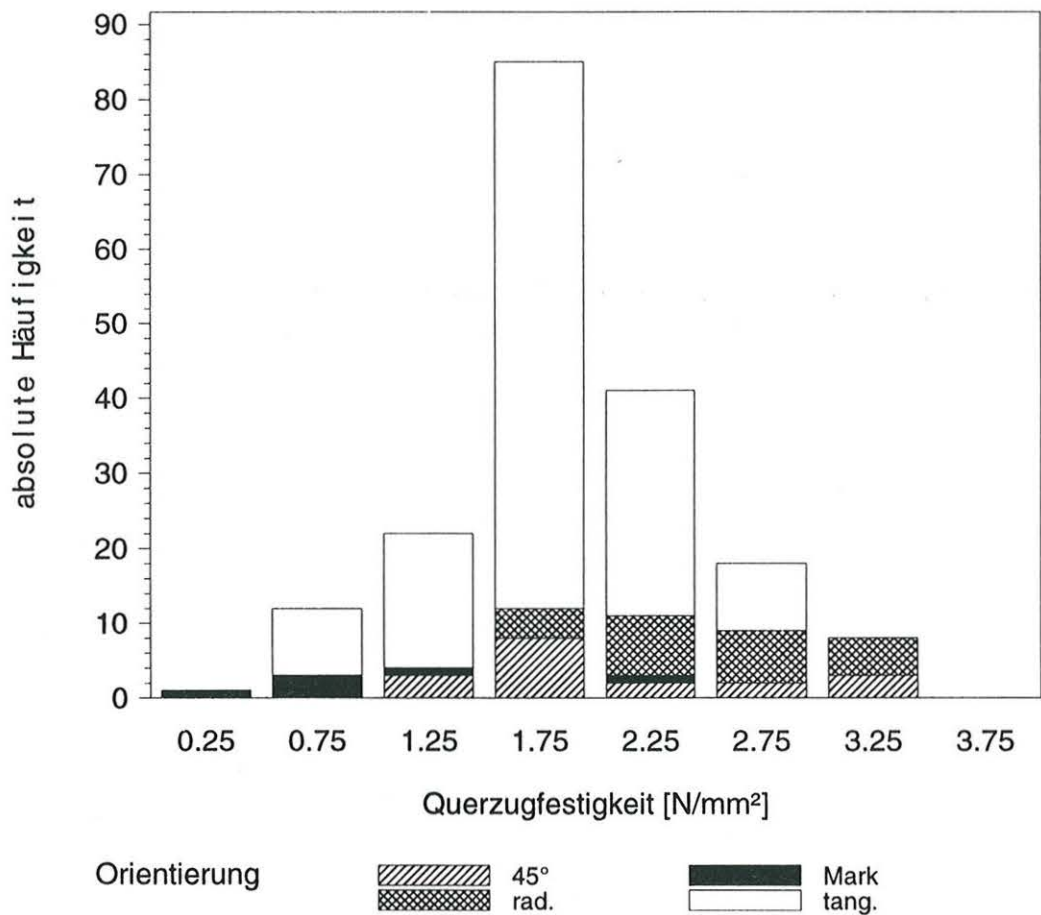
**Bild 2-8:** Wahrscheinliches Einschnittmuster für den gegebenen Querschnitt

## 2.2 Querkzugfestigkeit von Vollholz

In Bild 2-9 ist die Verteilung der ermittelten Werte der Querkzugfestigkeit  $f_{t,90}$  enthalten, berechnet nach EN 1193 mit

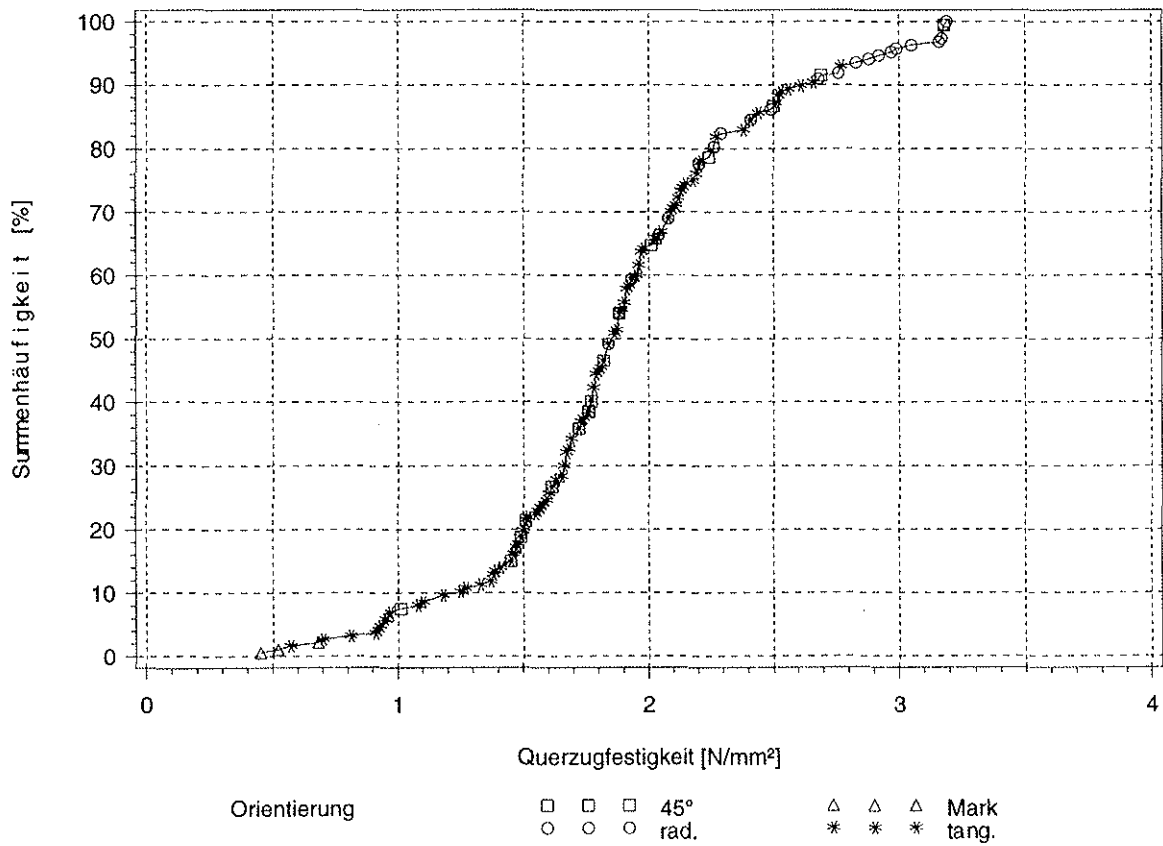
$$f_{t,90} = F_{t,90,max} / (b \cdot l) \quad (11).$$

Zur Berechnung der querkzugbeanspruchten Fläche wurden die vor den Versuchen gemessenen Werte  $b \cdot l$  verwendet (Bild 1-1 bis 1-3). Diese wichen um wenige zehntel Millimeter von den in der Norm geforderten Werten  $b = 45 \text{ mm}$  und  $l = 70 \text{ mm}$  ab.



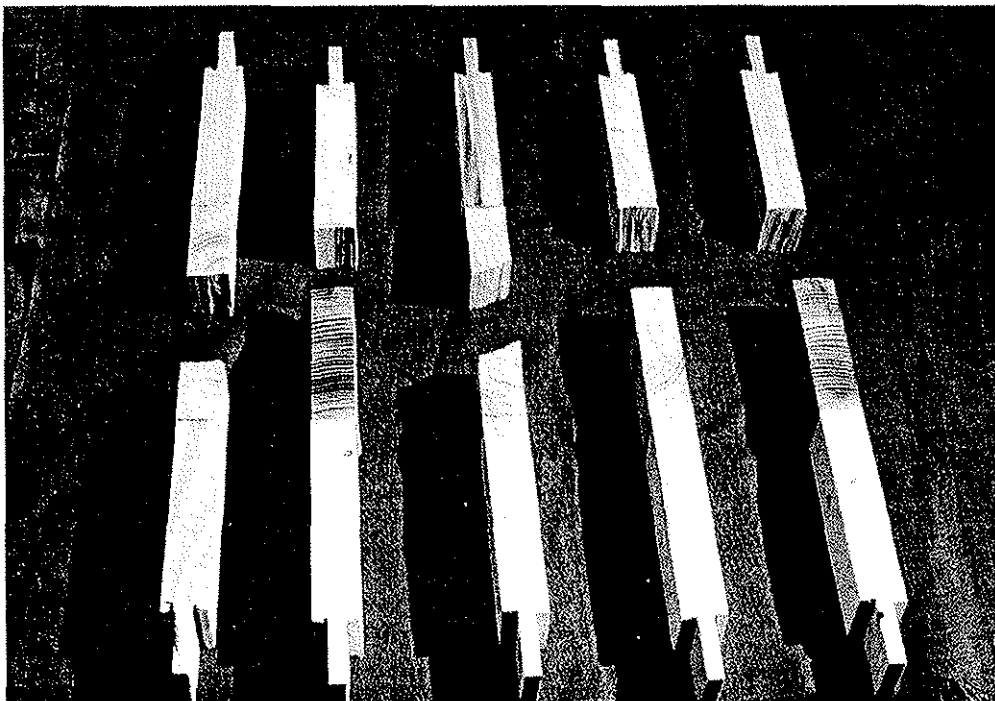
**Bild 2-9:** Häufigkeitsverteilung der Querkzugfestigkeit

Bild 2-10 enthält die kumulierte Häufigkeit der Querkzugfestigkeit.



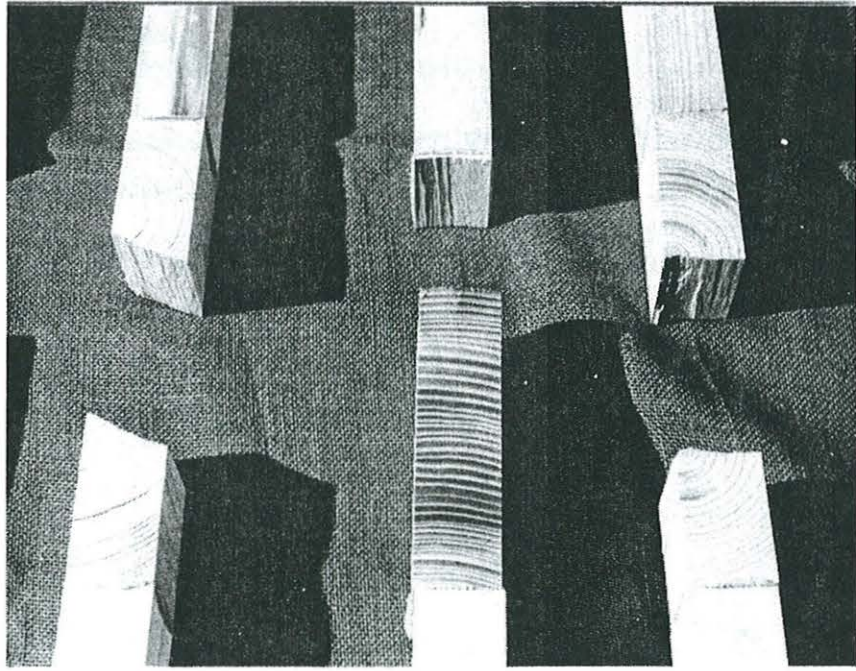
**Bild 2-10:** kumulierte Häufigkeit der Querzugfestigkeit

Die Bilder 2-11 und 2-12 zeigen die beobachteten Bruchbilder:



**Bild 2-11:** Beispiele für Bruchbilder





**Bild 2-12:** Die drei rechten Prüfkörper des Bildes 2-11 im Detail

Der Bruch fand bei 53 % aller Prüfkörper in unmittelbarer Nähe der Klebfuge zwischen Prüfkörper und Zwischenholz statt. Der Anteil der Klebfläche an der Bruchfläche war bei diesen Brüchen jedoch sehr gering. An der Klebfläche blieb immer eine dünne Schicht Holzfasern kleben.

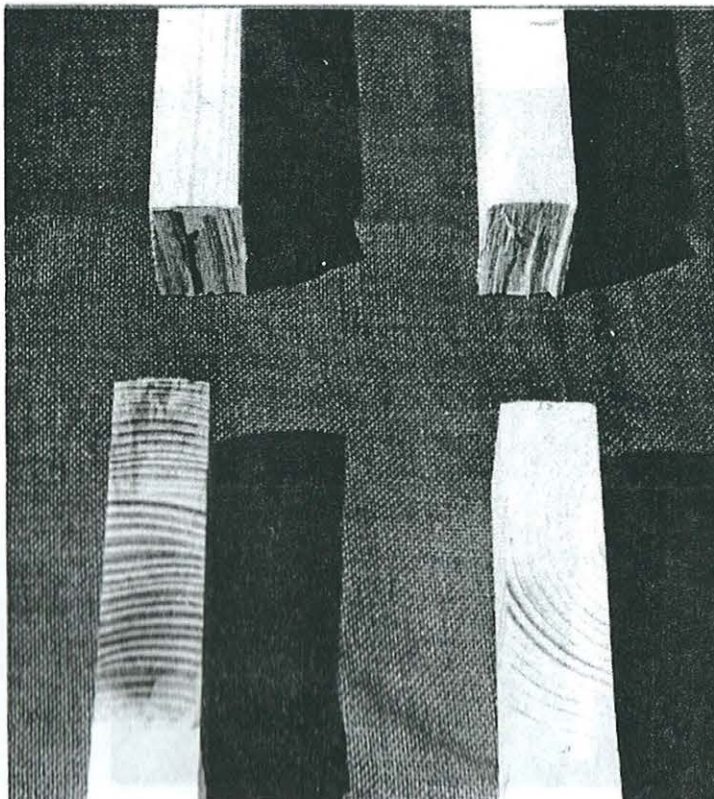
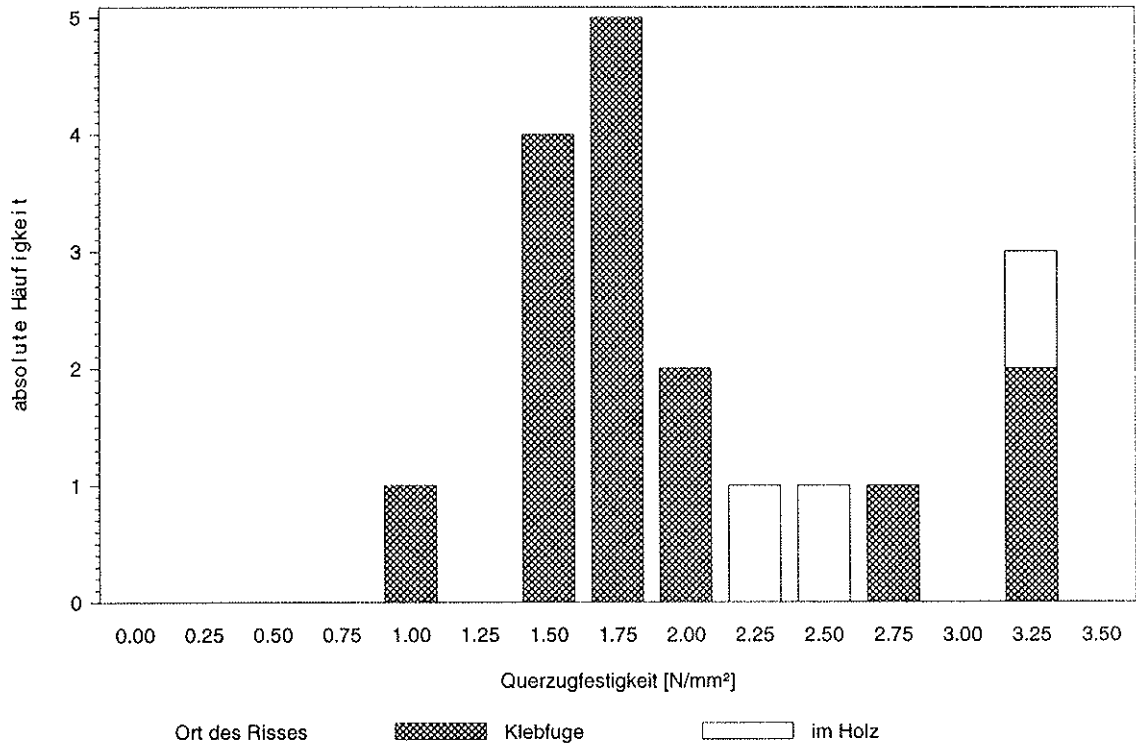


Bild 2-13 zeigt zwei typische Brüche nahe der Klebfuge.

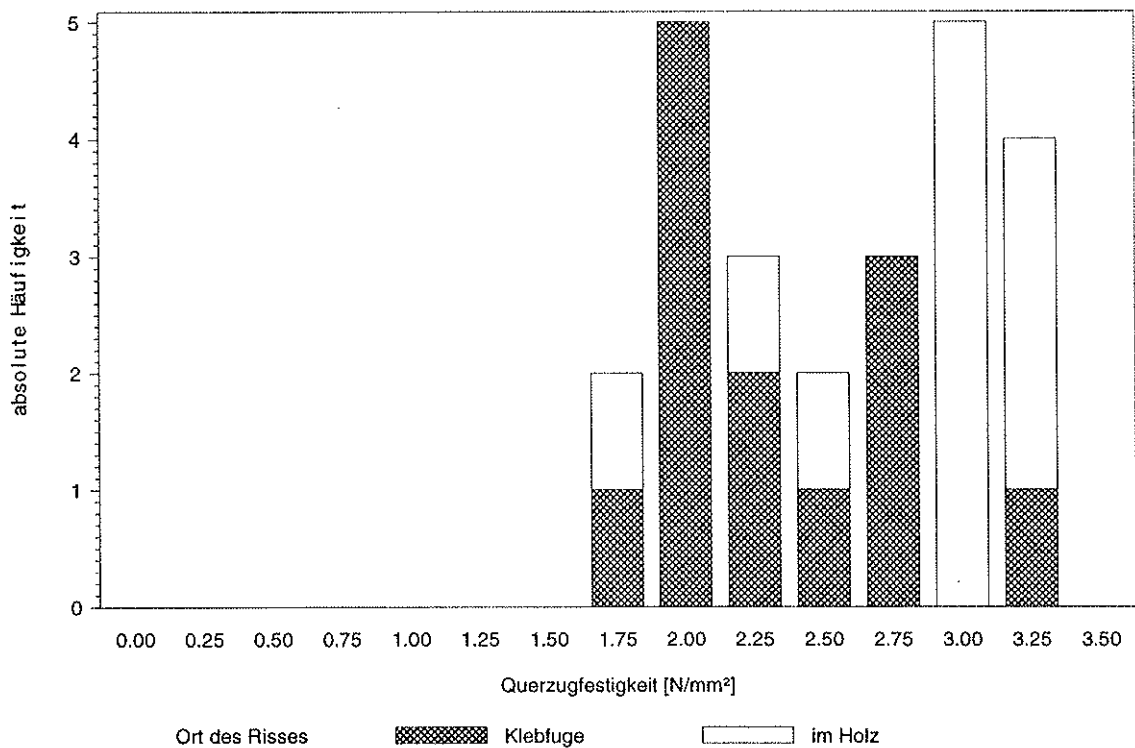
**Bild 2-13:** Brüche in unmittelbarer Nähe der Klebfuge



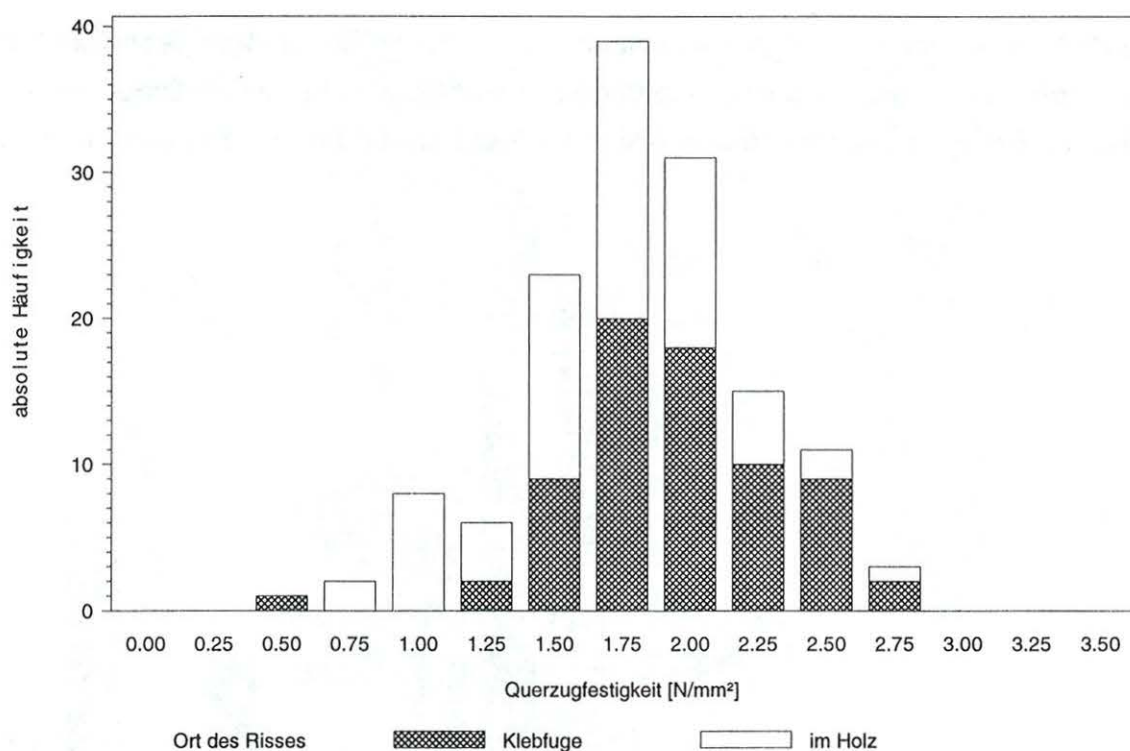
Die Bilder 2-14 bis 2-16 zeigen die Häufigkeitsverteilung der Querkzugfestigkeit für die verschiedenen Beanspruchungsrichtungen nach Bild 2-1. In diesen Diagrammen ist zwischen Brüchen in unmittelbarer Nähe der Klebfuge und im Holz unterschieden.



**Bild 2-14:** Beanspruchung überwiegend unter  $45^\circ$



**Bild 2-15:** Beanspruchung überwiegend radial



**Bild 2-16:** Beanspruchung überwiegend tangential

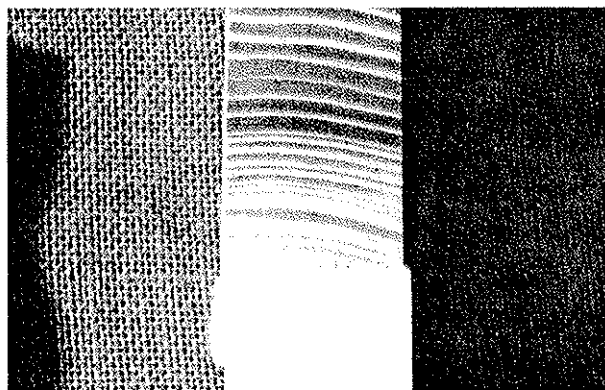
In Tabelle 2-7 sind die Mittelwerte der Querzugfestigkeit getrennt nach Beanspruchungsrichtung und Ort des Risses zusammengefaßt.

**Tabelle 2-7:** Mittelwerte der Querzugfestigkeit

Orientierung der Jahrringe nach Bild 2-1	Riß an Klebfuge		Riß im Holz	
	$f_{t,90,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Anzahl	$f_{t,90,mean}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Anzahl
radial	2,33	13	2,81	11
unter 45°	1,92	15	2,64	3
tangential	1,94	71	1,65	68
mit Mark	-	-	1,02	6
alle Richtungen	1,99	99	1,79	88

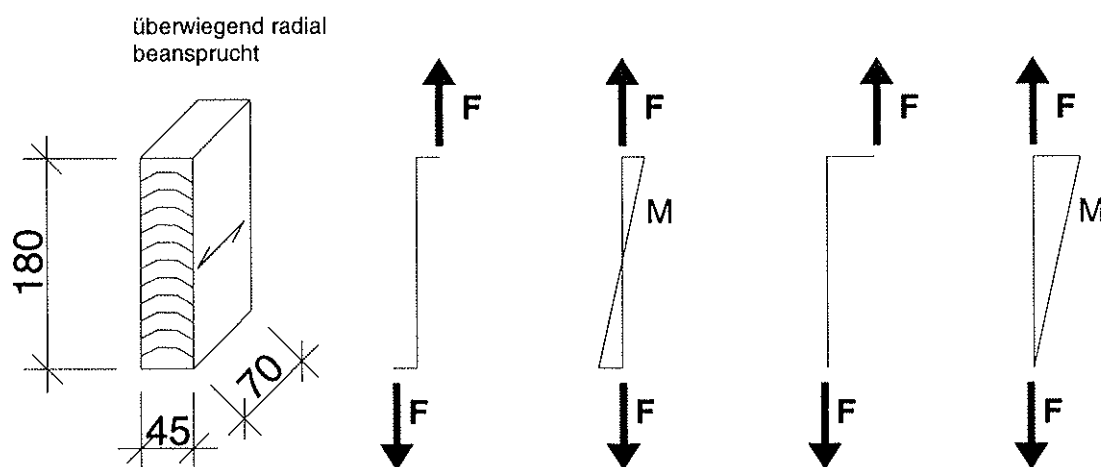
Die mittlere Querzugfestigkeit der überwiegend radial und unter 45° beanspruchten Prüfkörper ist bei den Hölzern, die an der Klebfuge brachen, geringer als bei denjenigen die im Holz brachen. Bei den überwiegend tangential beanspruchten ist das Verhältnis umgekehrt.

Für das häufige Brechen in der unmittelbaren Nähe der Klebestelle können Exzentrizitäten bei der Herstellung der Prüfkörper oder bei der Krafteinleitung verantwortlich sein. Bild 2-17 zeigt eine Klebestelle, die eine Exzentrizität aufweist.



**Bild 2-17:** Exzentrizität an der Klebestelle

Durch diese Exzentrizitäten werden zusätzlich zur planmäßigen Querkzugbeanspruchung Biegespannungen rechtwinklig zur Faserrichtung verursacht. Diese können bei einer Verteilung der Exzentrizitäten nach Bild 2-18 an der Klebestelle am größten sein, so daß hier der Bruch eintritt. Dieser Fehler kann als zufälliger Fehler angesehen werden.

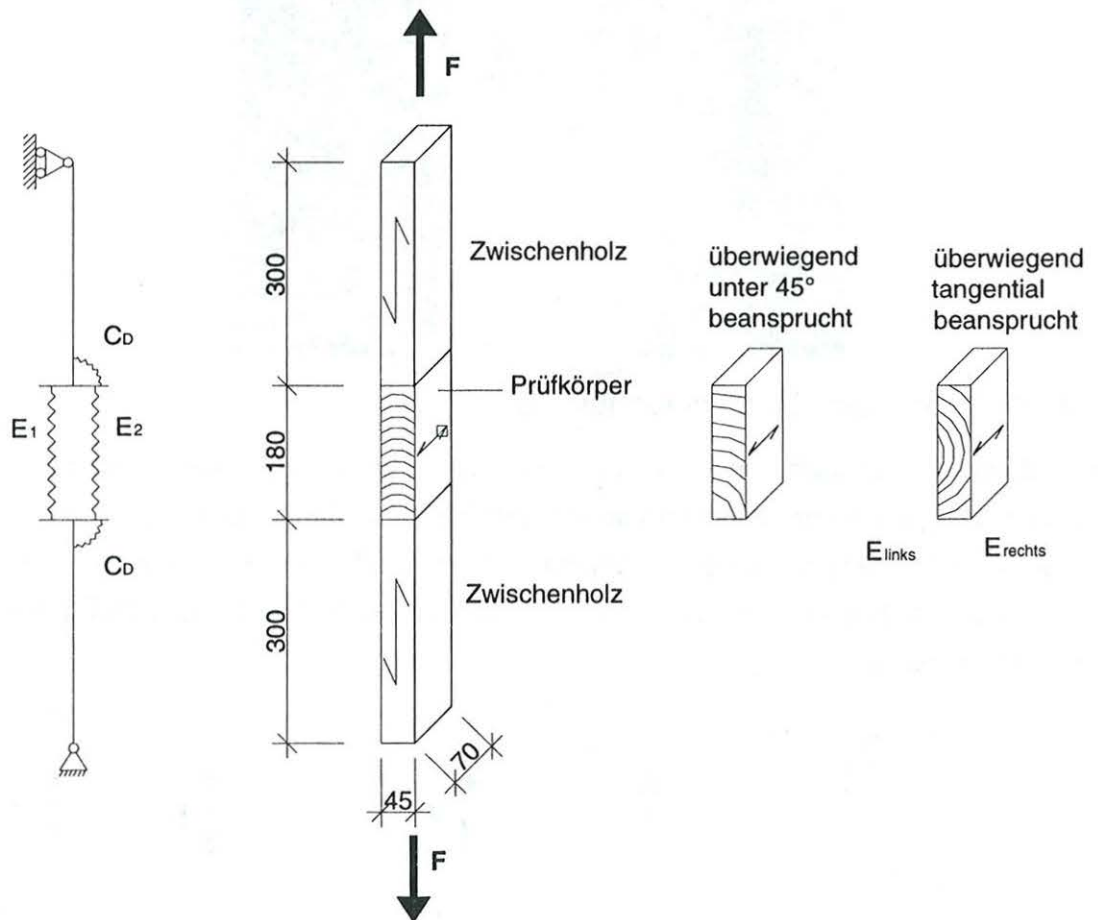


**Bild 2-18:** Zusatzmomente infolge Exzentrizität

Ungleichförmige Spannungsverteilungen können auch durch die unterschiedliche Anordnung der Jahrringe verursacht werden, die zu einem anisotropen Materialaufbau führen. Dies wäre als systematischer Fehler zu bezeichnen.

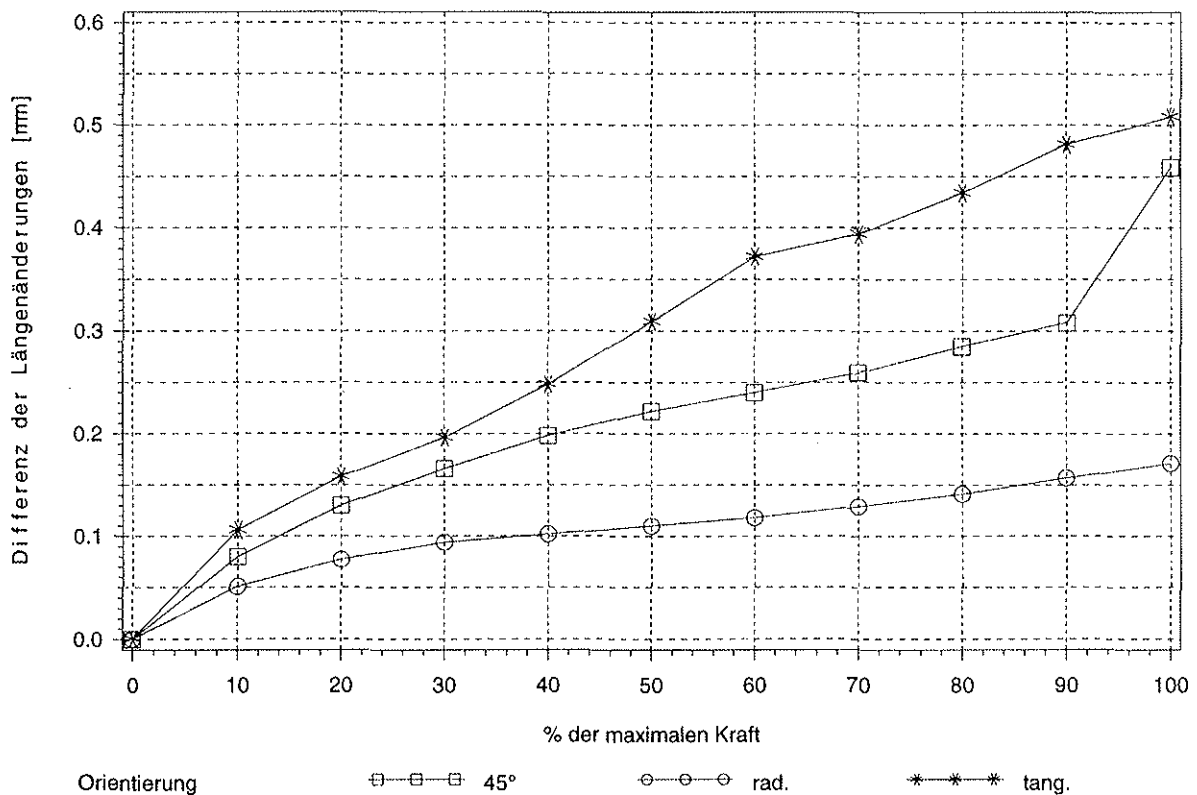
In Abschnitt 2.3 wird gezeigt, daß die radial beanspruchten Prüfkörper eine größere Steifigkeit aufweisen als die tangential beanspruchten. Da sich der Prüfkörper nicht ungehindert krümmen kann, führt dies auf der Seite mit der größeren Steifigkeit zu höheren Spannungen, siehe hierzu auch das Federmodell in Bild 2-19. Diejenige

Seite, an der die Jahrringe unter einem größeren Winkel angeschnitten sind, weisen eine höhere Steifigkeit auf. Dies ist diejenige Seite, die dem Mark zugewendet ist, bei Seitenbrettern wird sie üblicherweise als rechte Seite bezeichnet.



**Bild 2-19:** Modell zur ungleichförmigen Spannungsverteilung der Prüfkörper

Diese Annahmen werden durch das Diagramm in Bild 2-20 bestätigt. In 10% Schritten der maximalen Kraft ist hier der Mittelwert der Differenz der Längenänderung auf den beiden gegenüberliegenden Seiten der Prüfkörper aufgetragen. Deutlich zu sehen ist, daß die Differenz der Längenänderung bei den tangential beanspruchten Prüfkörpern am größten ist.



**Bild 2-20:** Mittelwerte der Differenz der Längenänderung in Abhängigkeit von der Beanspruchung

Um die Größenordnung der Spannungsunterschiede abschätzen zu können, wurden Finite Elemente Berechnungen durchgeführt, bei denen zwischen radialer, tangentialer und faserparalleler Richtung unterschieden wurde. Dabei wurde der ebene Verzerrungszustand zugrundegelegt, der aufgrund der sehr hohen Steifigkeit in Faserrichtung bereits in kurzer Entfernung vom Hirnholz den vorhandenen räumlichen Spannungszustand genauer erfassen kann als der ebene Spannungszustand.

Die verwendete Elastizitätsmatrix orientiert sich an den von Neuhaus (1981) an fehlerfreiem Vollholz bei 12% Holzfeuchte ermittelten Elastizitätszahlen.

Der Index 1 bezeichnet die radiale Richtung, 2 die tangentiale und 3 die faserparallele. Der erste Index gibt die Richtung der Flächennormalen an, der zweite die Richtung des Spannungs- oder Verzerrungsvektors. Die Materialeigenschaften beziehen sich auf ein zylindrisches Koordinatensystem.

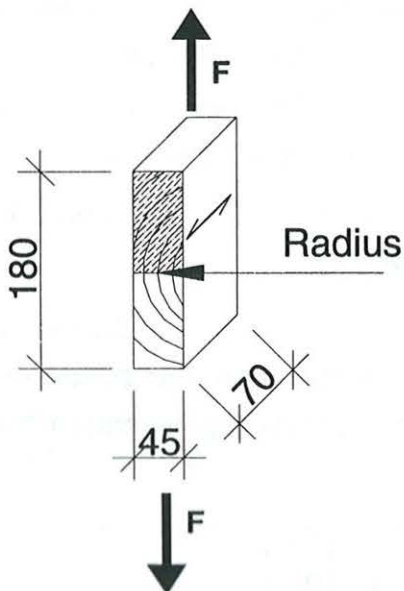
$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} & 0 & 0 & 0 \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} & 0 & 0 & 0 \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix}$$



$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,25 \cdot 10^{-3} & -750 \cdot 10^{-6} & -50,0 \cdot 10^{-6} & 0 & 0 & 0 \\ -750 \cdot 10^{-6} & 5,0 \cdot 10^{-3} & -75 \cdot 10^{-6} & 0 & 0 & 0 \\ -50,0 \cdot 10^{-6} & -75 \cdot 10^{-6} & 83,33 \cdot 10^{-6} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 25 \cdot 10^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1,43 \cdot 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,43 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix}$$

Für den Elastizitätsmodul bei tangentialer Beanspruchung,  $E_2 = 1 / a_{22}$  in obenstehender Matrix, gibt Neuhaus  $420 \text{ N/mm}^2$  an. Dieser wurde in Anlehnung an die Versuche mit überwiegend tangentialer Beanspruchung, siehe Abschnitt 2.3, in  $E_2 = 200 \text{ N/mm}^2$  geändert. Die übrigen von Neuhaus ermittelten Elastizitätszahlen, das sind die  $a_{ij}$ -Werte obenstehender Matrix, wurden beibehalten. Die oben gegebene Elastizitätsmatrix unterscheidet sich damit, abgesehen von Rundungen, nur an der Stelle  $a_{22}$  von den von Neuhaus ermittelten Werten. Rechnet man mit  $E_2 = 420 \text{ N/mm}^2$  nach Neuhaus, werden die Spannungsunterschiede zwischen den gegenüberliegenden Seiten geringer.

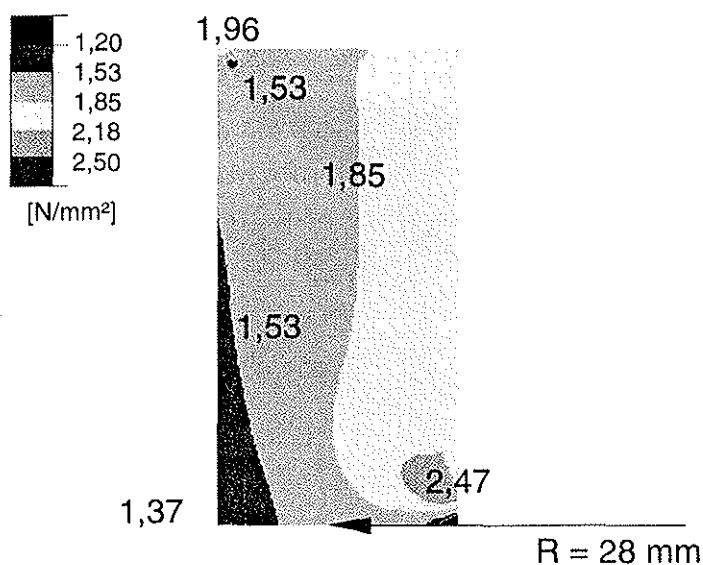
Über die Zwischenhölzer wurden Kräfte eingeleitet, die bei gleichmäßiger Spannungsverteilung eine Spannung von  $1,8 \text{ N/mm}^2$  erzeugen würden. Dies entspricht dem Mittelwert der ermittelten Querkzugfestigkeit der tangential beanspruchten Prüfkörper



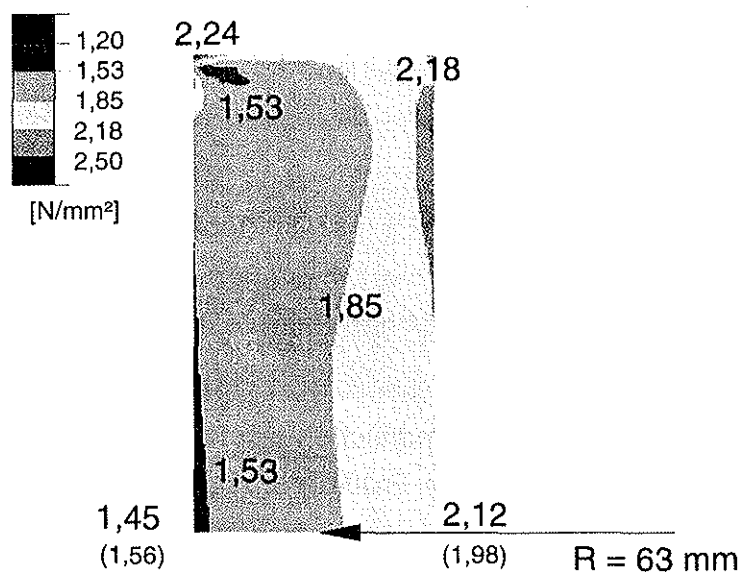
In den Bildern 2-22 bis 2-24 sind die Spannungsverteilungen für den halben Querschnitt, in Bild 2-21 der schraffierte Bereich, dargestellt. In Bild 2-23 sind in Klammern die Werte für den höheren E-Modul  $E_2 = 420 \text{ N/mm}^2$  in tangentialer Richtung enthalten.

Der Abstand des Zentrums des zylindrischen Koordinatensystems zum Schwerpunkt des Prüfkörpers ist mit  $R$  gekennzeichnet.

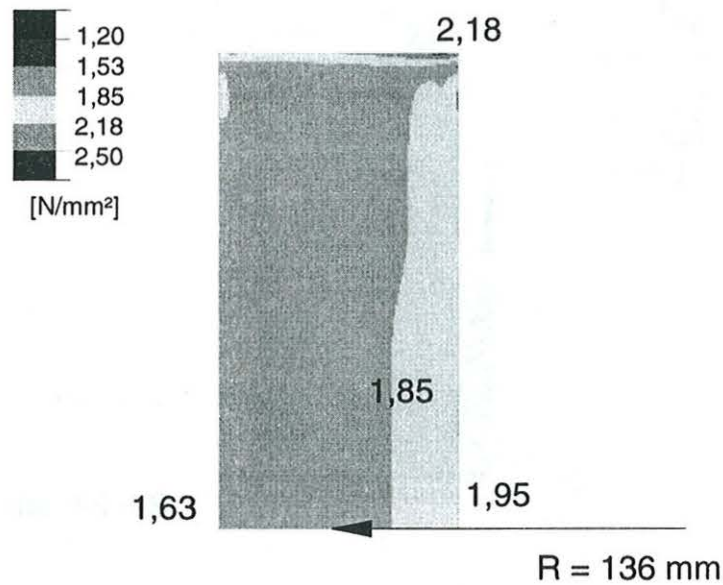
**Bild 2-21:** Dargestellter Bereich der FE-Berechnung



**Bild 2-22:** Spannungsverteilung nach FE-Berechnung für einen überwiegend tangential beanspruchten Prüfkörper, Abstand zum Mark 28,0 mm



**Bild 2-23:** Spannungsverteilung nach FE-Berechnung für einen überwiegend tangential beanspruchten Prüfkörper, Abstand zum Mark 63,0 mm



**Bild 2-24:** Spannungsverteilung nach FE-Berechnung für einen überwiegend tangential beanspruchten Prüfkörper, Abstand zum Mark 136 mm

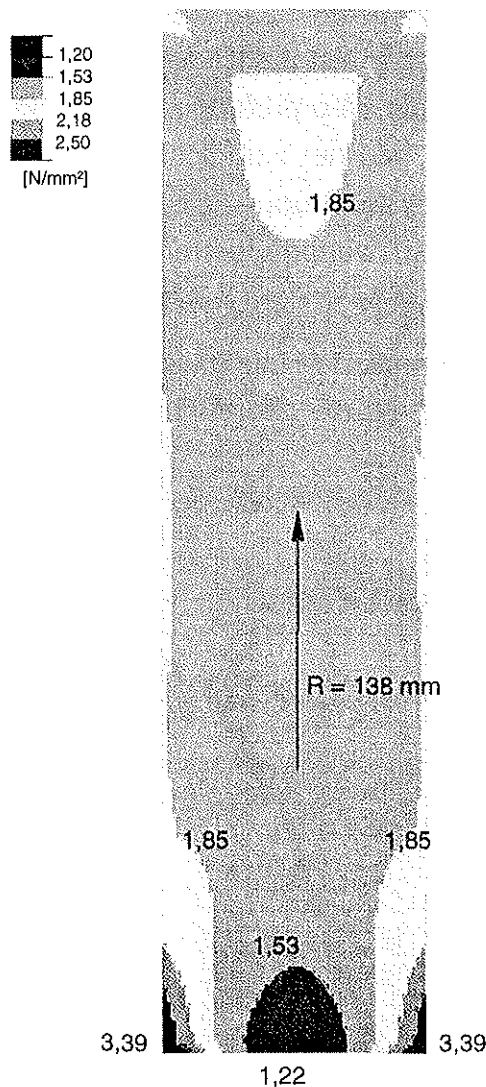
Diese ungleichförmigen Spannungsverteilungen führen zu einer Unterschätzung der Querkzugfestigkeit. An den Stellen höherer Spannung wird die Rißentstehung begünstigt, der instabile Rißwachstum folgt.

Die FE-Berechnungen zeigten auch, daß an der Klebefuge zwischen Zwischenholz und Prüfkörper Spannungskonzentrationen entstehen. Das häufige Brechen an der Klebefuge kann neben den beschriebenen Exzentrizitäten auch hierdurch erklärt werden.

Bei der FE-Berechnung wurde ein zylindrisches Koordinatensystem verwendet, dessen Zylinderachse auf die Hälfte der Prüfkörperhöhe gelegt wurde. Bei den verwendeten Prüfkörpern ist diese Annahme nicht immer eingehalten. In der Anlage sind Kopien sämtlicher Hölzer dargestellt. Die Spannungsverteilungen nach der FE-Berechnung können deswegen und aufgrund des verwendeten Elastizitätsgesetzes, dessen Werte von Neuhaus (1981) an kleinen, sehr homogenen Prüfkörpern ermittelt wurden, nur als Näherungen der tatsächlichen Spannungsverteilungen angesehen werden.



In Bild 2-25 ist die berechnete Spannungsverteilung für einen überwiegend radial beanspruchten Prüfkörper dargestellt.



**Bild 2-25:** Spannungsverteilung nach FE-Berechnung für einen überwiegend radial beanspruchten Prüfkörper, Abstand zum Mark 138 mm

An der dem Mark zugewandten Klebefuge sind deutliche Spannungskonzentrationen zu beobachten. Der Bruch von 9 der 13 überwiegend radial beanspruchten Prüfkörper, die an der Klebefuge brachen, trat an dieser Seite auf.

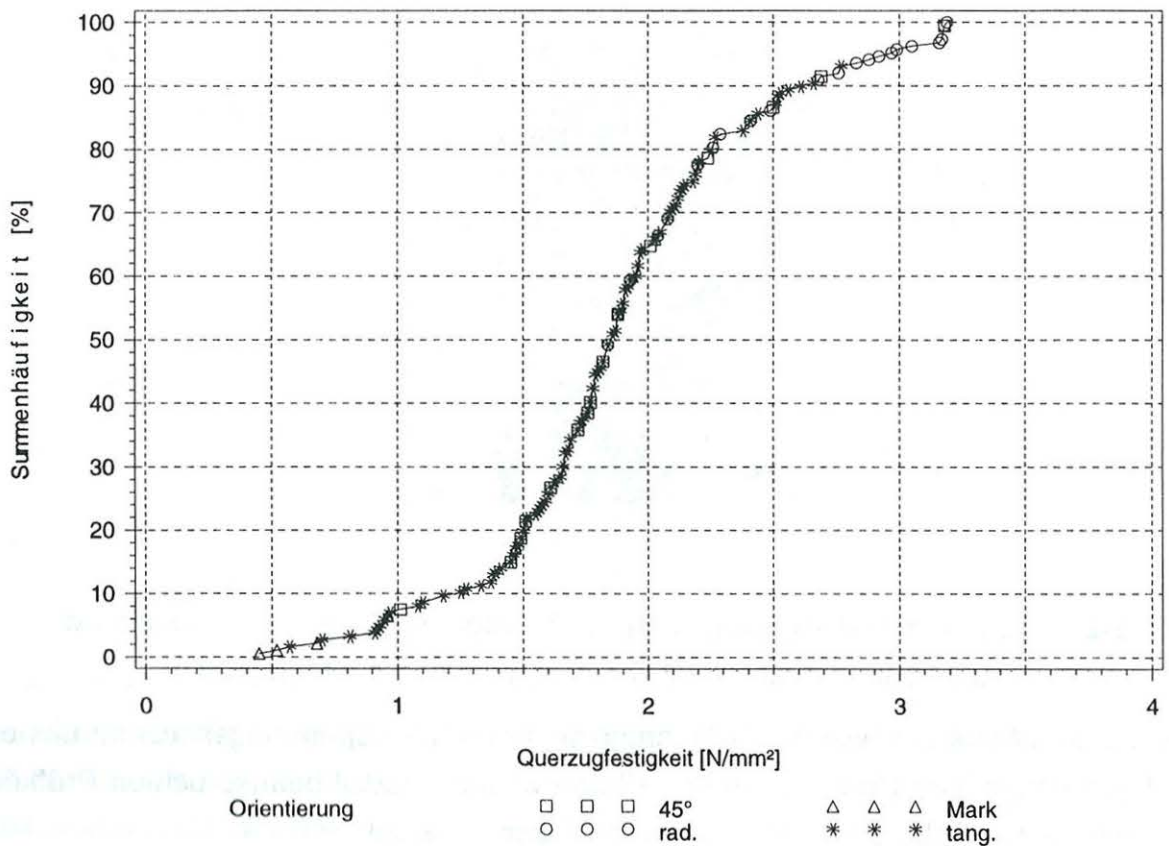
13 der 15 unter 45° beanspruchten Prüfkörper, die an der Klebefuge versagten, brachen an der dem Mark nähergelegenen Seite. Hier scheinen sich zwei Effekte, die ungleichförmige Spannungsverteilung und die Spannungskonzentration an der Übergangsstelle, zu überlagern. Lediglich drei dieser Prüfkörper brachen im Holz.

Die ungleichförmige Spannungsverteilung und die Spannungskonzentrationen führen zu einer Unterschätzung der Querkzugfestigkeit bei einer Auswertung nach DIN EN 1193, bei der eine gleichförmige Spannungsverteilung zugrunde gelegt wird:

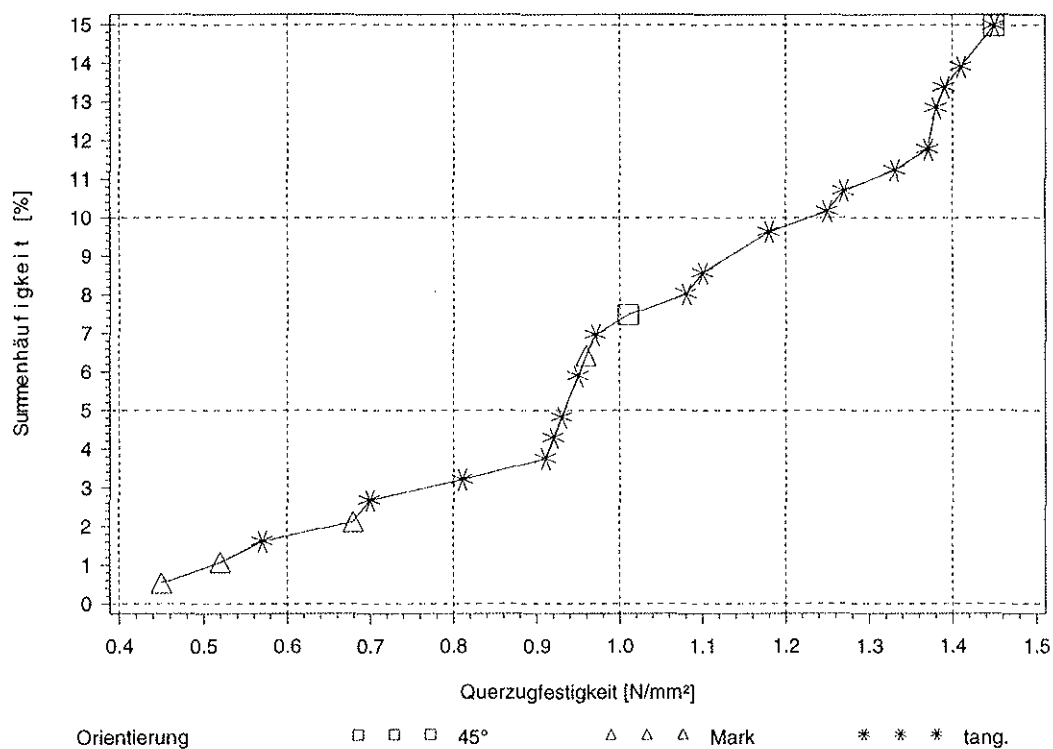
$$f_{t,90} = F_{t,90,max} / (b l) \quad (12).$$

Eine Größenordnung hierfür anzugeben, ist jedoch kaum möglich. Ein wichtiges Ziel dieses Forschungsvorhabens war die Überprüfung der Korrelation der Querkzugfestigkeit mit anderen Eigenschaften, wie der Rohdichte oder der Biegefestigkeit parallel zur Faserrichtung. Für die größte Gruppe, die überwiegend tangential beanspruchten Prüfkörper, erfolgt die Auswertung getrennt nach Reißort, um mögliche Einflüsse zu erfassen.

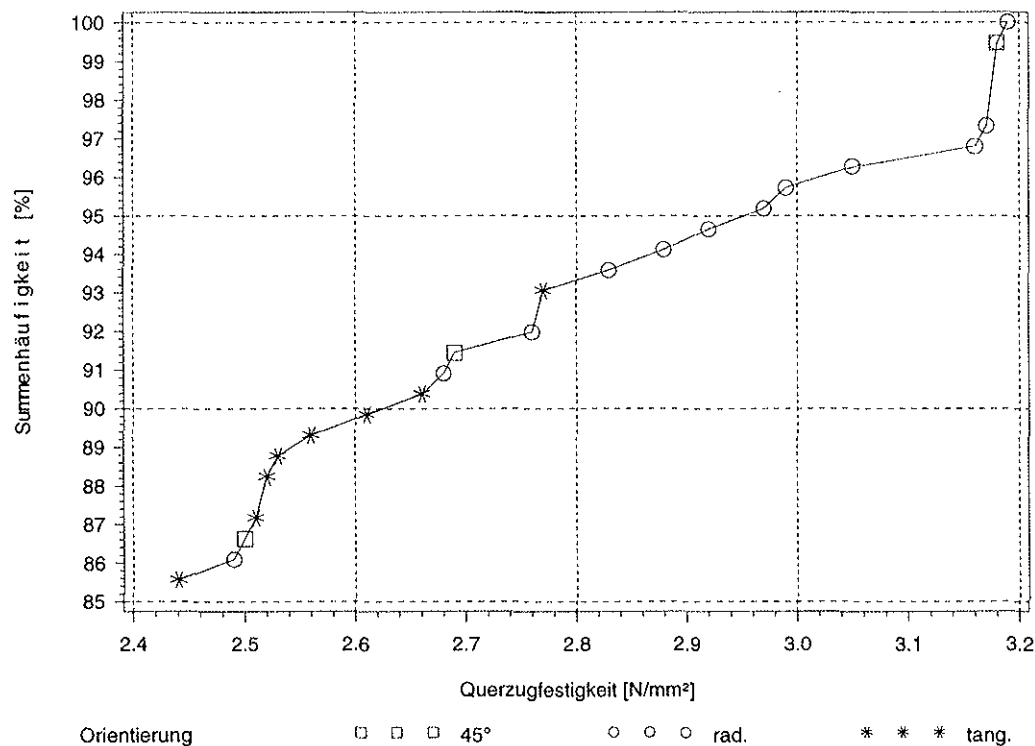
Bild 2-26 zeigt noch einmal die kumulierte Häufigkeit der Querkzugfestigkeit. In Bild 2-27 sind die unteren 15%, in Bild 2-28 die oberen 15% der Summenhäufigkeit dargestellt.



**Bild 2-26:** Kumulierte Häufigkeit der Querkzugfestigkeit



**Bild 2-27:** Summenhäufigkeit der Querzugfestigkeit bis 15%



**Bild 2-28:** Summenhäufigkeit der Querzugfestigkeit von 85 bis 100 %

Tabelle 2-8 enthält statistische Parameter der Querzugfestigkeit für die verschiedenen Orientierungen der Prüfkörper, für die tangential beanspruchten auch die der

Rohdichte. Die Rohdichten der Prüfkörper mit anderen Orientierungen können Tabelle 2-1 entnommen werden.

**Tabelle 2-8:** Statistische Parameter der Querkzugfestigkeit und der Rohdichte

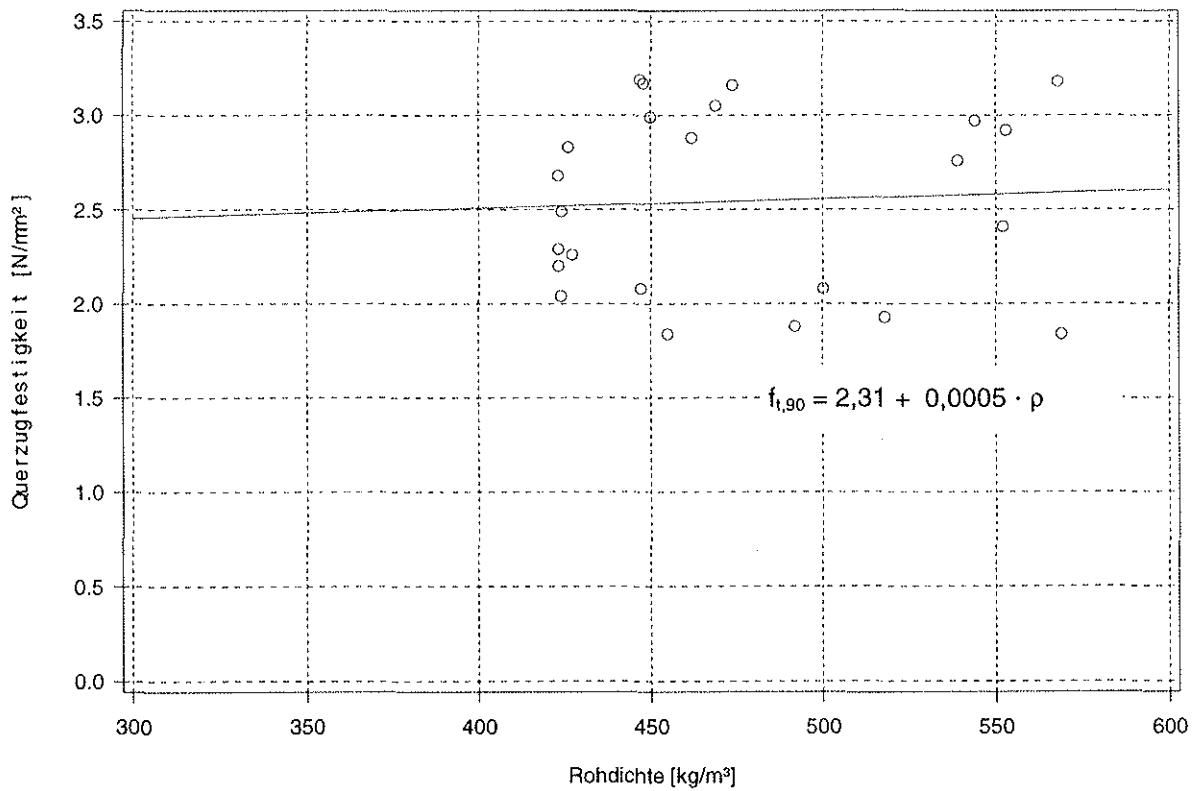
Orientierung nach Bild 2-1 und 2-2	Anzahl	Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	Minimum [N/mm <sup>2</sup> ]	Maximum [N/mm <sup>2</sup> ]	5% - Fraktile [N/mm <sup>2</sup> ]	Standardabweichg. [N/mm <sup>2</sup> ]
radial	24	2,55	1,84	3,19	1,84	0,485
45°	18	2,04	1,01	3,18	-	0,649
tangential beansprucht, Riß an der Klebefuge (Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ])	71	1,94 (437)	0,57 (355)	2,77 (579)	1,41 (369)	0,382 (49,0)
tangential beansprucht, Riß im Holz (Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ])	68	1,65 (416)	0,70 (341)	2,77 (565)	0,92 (361)	0,418 (39,4)
alle tangential beanspruchten (Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ])	139	1,80 (427)	0,57 (341)	2,77 (579)	0,95 (364)	0,423 (45,7)
mit Mark	6	1,02	0,45	2,03	-	0,619
alle zusammen	187	1,89	0,45	3,19	0,95	0,548

Die tangential beanspruchten Prüfkörper mit Riß an der Klebfuge zeigen eine größere Standardabweichung und einen höheren Mittelwert der Rohdichte. Nach Tabelle 2-6 ist die Rohdichte mit dem Radius korreliert, nach Bild 2-22 erzeugt ein kleiner Radius verhältnismäßig hohe Spannungen in der Mitte des Prüfkörpers, so daß diese Prüfkörper eher dazu neigen, im Holz zu brechen und nicht an der Klebfuge.

Im Folgenden wird die Korrelation der Querkzugfestigkeit mit den anderen Parametern untersucht. Dabei ist zu beachten, daß die verschiedenen Gruppen der Prüfkörper mit ihren Orientierungen deutlich unterschiedliche Eigenschaften aufwiesen. So betrug die mittlere Rohdichte der überwiegend radial beanspruchten Prüfkörper 477 kg/m<sup>3</sup>, die der tangential beanspruchten 427 kg/m<sup>3</sup>. Es ist anzunehmen, daß die mikroskopische Struktur und das mikromechanische Verhalten des Holzes einen großen Einfluß auf die Querkzugfestigkeit hat. Deshalb sind die Korrelationskoeffi-

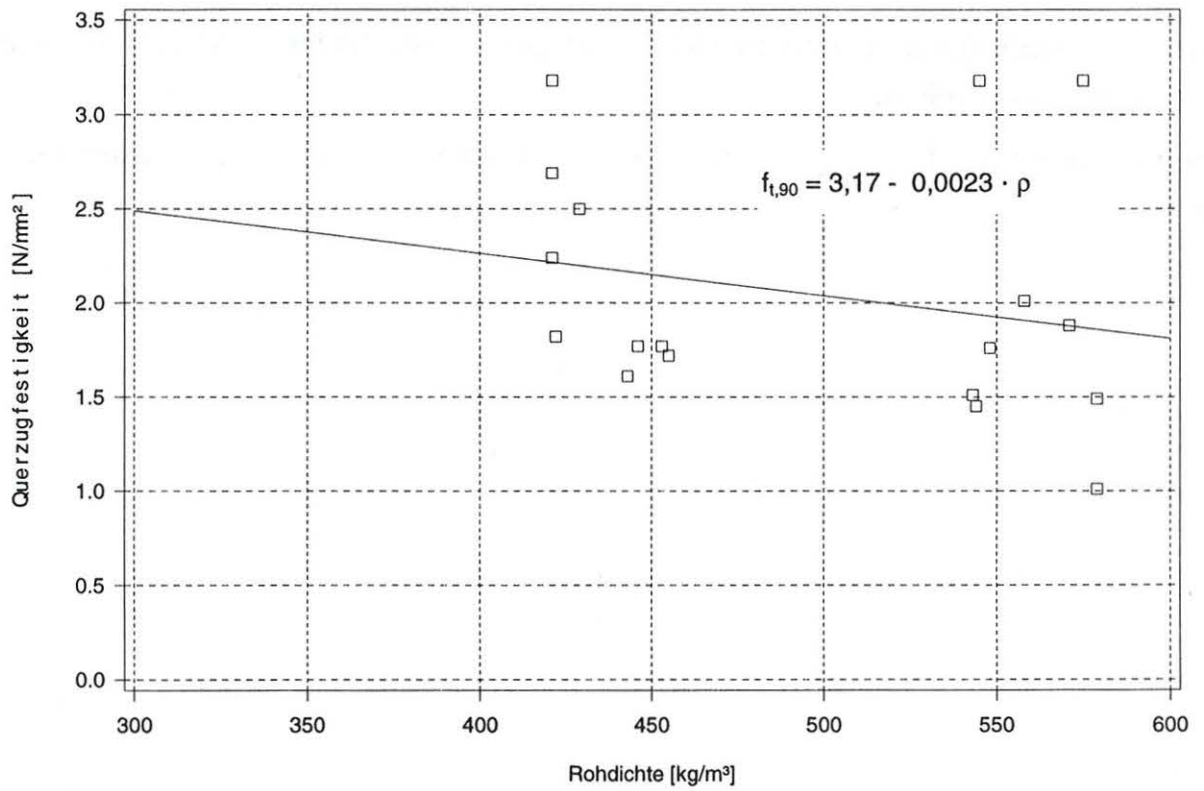
zienten innerhalb der einzelnen Orientierungen aussagefähiger, als die an allen Prüfkörpern ermittelten.

In den Bildern 2-29 bis 2-32 ist die Querkzugfestigkeit über der Rohdichte aufgetragen.

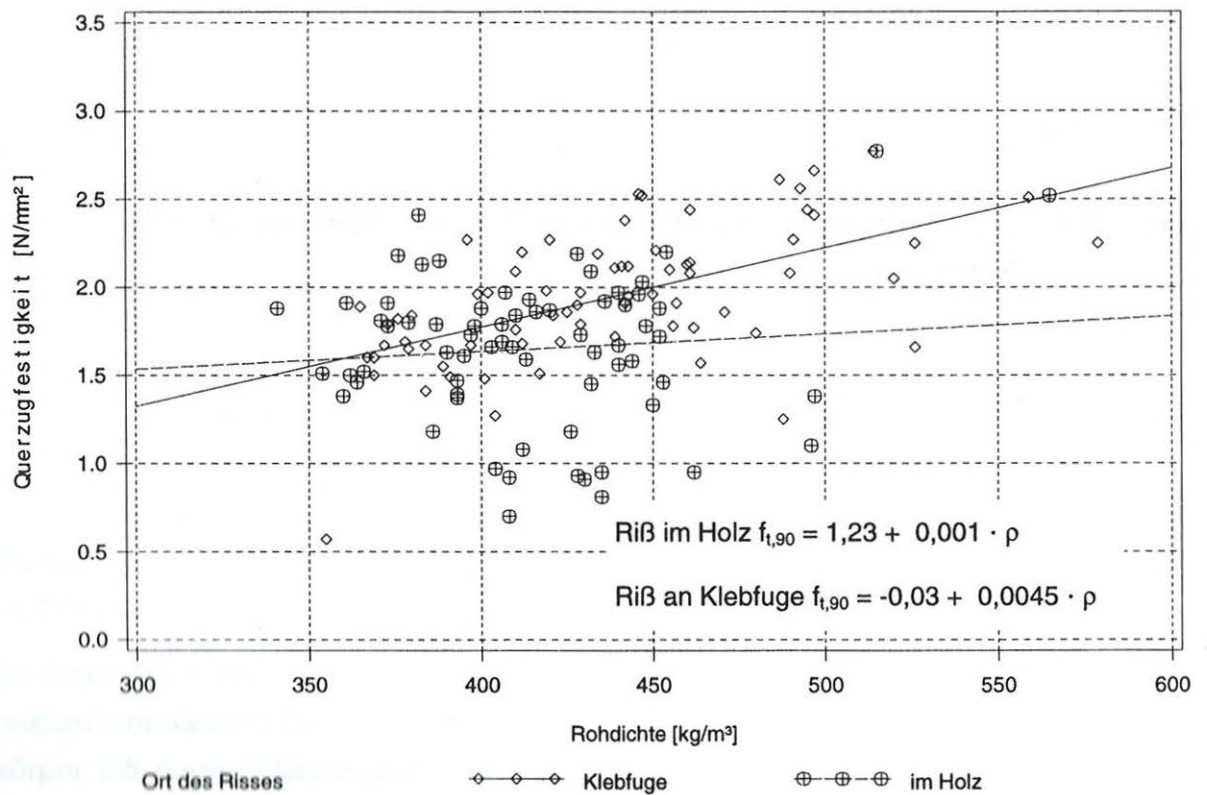


**Bild 2-29:** Querkzugfestigkeit der radial beanspruchten Prüfkörper über der Rohdichte

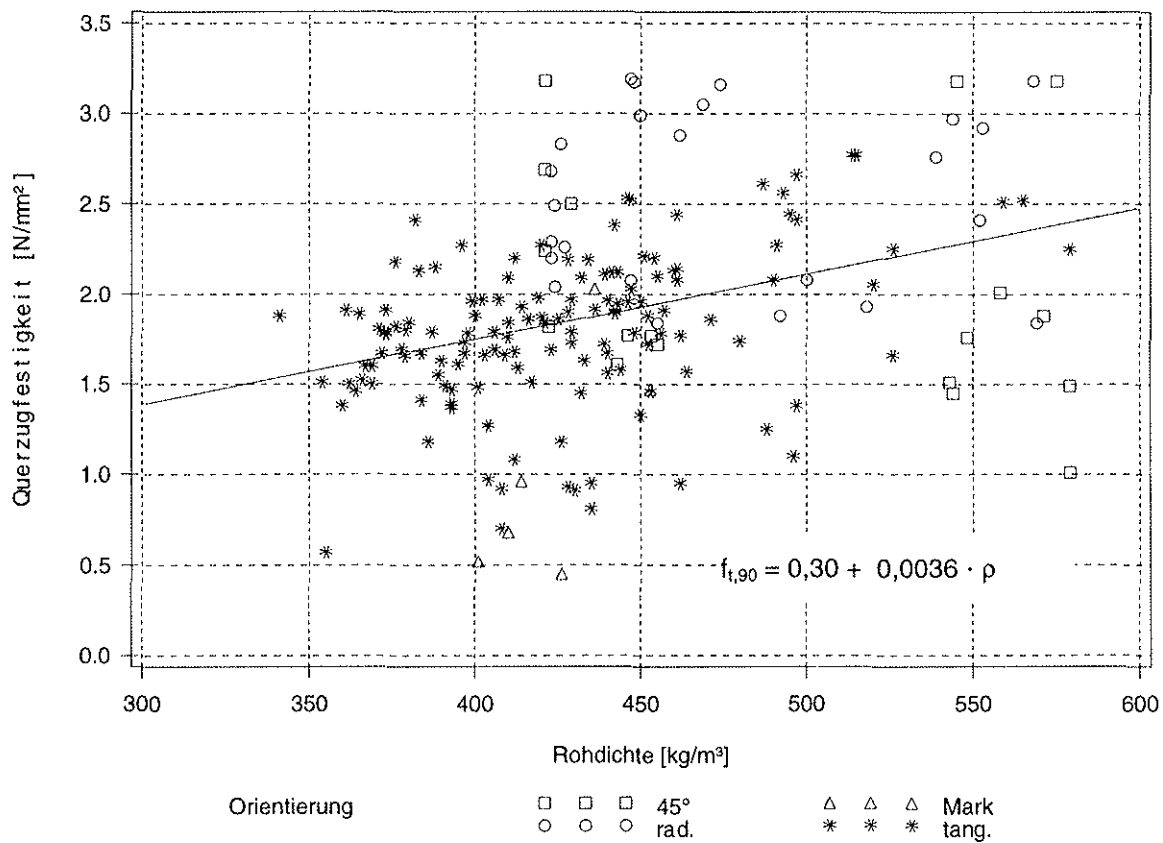




**Bild 2-30:** Querzugfestigkeit der unter 45° beanspruchten Prüfkörper über der Rohdichte



**Bild 2-31:** Querzugfestigkeit der tangential beanspruchten Prüfkörper über der Rohdichte



**Bild 2-32:** Querzugfestigkeit aller Prüfkörper über der Rohdichte

In den Bildern 2-33 und 2-34 ist die Querzugfestigkeit über der Biegefestigkeit und dem Elastizitätsmodul für Biegung parallel zur Faser gezeigt. Diese Werte wurden an denjenigen Bohlen bestimmt, von deren Enden die Prüfkörper für die Querzugversuche entnommen wurden. Werte für den Elastizitätsmodul lagen nur für die tangential beanspruchten Hölzer vor.

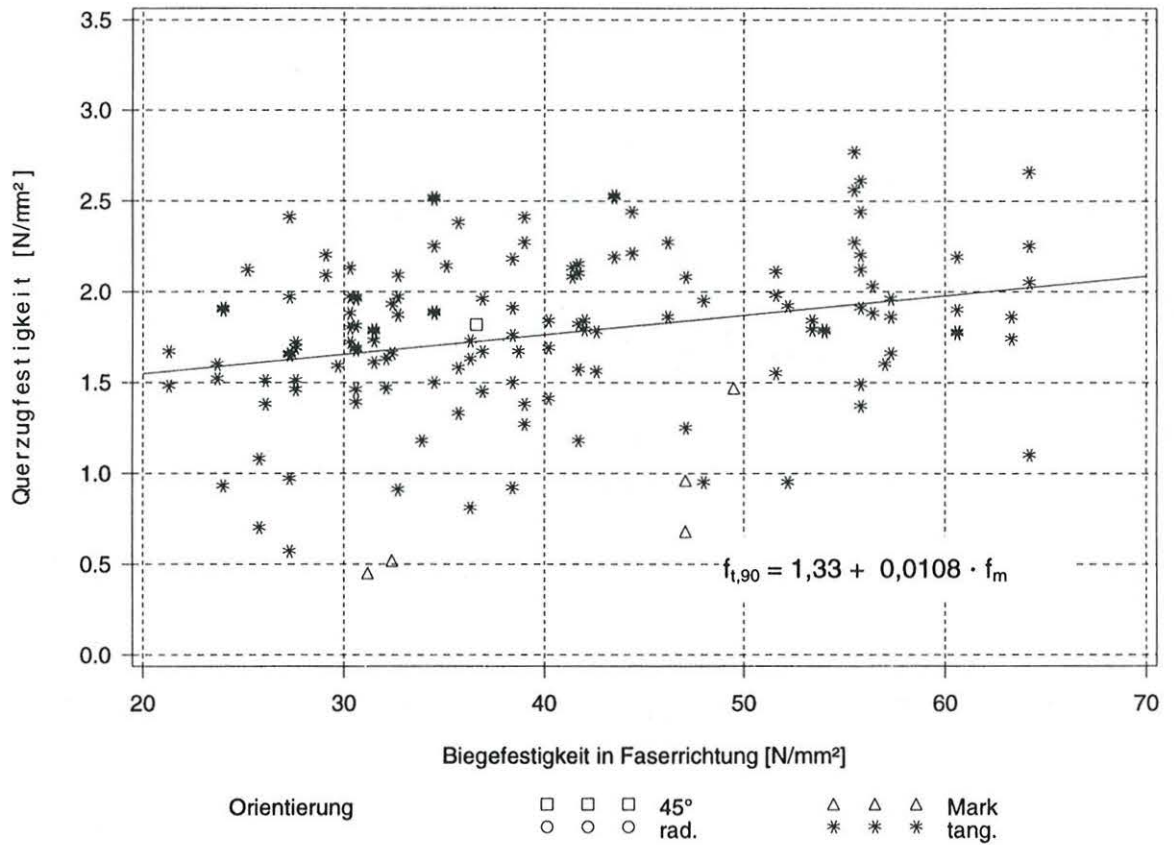


Bild 2-33: Querzugfestigkeit über der Biegefestigkeit  $f_m$

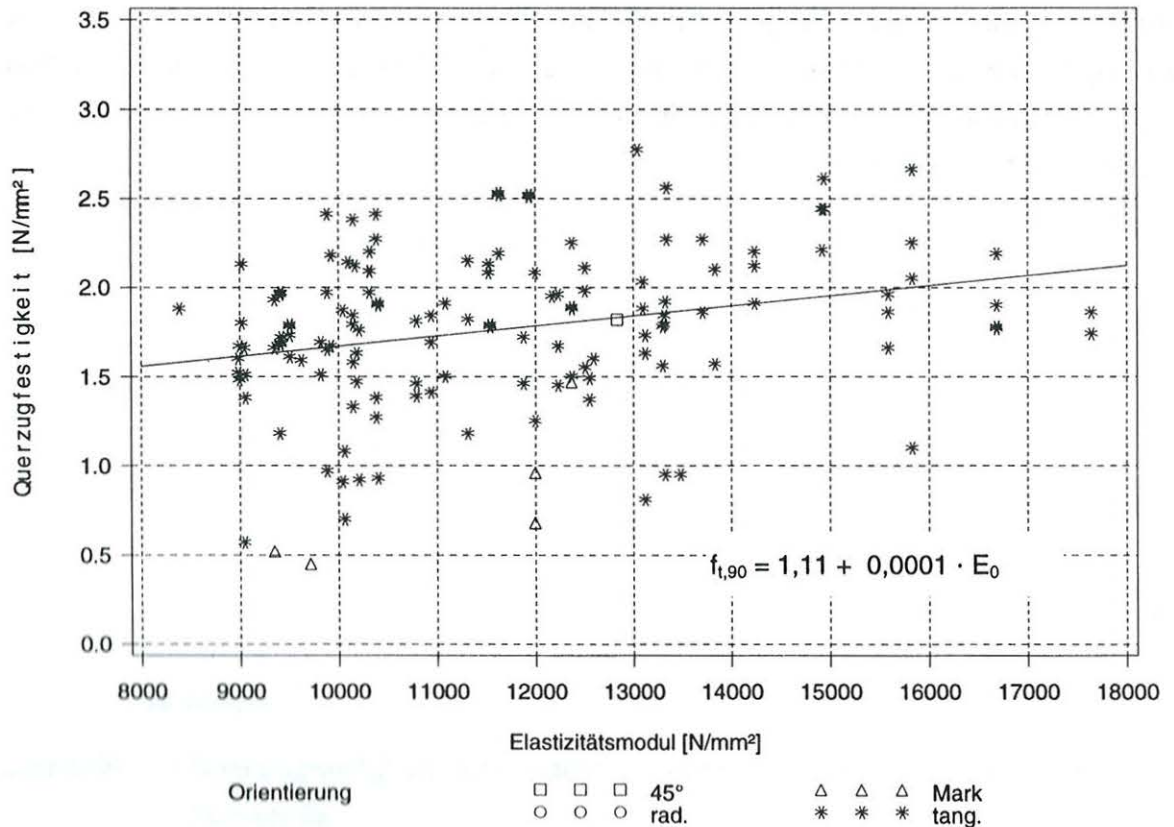
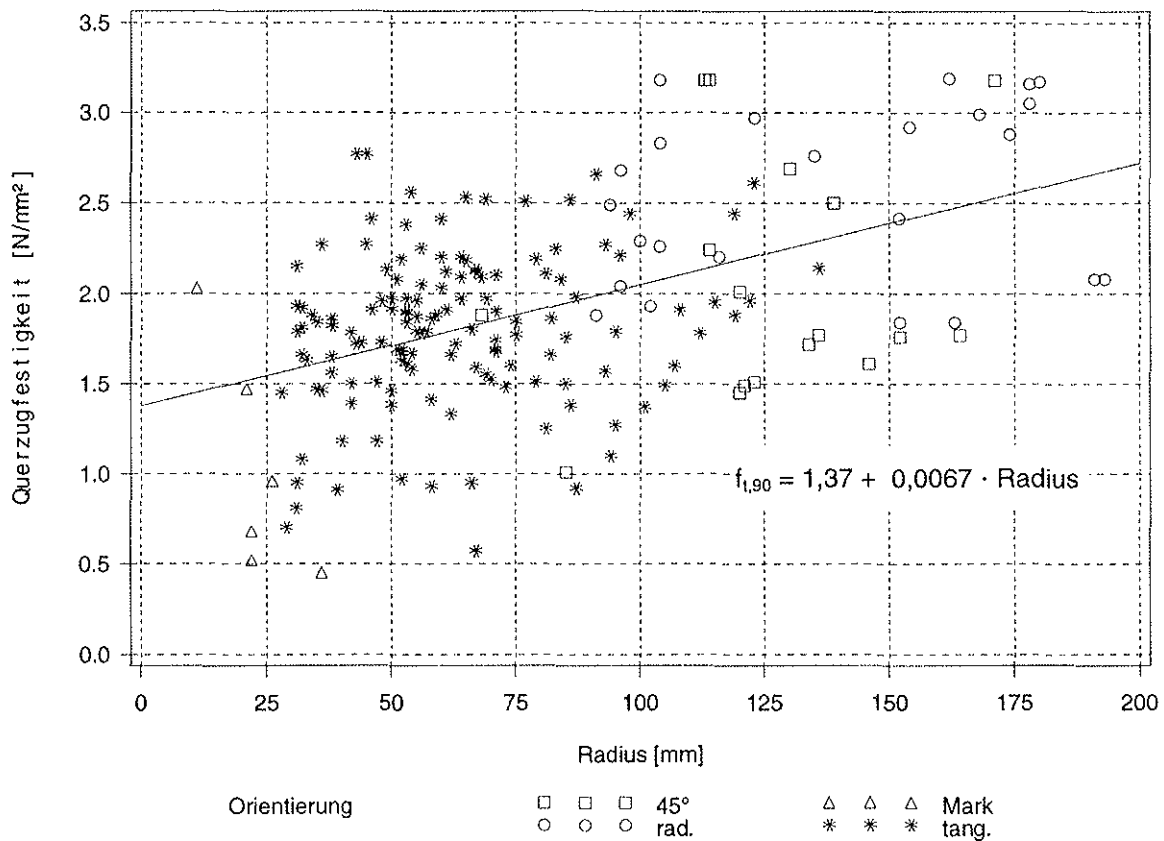


Bild 2-34: Querzugfestigkeit über dem Elastizitätsmodul  $E_0$



**Bild 2-35:** Querzugfestigkeit über dem Abstand zum Mark (Radius)

Die Tabelle 2-9 enthält die Korrelationskoeffizienten zwischen der Querzugfestigkeit und den dargestellten Parametern.

**Tabelle 2-9:** Korrelationskoeffizienten zwischen der Querzugfestigkeit und den übrigen Eigenschaften der Prüfkörper

überwiegende Beanspruchung	Anzahl	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Elastizitätsmodul $E_0$ parallel zur Faser [N/mm <sup>2</sup> ]	Biegefestigkeit $f_m$ parallel zur Faser [N/mm <sup>2</sup> ]	Radius [mm]	Jahringbreite [mm]
radial	24	0,053	-	-	0,247	0,218
45°	18	-0,232	-	-	0,209	0,177
tangential Riß an der Klebfuge	71	0,577	0,322	0,300	0,046	-0,373
tangential Riß im Holz	68	0,095	0,049	0,168	0,061	0,003



**Tabelle 2-9 (Fortsetzung)**

überwiegende Beanspruchung	Anzahl	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Elastizitätsmodul $E_0$ parallel zur Faser [N/mm <sup>2</sup> ]	Biegefestigkeit $f_{mu}$ parallel zur Faser [N/mm <sup>2</sup> ]	Radius [mm]	Jahringbreite [mm]
tangential alle	139	0,402	0,258	0,294	0,192	-0,250
Mark	6	0,694	0,783	0,796	-0,789	-0,497
alle	187	0,358	0,265	0,272	0,486	-0,088

Auffällig sind die vergleichsweise hohen Korrelationskoeffizienten der tangential beanspruchten Prüfkörper mit Bruch an der Klebestelle.

Für die Prüfkörper mit Riß im Holz kann die probabilistische Theorie Weibulls als gültig angenommen werden, d.h. der Bruch wird an der Stelle eintreten, an der die Beanspruchung größer als eine zufällig, statistisch verteilte Festigkeit ist. Ausschlaggebend für das Versagen ist die Spannungsverteilung abhängig von den mechanischen Eigenschaften (Weibullsche Beanspruchung) und mikromechanische „Schwachpunkte“ (zufällig verteilte Festigkeit). Ein Zusammenhang mit den in Abschnitt 2.1 erfaßten Eigenschaften des gesamten Prüfkörpers ist unwahrscheinlich, da beide Einflüsse durch die Inhomogenität des Werkstoffes Holz innerhalb des Prüfkörpers als zufällig verteilt angesehen werden können.

Für die Prüfkörper mit Riß an der Klebfuge dagegen ist der Ort des Bruches aufgrund von Spannungskonzentrationen oder Exzentrizitäten vorgegeben. Die o.g. zufällige Verteilung der Werkstofffestigkeit hat hier einen weitaus geringeren Einfluß. Dadurch ist ein engerer Zusammenhang mit den anderen Parametern gegeben, der durch einen höheren Korrelationskoeffizienten ausgedrückt wird.

Bei Vorliegen eines Versagens an einer beliebigen Stelle im beanspruchten Volumen ist eine Korrelation insbesondere mit der Rohdichte kaum gegeben. Bei Querkzugversagen an einer klar definierten Stelle ist die Korrelation deutlich ausgeprägter.

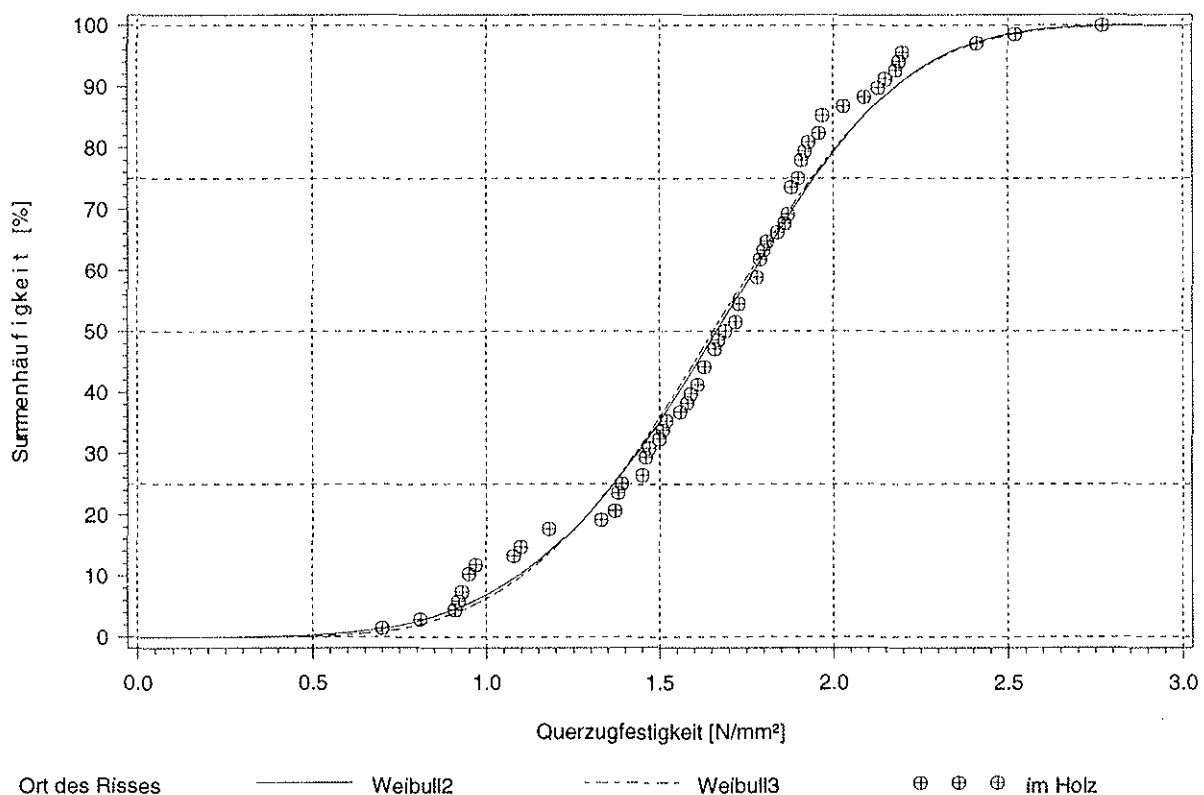
Für diese Aussagen sprechen auch Untersuchungen zur Bestimmung der Bruchenergie bei Spannung rechtwinklig zur Faserrichtung von Vollholz, die im Rahmen eines internationalen Vorhabens durchgeführt und von Larsen und Gustafsson (1990) dokumentiert wurden. Das Versagen zur Bestimmung der Bruchenergie  $G_{Ic}$  wird hier an einer bestimmten Stelle erzwungen. Für die Bruchenergie wird eine Abhängigkeit von der Rohdichte für europäisches Nadelholz nach folgender Gleichung empfohlen:



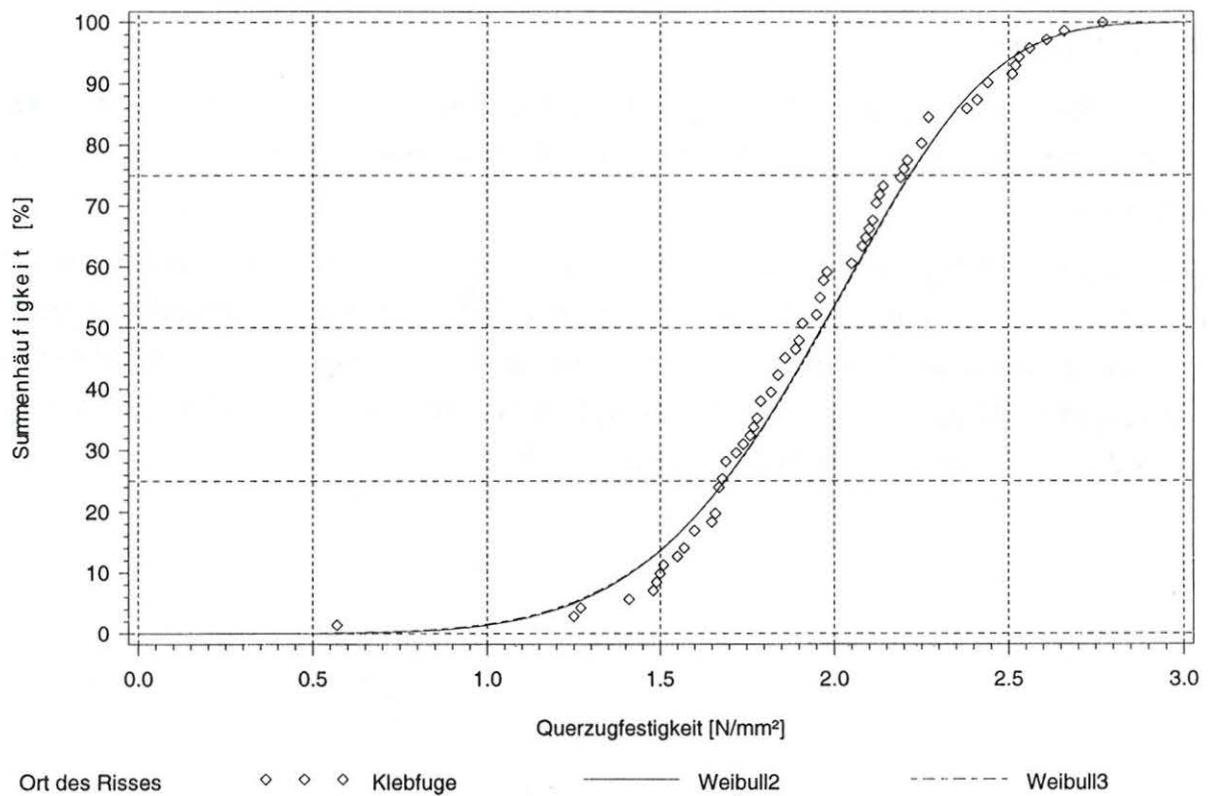
$$G_{Ic} = -146 \text{ kg/m}^3 + 1,04 \cdot \rho \quad (12),$$

mit der Bruchenergie  $G_{Ic}$  in  $[\text{Nm/m}^2]$  und der Rohdichte  $\rho$  in  $[\text{kg/m}^3]$ . Diese Bruchenergie ist eng korreliert mit der Querkzugfestigkeit bei einem Riß an einer vorgegebenen Stelle.

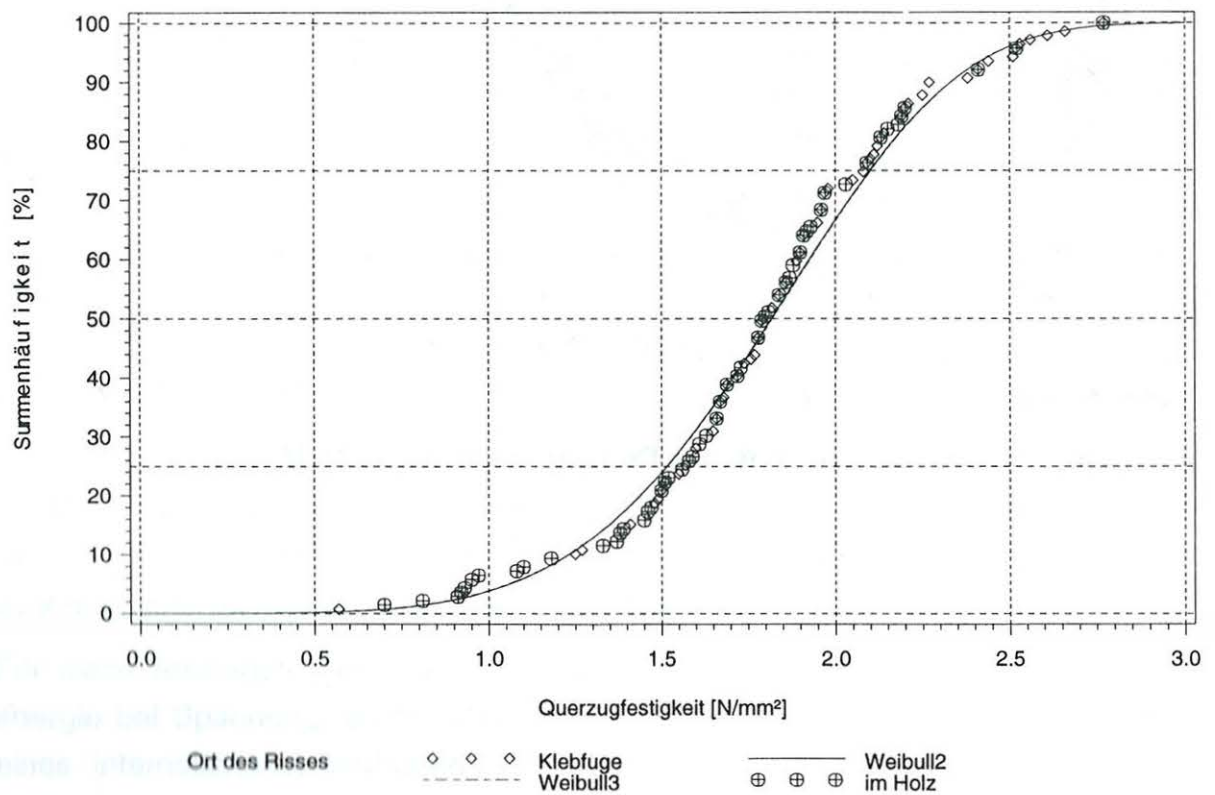
Mit Hilfe des Programmes SAS (1996) wurden mittels der Maximum-Likelihood-Methode den Querkzugfestigkeiten der tangential beanspruchten Prüfkörper zwei- und dreiparametrische Weibullverteilungen angepaßt. Bild 2-36 zeigt die Verteilung für diejenigen Prüfkörper mit Riß im Holz, Bild 2-37 für diejenigen mit Riß an der Klebfuge und 2-38 für alle tangential beanspruchten Prüfkörper.



**Bild 2-36:** Weibullverteilung für die Prüfkörper mit Riß im Holz



**Bild 2-37:** Weibullverteilungen für die Prüfkörper mit Riß an der Klebfuge



**Bild 2-38:** Weibullverteilungen für alle tangential beanspruchten Prüfkörper

Die Anpassung der Weibullverteilungen an die Versuchsergebnisse kann mit dem  $\chi^2$ -Anpassungstest kontrolliert werden. Dabei wird die Hypothese überprüft, ob eine betrachtete Zufallsgröße einem Verteilungsgesetz auf einem bestimmten Signifikanzniveau  $\alpha$  genügt. Die Gleichungen der Weibullverteilungen und die Signifikanzniveaus sind in Tabelle 2-10 enthalten.

**Tabelle 2-10:** Weibullverteilungen und Signifikanzniveau  $\alpha$  für die tangential beanspruchten Prüfkörper

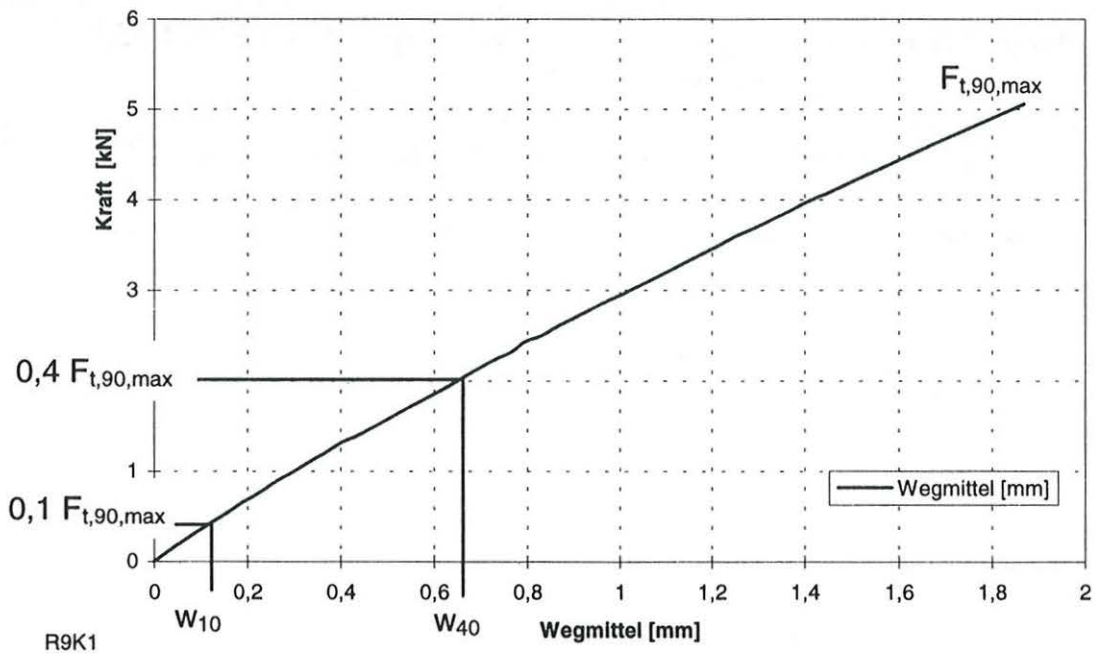
Ort des Risses	2-parametrische Weibullverteilung	3-parametrische Weibullverteilung
im Holz	$S = 1 - \exp - \{f_{t,90}/2,094\}^{5,775}$ $\alpha = 13,8\%$	$S = 1 - \exp - \{(f_{t,90}+0,172)/2,268\}^{6,284}$ $\alpha = 38,2\%$
an der Klebfuge	$S = 1 - \exp - \{f_{t,90}/1,808\}^{4,463}$ $\alpha = 12,0\%$	$S = 1 - \exp - \{(f_{t,90}-0,242)/1,557\}^{3,807}$ $\alpha = 39,7\%$
alle	$S = 1 - \exp - \{f_{t,90}/1,962\}^{4,830}$ $\alpha = 8,5\%$	$S = 1 - \exp - \{(f_{t,90}+0,043)/2,007\}^{4,947}$ $\alpha = 21,3\%$

### 2.3 Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung

Der Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung wird nach DIN EN 1193 mit den Last-Verformungswerten bei 10% und 40% der maximalen Kraft bestimmt zu:

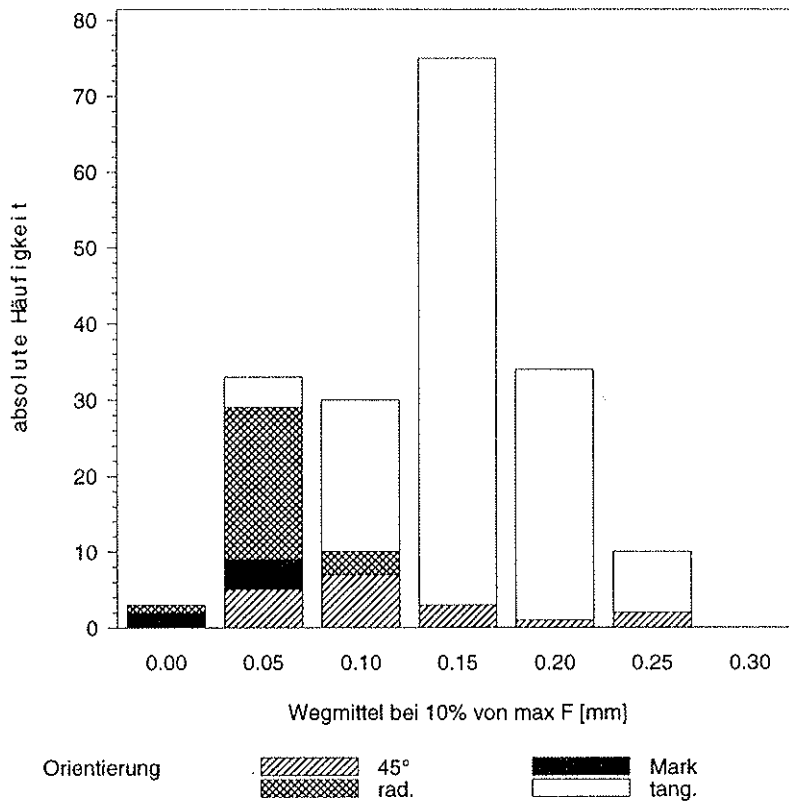
$$E_{t,90} = \frac{(F_{40} - F_{10})h_0}{(w_{40} - w_{10})bl} \quad (13).$$

$b \cdot l$  ist der querzugbeanspruchte Querschnitt,  $h_0$  die Meßlänge der Wegaufnehmer. Bild 2-39 zeigt ein Lastverformungsdiagramm mit den zur Auswertung verwendeten Werten.

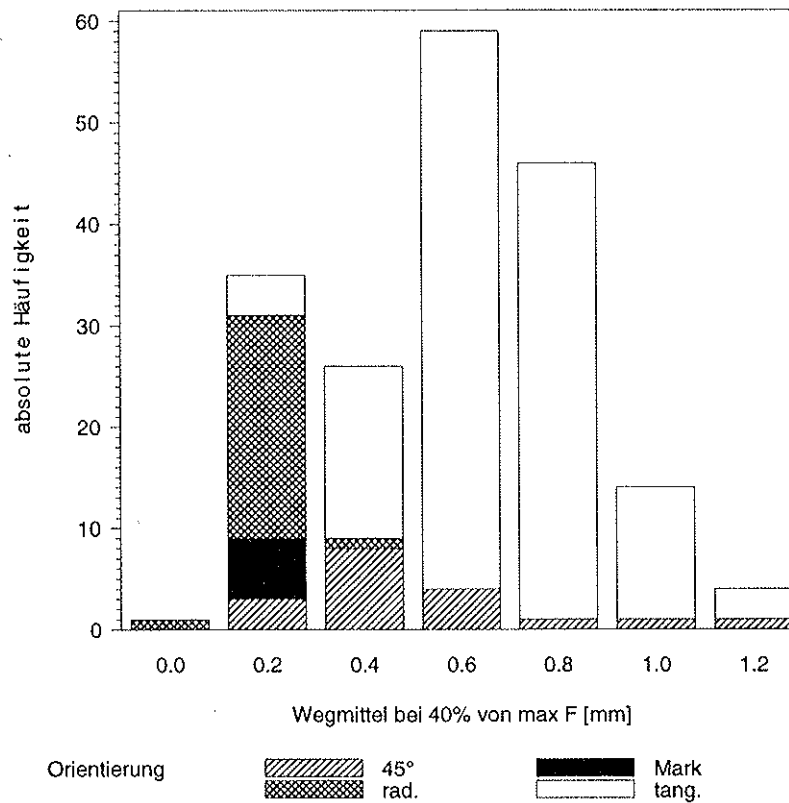


**Bild 2-39:** Last-Verformungsdiagramm eines Versuches

In den Bildern 2-40 bis 2-42 sind die gemittelten Längenänderungen der beiden Wegaufnehmer bei 10%, 40% und 100% der maximalen Kraft  $F_{t,90,max}$ , unter Berücksichtigung der Orientierung der Jahrringe dargestellt.

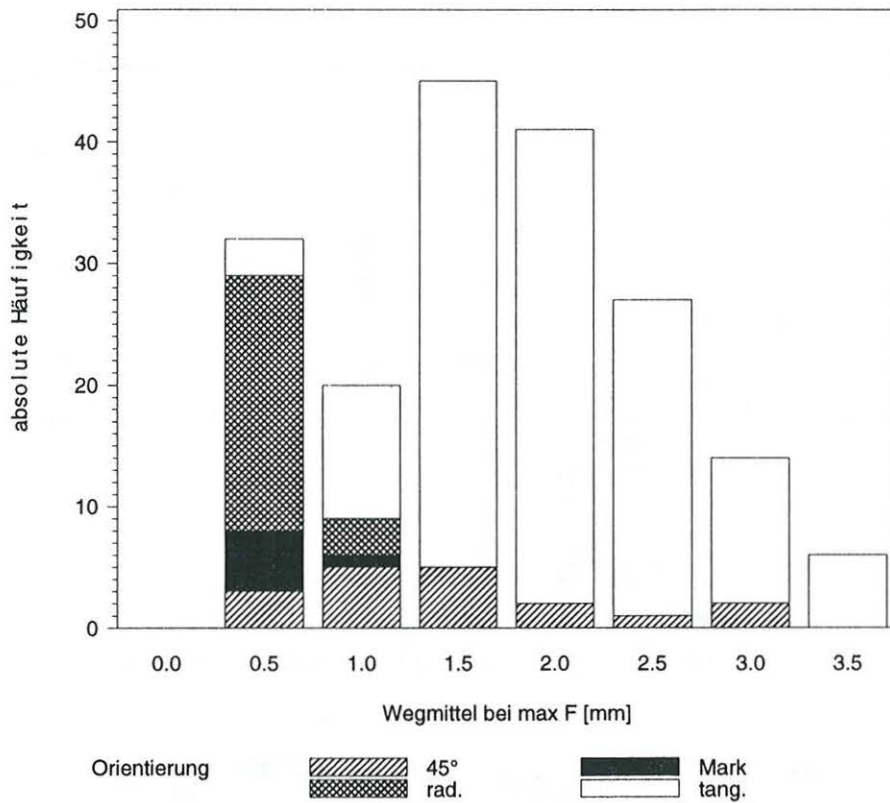


**Bild 2-40:** Häufigkeitsverteilung der Längenänderung bei 10% von  $F_{t,90,max}$



**Bild 2-41:** Häufigkeitsverteilung der Längenänderung bei 40% von  $F_{t,90,max}$





**Bild 2-42:** Häufigkeitsverteilung der Längenänderung bei 100% von  $F_{t,90,max}$

Die Tabelle 2-10 enthält statistische Parameter der Längenänderungen für die verschiedenen Orientierungsrichtungen.

**Tabelle 2-10:** statistische Parameter für die gemittelten Längenänderungen bei 10%, 40% und 100% von  $F_{t,90,max}$

Orientierung der Jahrringe nach Bild 2-1		Mittelwert [mm]	Minimum [mm]	Maximum [mm]	Standardabwg. [mm]
radial	10%	0,05	0,01	0,08	0,02
	40%	0,21	0,09	0,31	0,05
	100%	0,56	0,27	0,85	0,13
unter 45°	10%	0,12	0,05	0,26	0,06
	40%	0,52	0,22	1,11	0,26
	100%	1,47	0,52	2,94	0,72
tangential	10%	0,16	0,04	0,27	0,04
	40%	0,68	0,22	2,28	0,23
	100%	2,01	0,58	3,86	0,67

Tabelle 2-10 (Fortsetzung):

Orientierung der Jahrringe nach Bild 2-1		Mittelwert [mm]	Minimum [mm]	Maximum [mm]	Standardabwg. [mm]
mit Mark	10%	0,04	0,01	0,07	0,02
	40%	0,19	0,13	0,28	0,07
	100%	0,54	0,36	0,76	0,18
alle	10%	0,14	0,01	0,27	0,06
	40%	0,59	0,09	2,28	0,27
	100%	1,73	0,27	3,86	0,82

In Bild 2-43 sind die Mittelwerte der Unterschiede der Längenänderungen, gemessen mit den beiden diagonal gegenüberliegenden Wegaufnehmern, in Schritten von 10% der maximalen Kraft dargestellt. Diese Unterschiede können durch den orthotropen Materialaufbau und die daraus resultierenden Steifigkeitsunterschiede innerhalb des Prüfkörpers erklärt werden, siehe hierzu auch die Bilder 2-19, 2-22 und 2-23.

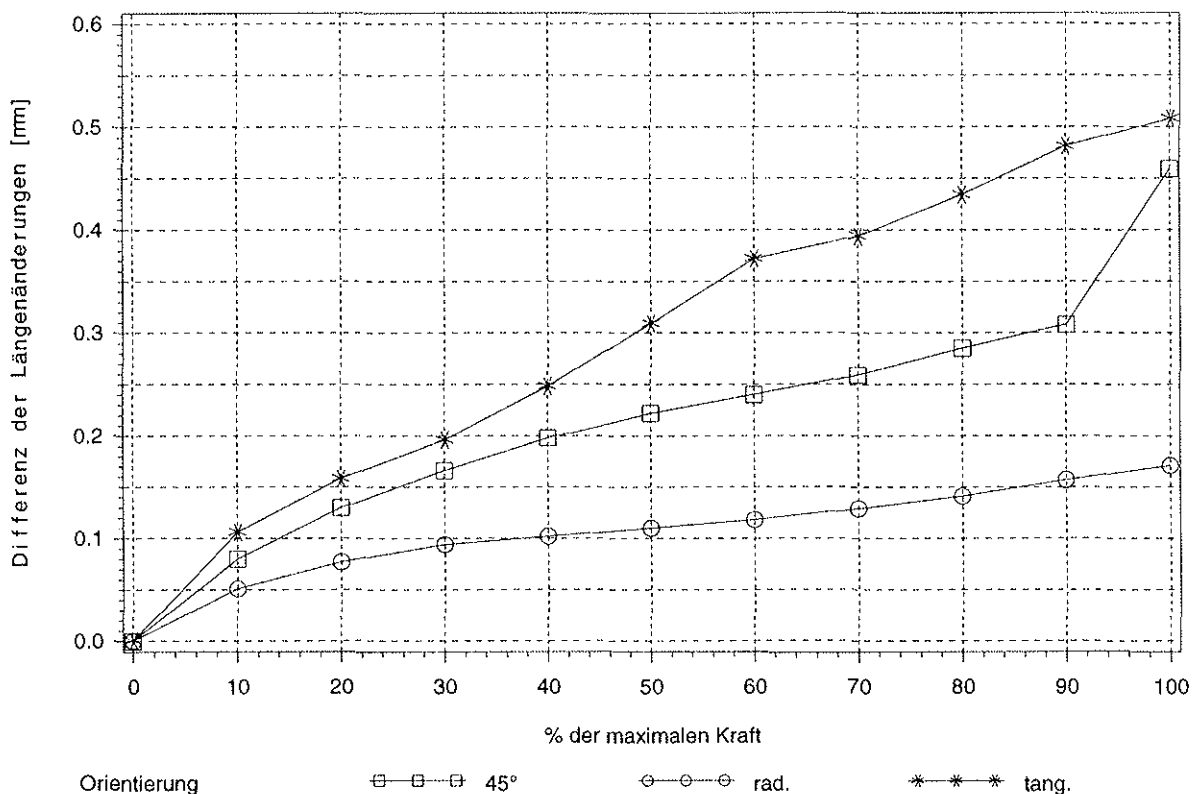
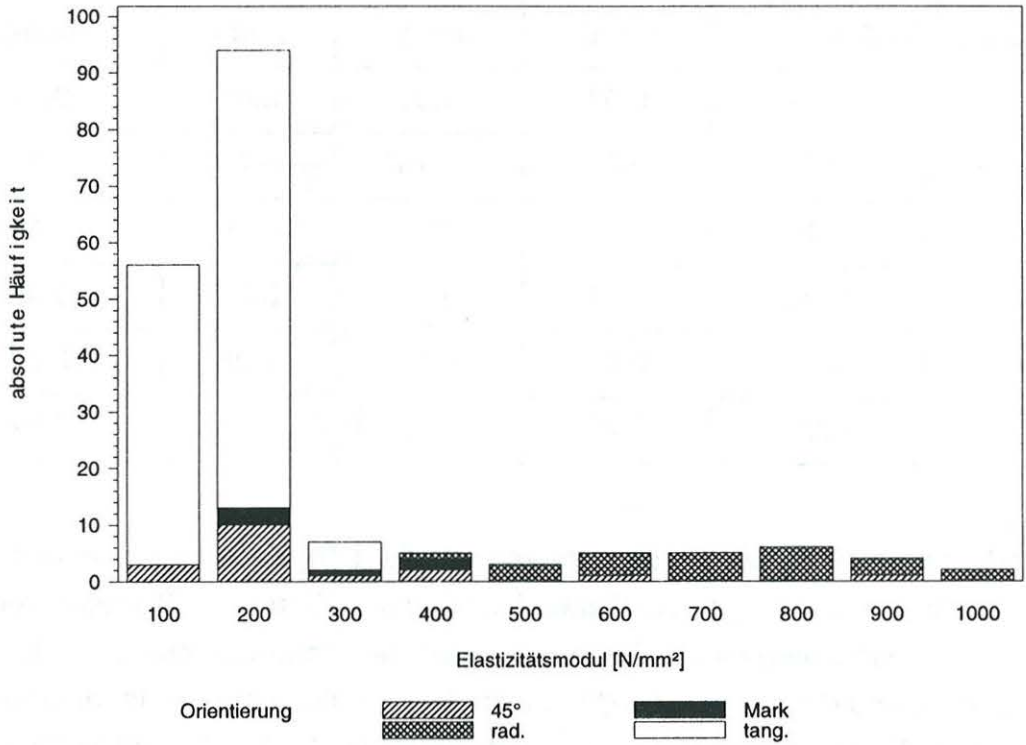
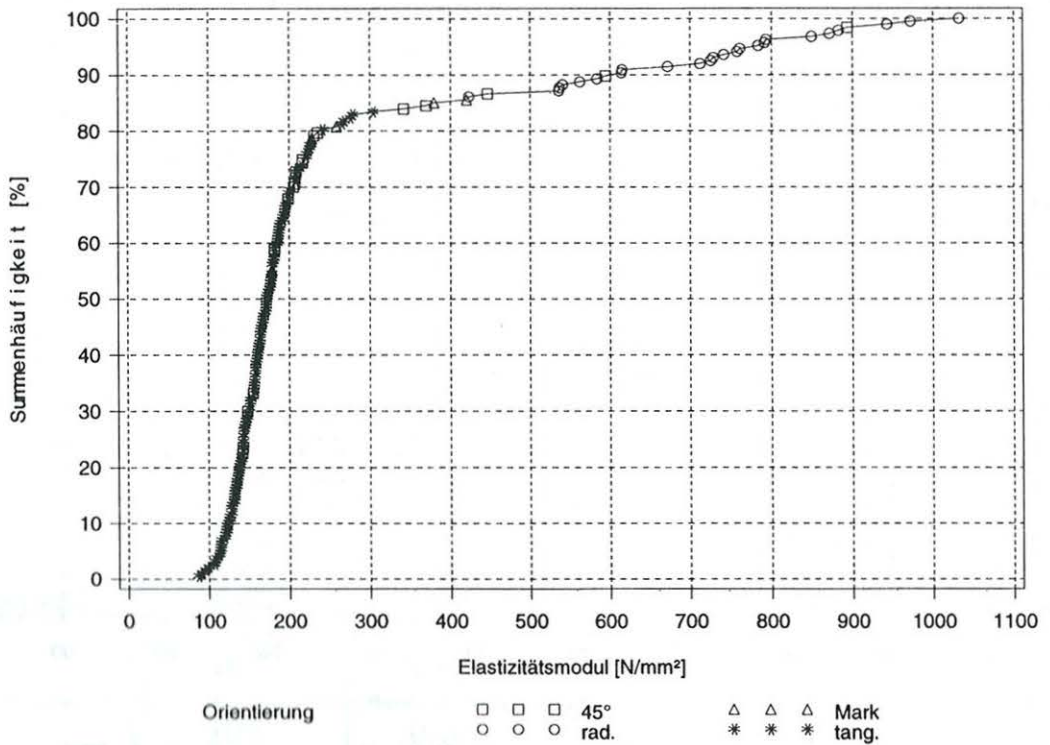


Bild 2-43: Mittelwerte der Differenz der Längenänderungen

Die Bilder 2-44 und 2-45 zeigen die Häufigkeitsverteilung und die Summenhäufigkeit des Elastizitätsmoduls rechtwinklig zur Faserrichtung.



**Bild 2-44:** Häufigkeitsverteilung der Elastizitätsmoduln rechtwinklig zur Faserrichtung



**Bild 2-45:** Summenhäufigkeitsverteilung der Elastizitätsmoduln rechtwinklig zur Faserrichtung

**Tabelle 2-12:** statistische Parameter des Elastizitätsmodul  $E_{t,90}$  der Vollholzprüfkörper

Orientierung der Jahrringe nach Bild 2-1	Anzahl	Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	Minimum [N/mm <sup>2</sup> ]	Maximum [N/mm <sup>2</sup> ]	5% - Fraktile [N/mm <sup>2</sup> ]	Standardabweichg. [N/mm <sup>2</sup> ]
radial	24	726	423	1032	536	155
unter 45°	17	285	142	894	-	192
tangential	139	164	87,2	304	109	38,3
mit Mark	6	282	179	421	-	95,6
alle zusammen	187	251	87,2	1032	114	207

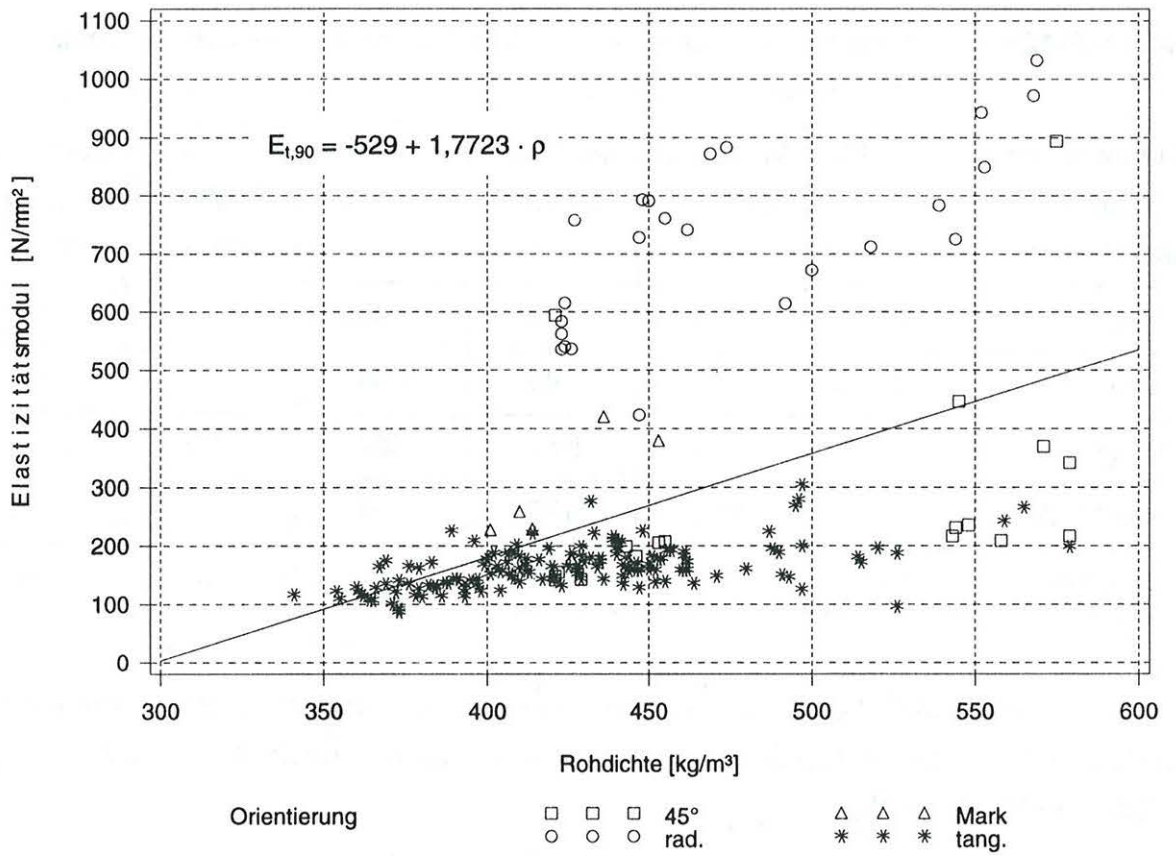
Der Einfluß des mikroskopischen Aufbaus und des mikromechanischen Verhaltens auf den Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung ist noch stärker ausgeprägt als bei der Querkzugfestigkeit.

Die Korrelationskoeffizienten der Tabelle 2-13 sind folglich nur für die Gruppen mit gleicher Orientierung der Jahrringe aussagefähig.

**Tabelle 2-13:** Korrelationskoeffizienten zwischen erfaßten Eigenschaften und dem Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung  $E_{t,90}$

Orientierung der Jahrringe nach Bild 2-1	Querkzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Jahrringbreite [mm]	Biegefestigkeit in Faserrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]	E-modul in Faserrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]	Abstand zum Mark [mm]
radial	0,323	0,698	0,686	-	-	0,313
unter 45°	0,610	0,376	0,520	-	-	0,145
tangential	0,257	0,542	-0,261	0,223	0,313	0,249
mit Mark	0,949	0,704	-0,556	0,709	0,673	-0,847
alle zusammen	0,533	0,464	0,118	0,228	0,272	0,639

In Bild 2-46 ist der Elastizitätsmodul über der Rohdichte aufgetragen.



**Bild 2-46:** Elastizitätsmoduln rechtwinklig zur Faserrichtung über der Rohdichte



### 3 Versuche mit Brettschichtholz

#### 3.1 Materialeigenschaften

Das Versuchsmaterial stammte von vier deutschen Brettschichtholzherstellern. Um eine repräsentative Probe zu erhalten, sollten Brettschichtholzkörper aus der laufenden Produktion entnommen oder Lagerholz verwendet werden. Dies war aufgrund der geforderten Höhe von 40 cm nur bei zwei Betrieben möglich. Von den zwei anderen Betrieben wurden längere Trägerstücke geliefert, so daß mehrere Prüfkörper aus einem Träger entnommen wurden. Maximal wurden drei 40 cm hohe Prüfkörper aus 1,80 m langen Trägern, bzw. vier aus 2,50 m langen Trägern entnommen.

Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über die Prüfkörperanzahl und die Anzahl der verschiedenen Träger oder Trägerstücke aus denen die Körper entnommen wurden.

**Tabelle 3-1:** Versuchsumfang und verwendetes Material

Festigkeitsklasse	BS11, BS14	BS16	BS18
Anzahl der Trägerstücke	54	19	24
Anzahl der Versuche mit 40 cm hohen Brettschichtholzprüfkörpern, $V_0 = 0,01 \text{ m}^3$	79	38	36
Anzahl der Versuche mit kleineren Brettschichtholzprüfkörpern, $V < V_0$	46	48	61

Die Träger der Festigkeitsklassen BS11 und BS14 wurden von zwei Betrieben hergestellt, die visuell sortierte Lamellen verwenden. Der Betrieb, der das Brettschichtholz der Festigkeitsklasse BS11 herstellte, verwendet ausschließlich die Sortierklassen S10 und S13. Der Betrieb, der die Festigkeitsklasse BS14 herstellte, konnte keine Träger mit homogenem Aufbau liefern, so daß bei der Mehrzahl der Träger die mittleren Lamellen entsprechend den Regelungen der DIN 1052-Teil 1, 5.1.2 der Sortierklasse S10 angehörten. Ebenfalls den Festigkeitsklassen BS11 oder BS14 gehörten 16 Prüfkörper an, die aus 9 Trägerstücken entnommen wurden, die an der Versuchsanstalt noch vorhanden waren, in Bild 3-1 als „Bestand“ bezeichnet. Aufgrund des beschriebenen, in der Praxis üblichen Aufbaus von BS11 und BS14, wird bei der weiteren Auswertung zwischen diesen Festigkeitsklassen nicht mehr unterschieden.

Die Festigkeitsklassen BS16 und BS18 wurden von zwei Betrieben geliefert, die maschinell sortierte Lamellen verwenden. Die Träger dieser Klassen hatten einen ho-

mogenen Aufbau, d.h. die Lamellen waren entsprechend den Kriterien der Klasse MS13 bzw. MS17 sortiert.

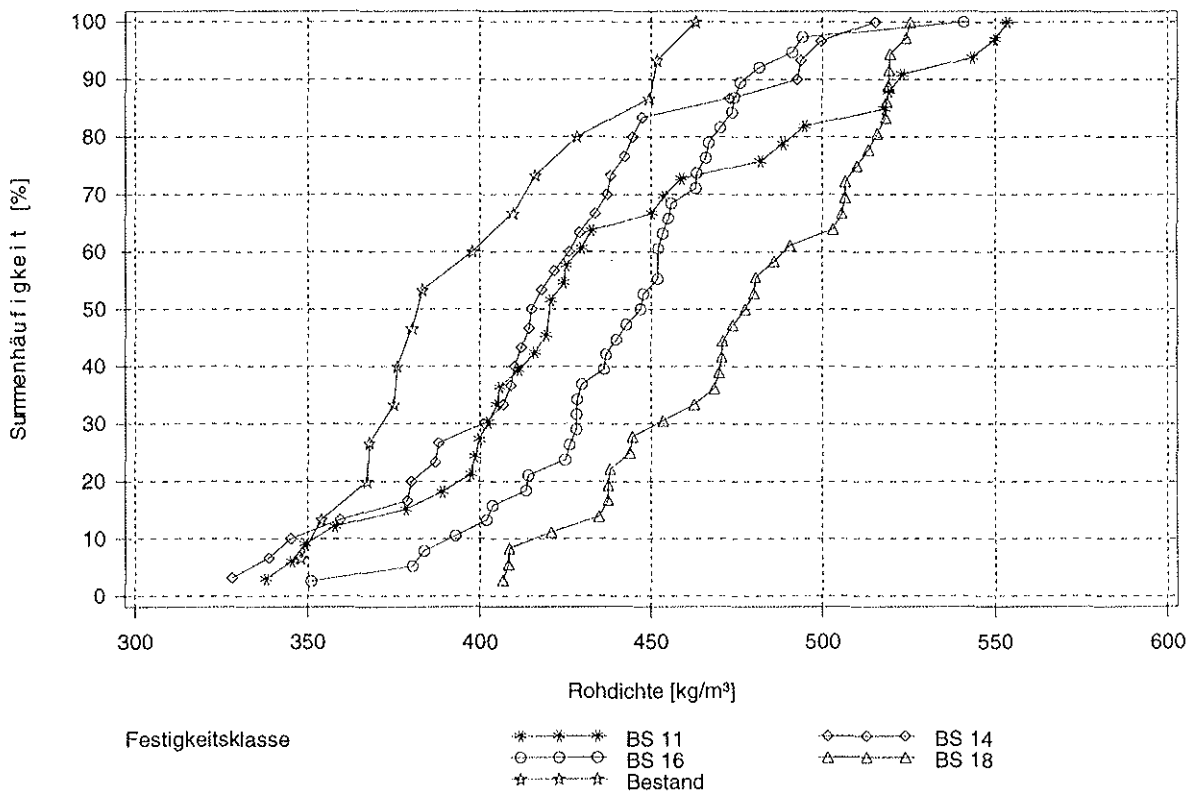
91 Versuche mit 40 cm hohen Prüfkörpern mit einem Volumen von  $0,01 \text{ m}^3$  und 87 Versuche mit Prüfkörpern mit kleineren Volumen wurden im Zeitraum Februar bis April 1997 durchgeführt. Die Holzfeuchte dieser Prüfkörper wurde elektrisch gemessen und betrug im Mittel 10,4%, die Standardabweichung betrug 0,84%. Die restlichen 64 Prüfkörper mit dem Bezugsvolumen von  $0,01 \text{ m}^3$  und 68 Prüfkörper mit kleinerem Volumen wurden im Zeitraum vom Dezember 1997 bis Februar 1998 geprüft, der Mittelwert der Holzfeuchte dieser Prüfkörper lag bei 8,6%, die Standardabweichung bei 0,31%. Die Holzfeuchten der letztgenannten Prüfkörper wurden mit dem Darrverfahren bestimmt. Bei beiden Gruppen wurde die Holzfeuchte nur stichprobenartig ermittelt. Bedingt durch den dazwischen liegenden Sommer, während dem die Luftfeuchte und -temperatur im Labor nicht konstant auf Normalbedingungen gehalten werden konnte, fand eine Austrocknung der Prüfkörper statt.

Die Rohdichten wurden nach Beendigung aller Versuche an denjenigen Lamellen bestimmt, die den größeren Anteil an der Bruchfläche hatten und bezieht sich folglich auf den niedrigeren Wert der Holzfeuchte von ca. 8,6%. In Anlehnung an DIN EN 384 dürfte die Rohdichte der ersten Reihe mit einer mittleren Holzfeuchte von 10,4% erhöht werden, um die Rohdichte bezogen auf die Holzfeuchte zum Zeitpunkt der Quersugversuche zu erhalten. Je Prozent Differenz der Holzfeuchte sollte die Rohdichte nach dieser Norm um 0,5% erhöht werden, die Rohdichte der ersten Reihe also um

$$(10,4\% - 8,6\%) \cdot 0,5\% = 0,9\% \quad (14).$$

Die Genauigkeit der elektrischen Holzfeuchtemessung und des Verdrängungsverfahrens, mit dem die Rohdichte der unregelmäßig geformten Prüfkörper bestimmt wurde, liegt über 1%, so daß diese Rückrechnung der Rohdichte nicht gerechtfertigt ist.

Bild 3-1 zeigt die Summenhäufigkeit der mit dem Verdrängungsverfahren bestimmten Rohdichten der Prüfkörper mit einem Volumen  $V_0 = 0,01 \text{ m}^3$ . Zur Bestimmung der Rohdichte wurden astfreie Stücke aus den Lamellen entnommen, die den größeren Anteil an den Bruchflächen hatten.



**Bild 3-1:** Summenhäufigkeit der Rohdichten der Prüfkörper

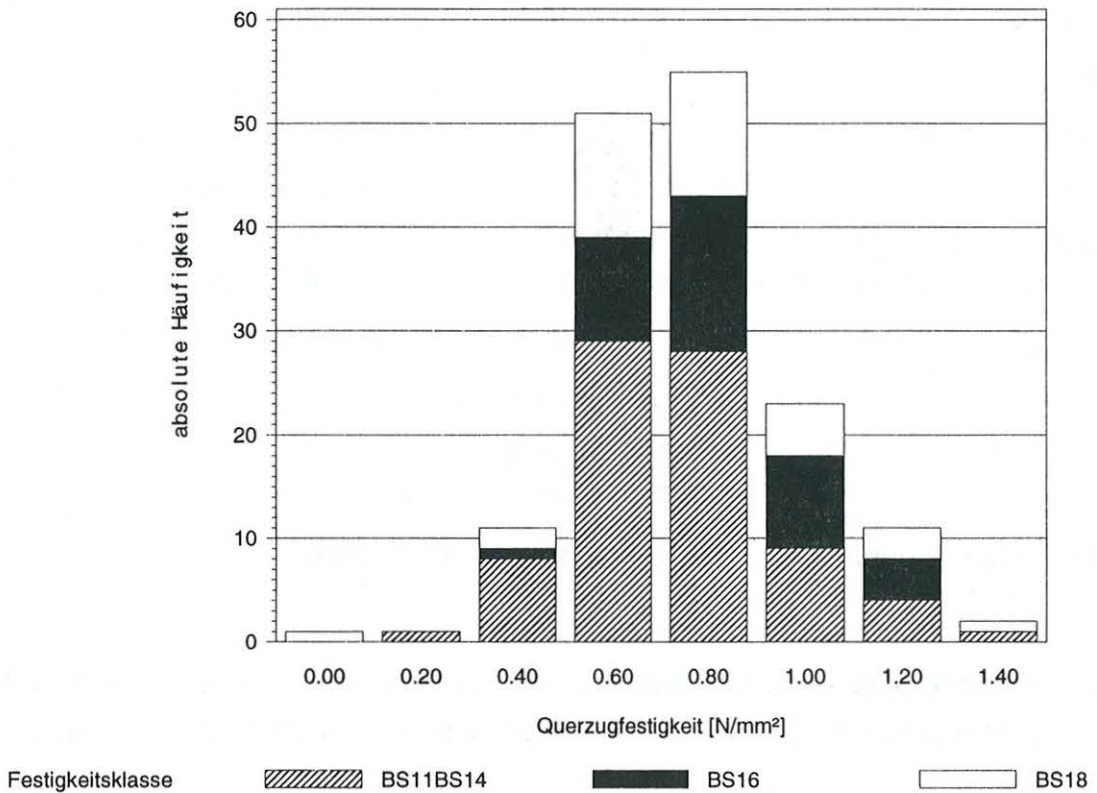
Tabelle 3-2 enthält eine Zusammenstellung der statistischen Parameter der Lamellendicke, der Breite  $b$  nach Bild 1-2 und der Rohdichte der verwendeten Prüfkörper.

**Tabelle 3-2:** Lamellendicke, Breite  $b$  und Rohdichte

Parameter	Festigkeitsklasse	Mittelwert	Minimum	Maximum	Standardabwg.
Lamellendicke [mm]	BS11, BS14	35,7	20,0	41,0	6,51
	BS16	31,7	30,0	39,0	1,43
	BS18	31,7	30,0	32,5	0,55
Breite [mm]	BS11, BS14	167	98	236	36,3
	BS16	166	98	235	37,7
	BS18	143	98	217	38,3
Rohdichte der gerissenen Lamelle [kg/m³]	BS11, BS14	423	328	554	52,5
	BS16	443	351	541	36,2
	BS18	477	407	526	37,0

### 3.2 Prüfkörper mit dem Bezugsvolumen $V_0 = 0,01 \text{ m}^3$

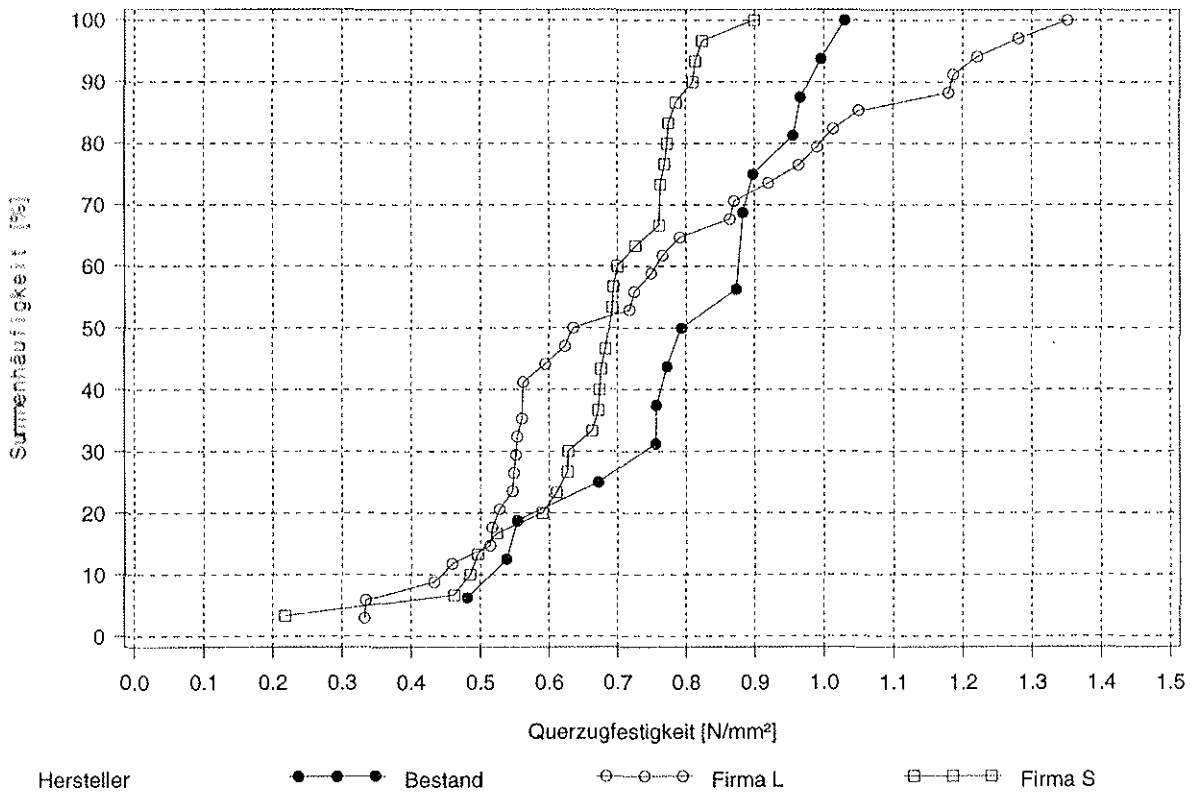
Bild 3-2 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Querkzugfestigkeit getrennt nach den Festigkeitsklassen.



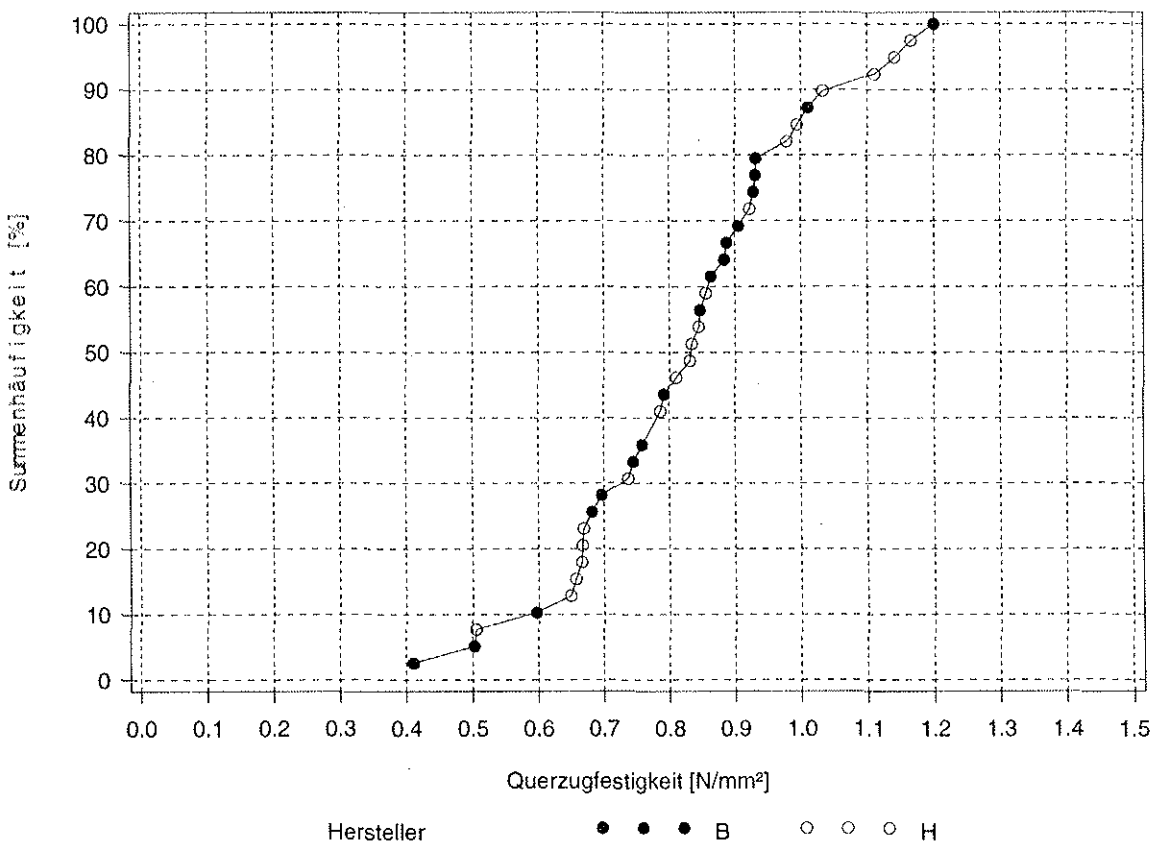
**Bild 3-2:** Querkzugfestigkeit der Prüfkörper mit einem Bezugsvolumen von  $V_0 = 0,01 \text{ m}^3$

Bild 3-3 zeigt die Summenhäufigkeit der Querkzugfestigkeit derjenigen Prüfkörper, die den Festigkeitsklassen BS11 oder BS14 angehören, getrennt nach Herstellern, Bild 3-4 entsprechend für die Festigkeitsklasse BS16 und Bild 3-5 für BS18.

In Bild 3-3 ist der Hersteller der Festigkeitsklasse BS11 als Firma L bezeichnet, derjenige der Festigkeitsklasse BS14 mit Firma S und die an der Versuchsanstalt noch vorhandenen Prüfkörper mit Bestand.

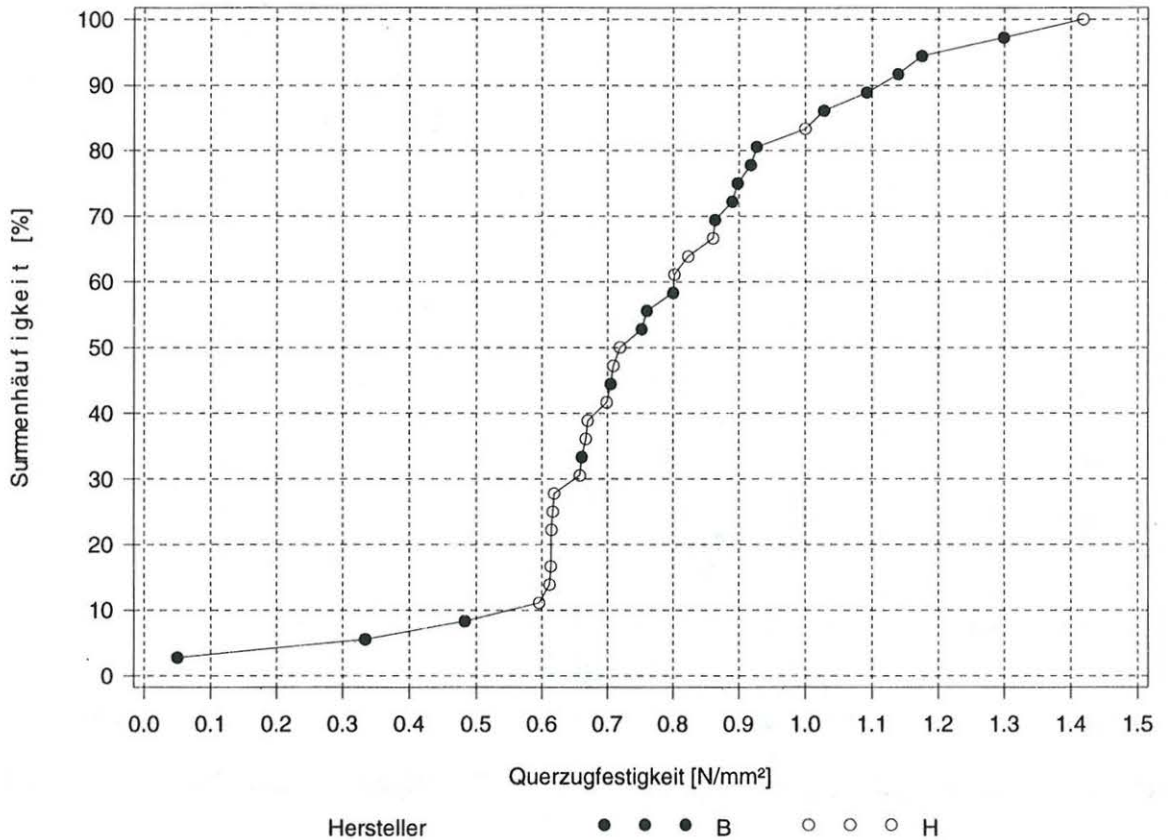


**Bild 3-3:** Querzugfestigkeit der Prüfkörper der Festigkeitsklasse BS11 oder BS14



**Bild 3-4:** Querzugfestigkeit der Prüfkörper der Festigkeitsklasse BS 16





**Bild 3-5:** Querzugfestigkeit der Prüfkörper der Festigkeitsklasse BS 18

Tabelle 3-3 enthält die Mittelwerte der Querzugfestigkeit und die Standardabweichungen der Prüfkörper getrennt nach Hersteller und Festigkeitsklassen.

**Tabelle 3-3:** Nach Hersteller und Festigkeitsklasse getrennte Auswertung

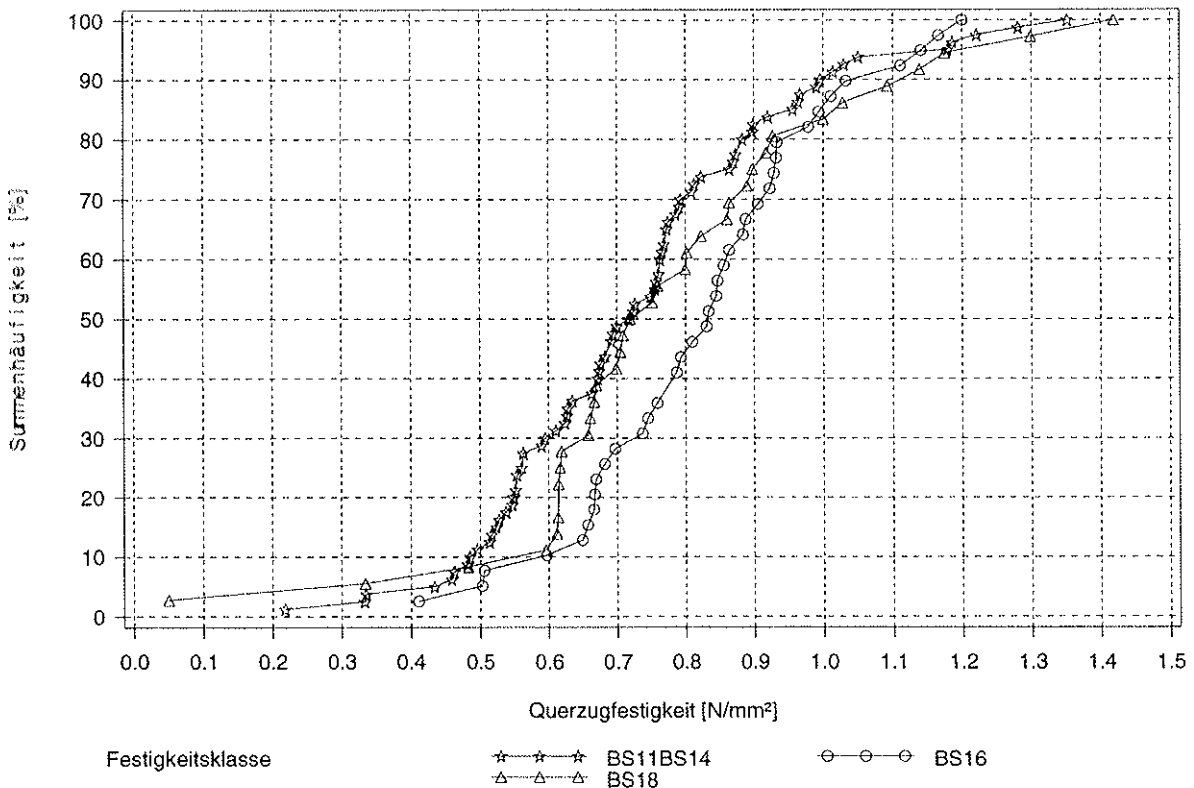
Hersteller	Festigkeitsklasse	Anzahl	Mittelwert der Querszugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Standardabweichung [N/mm <sup>2</sup> ]
Bestand	BS11 BS14	16	0,80	0,168
L	BS11	33	0,76	0,280
S	BS14	30	0,68	0,136
H	BS16	20	0,84	0,184
B	BS16	18	0,81	0,187
H	BS18	18	0,74	0,201
B	BS18	18	0,82	0,307

Die drei Prüfkörper mit den niedrigsten Werten der Querkzugfestigkeit der Festigkeitsklasse BS18 stammen zwar von einer Firma, wurden aber nicht demselben Träger entnommen. Die Breite dieser Prüfkörper betrug 100 mm, 140 mm bzw. 220 mm.

Die Standardabweichung der Querkzugfestigkeit bei Betrieb L, des Herstellers der Festigkeitsklasse BS11, und bei Betrieb B bei der Festigkeitsklasse BS18 ist deutlich höher als die Standardabweichung der übrigen Teilkollektive. Beim Betrieb L ist dies möglicherweise durch die eher zufällige Verwendung von Lamellen der Sortierklassen S10 und S13 zu erklären, da er zum Zeitpunkt der Herstellung nur die Festigkeitsklasse BS11 produzierte.

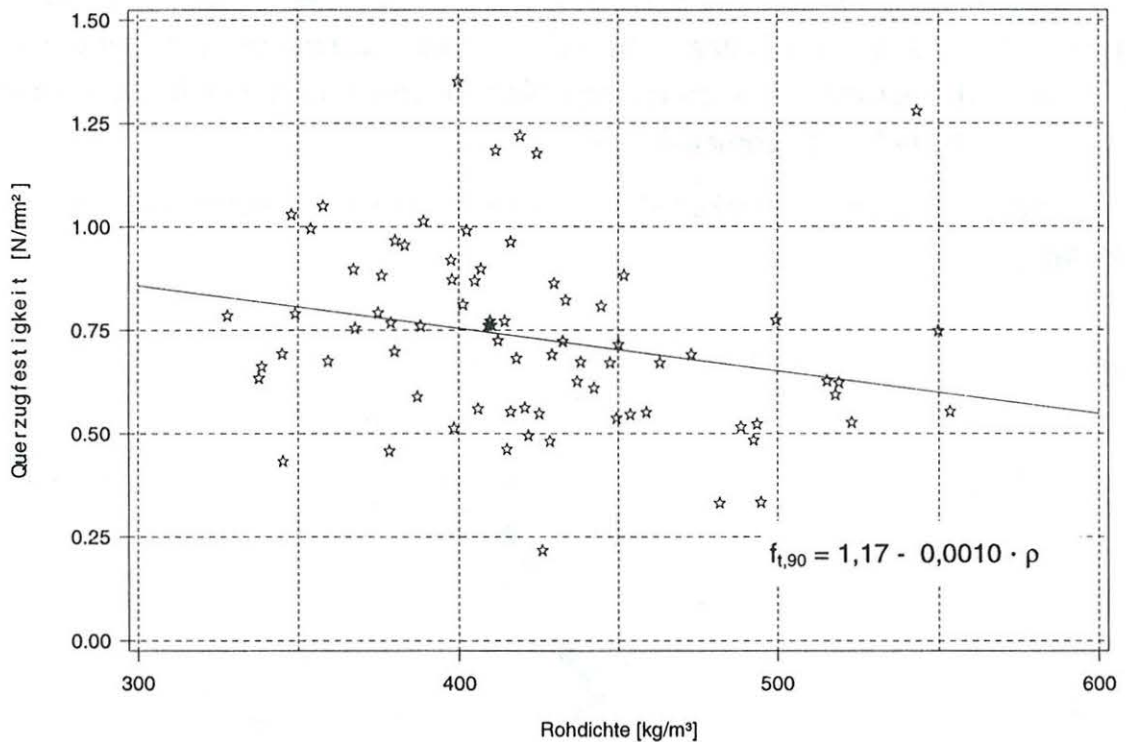
Bei den Prüfkörpern der Festigkeitsklasse BS18 des Betriebes B kann die höhere Standardabweichung nicht erklärt werden. Beide Betriebe, die die Festigkeitsklasse BS18 produzieren, verwenden das gleiche Verfahren der maschinellen Holzsortierung. Die Eigenschaften des Holzes, die sich auf die Querkzugfestigkeit erhöhend oder erniedrigend auswirken, werden offensichtlich durch die maschinelle Sortierung nicht ausreichend erfaßt oder berücksichtigt.

Bild 3-6 zeigt die Summenhäufigkeit der Querkzugfestigkeit der verschiedenen Festigkeitsklassen.



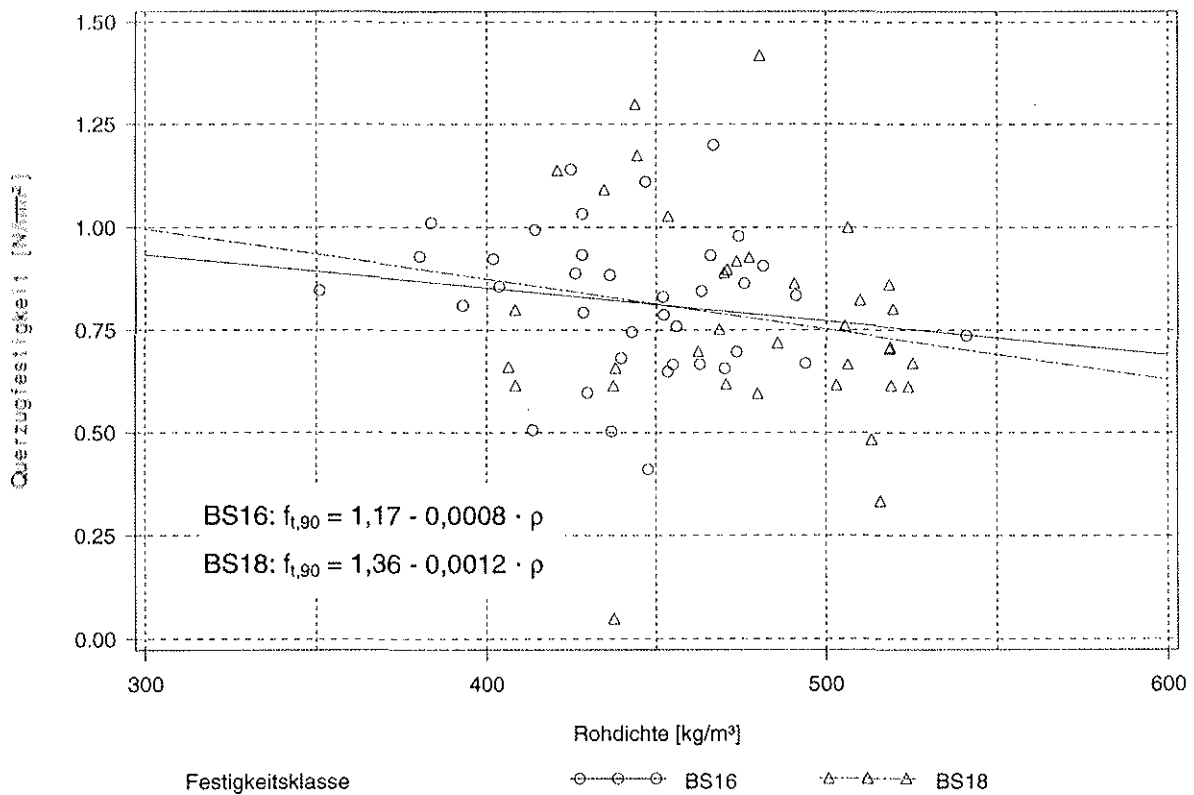
**Bild 3-6:** Querkzugfestigkeit der Prüfkörper mit einem Bezugsvolumen von  $V_0 = 0,01 \text{ m}^3$

Nur der obere Bereich der Summenhäufigkeit der Festigkeitsklasse BS18 weist höhere Werte der Querkzugfestigkeit auf als die Festigkeitsklasse BS16. Ein Großteil der Prüfkörper der Festigkeitsklasse BS16 hat eine größere Querkzugfestigkeit als die Prüfkörper der Festigkeitsklasse BS18. Da die Festigkeitsklassen BS11 und BS14 mit visuell sortierten Lamellen hergestellt wurden, ist nicht auszuschließen, daß auch hier Lamellen für den Bruch maßgebend waren, die bei einer maschinellen Sortierung in höhere Sortierklassen eingestuft worden wären. In Bild 3-7 ist Querkzugfestigkeit der Prüfkörper der Festigkeitsklassen BS11 und BS14 über der Rohdichte aufgetragen. Der Korrelationskoeffizient ist mit  $r = -0,247$  klein, trotzdem ist eine Tendenz erkennbar, daß höhere Rohdichten zu einer geringeren Querkzugfestigkeit führen.



**Bild 3-7:** Querkzugfestigkeit der Prüfkörper der Festigkeitsklassen BS11 und BS14 über der Rohdichte

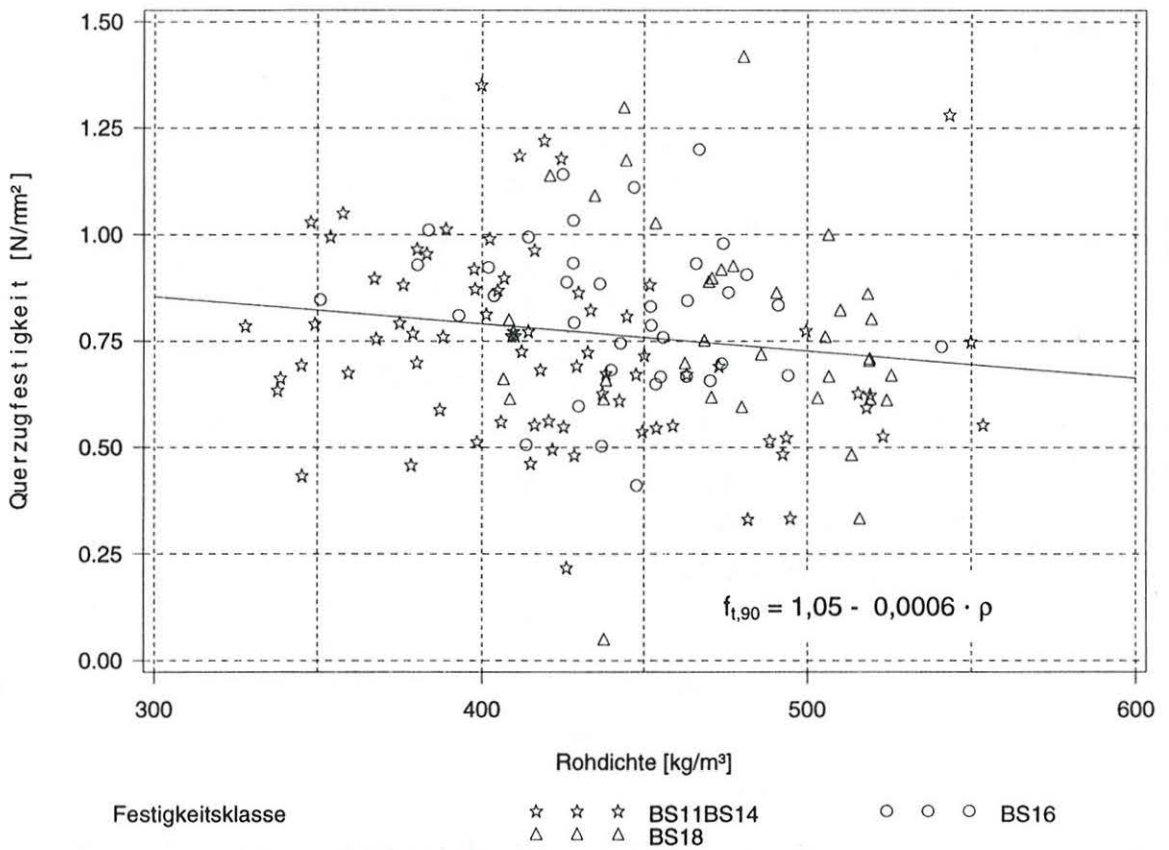
Bild 3-8 zeigt die Querkzugfestigkeit der Festigkeitsklassen BS16 und BS18 über der Rohdichte.



**Bild 3-8:** Querkzugfestigkeit der Prüfkörper der Festigkeitsklasse BS16 und BS18 über der Rohdichte

Die Korrelationskoeffizienten betragen für BS16  $r = -0,165$  und für BS18  $r = -0,174$ .

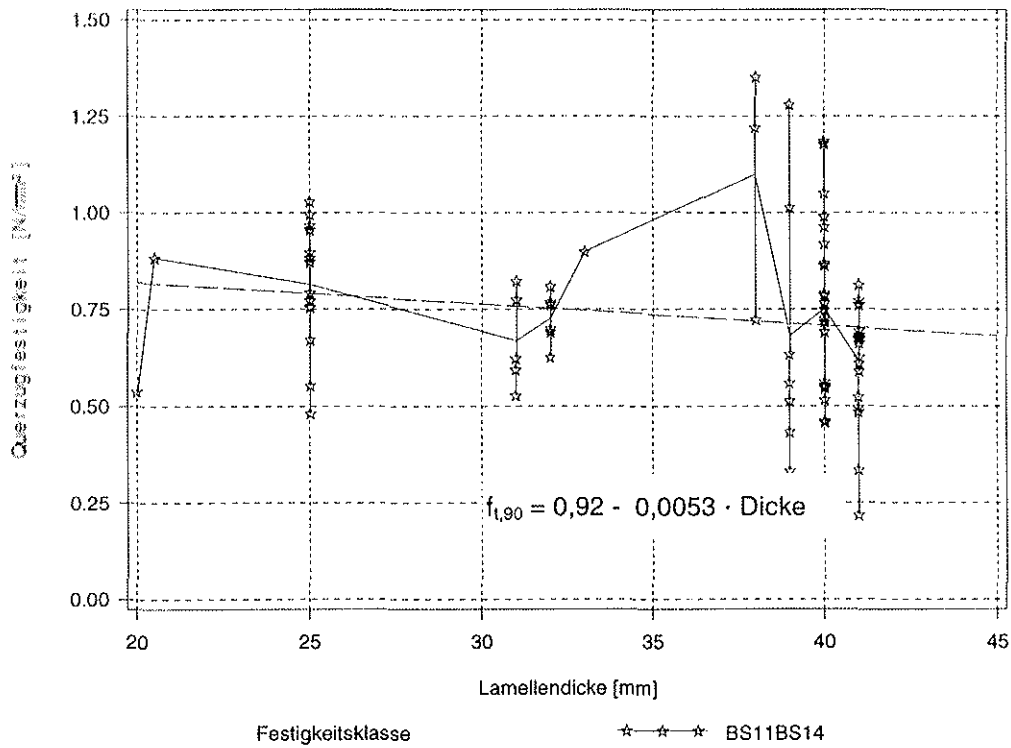
In Bild 3-9 ist die für alle Festigkeitsklassen ermittelte Regressionsgerade eingetragen. Der Korrelationskoeffizient beträgt  $r = -0,145$ .



**Bild 3-9:** Querkzugfestigkeit der Prüfkörper sämtlicher Festigkeitsklassen über der Rohdichte

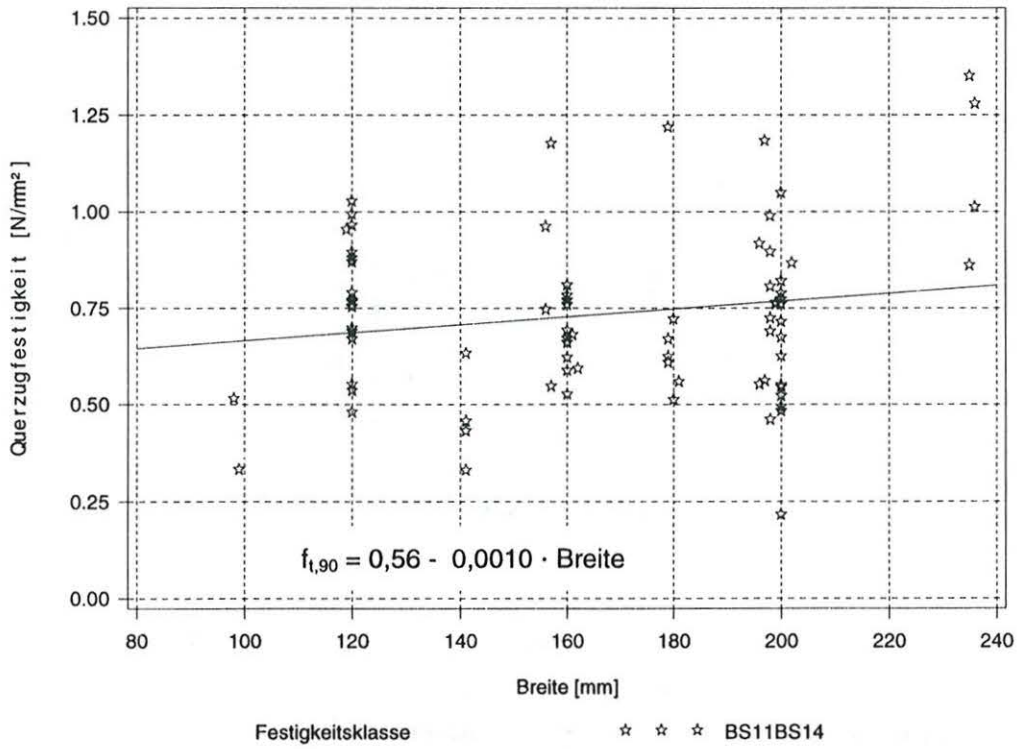
Bild 3-10 zeigt die Querkzugfestigkeit über der Lamellendicke für die Prüfkörper, die der Festigkeitsklasse BS11 oder BS14 angehörten. Die Mittelwerte der Prüfkörper mit gleicher Lamellendicke sind mit einer durchgezogenen Linie verbunden. Der Korrelationskoeffizient beträgt  $r = -0,164$ . Da die Dicken der Festigkeitsklassen BS16 und BS18 lediglich zwischen 30 und 39 mm lagen, wird der Einfluß der Lamellendicke auf die Querkzugfestigkeit bei diesen Klassen nicht untersucht.



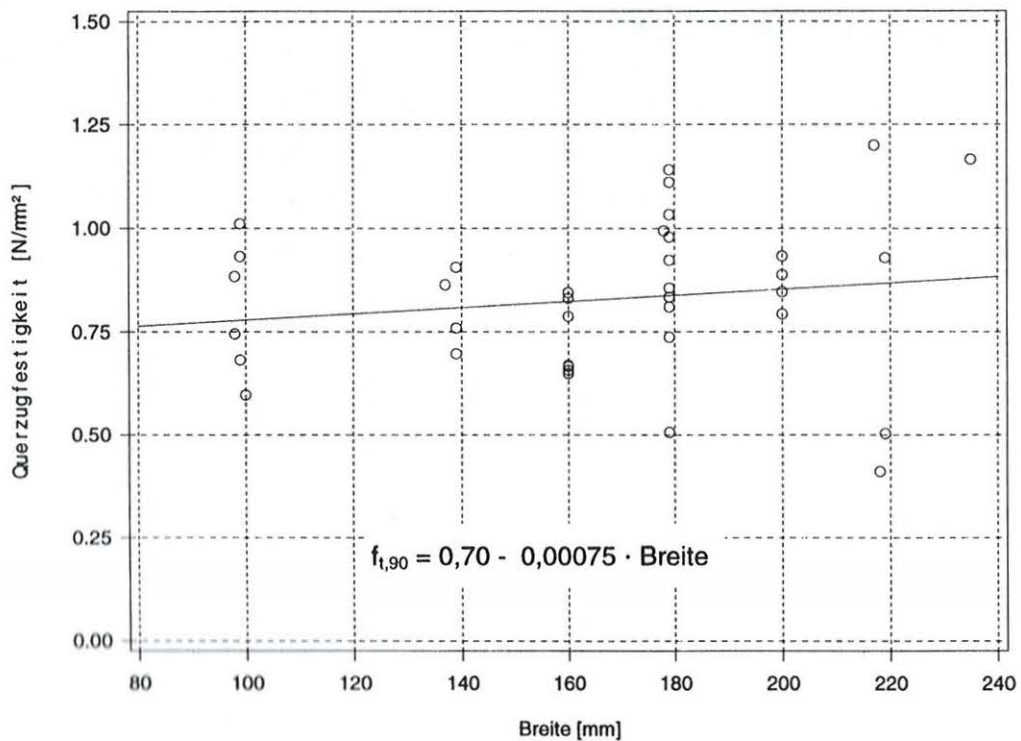


**Bild 3-10:** Querzugfestigkeit der Prüfkörper der Festigkeitsklassen BS11 oder BS14 über der Lamellendicke

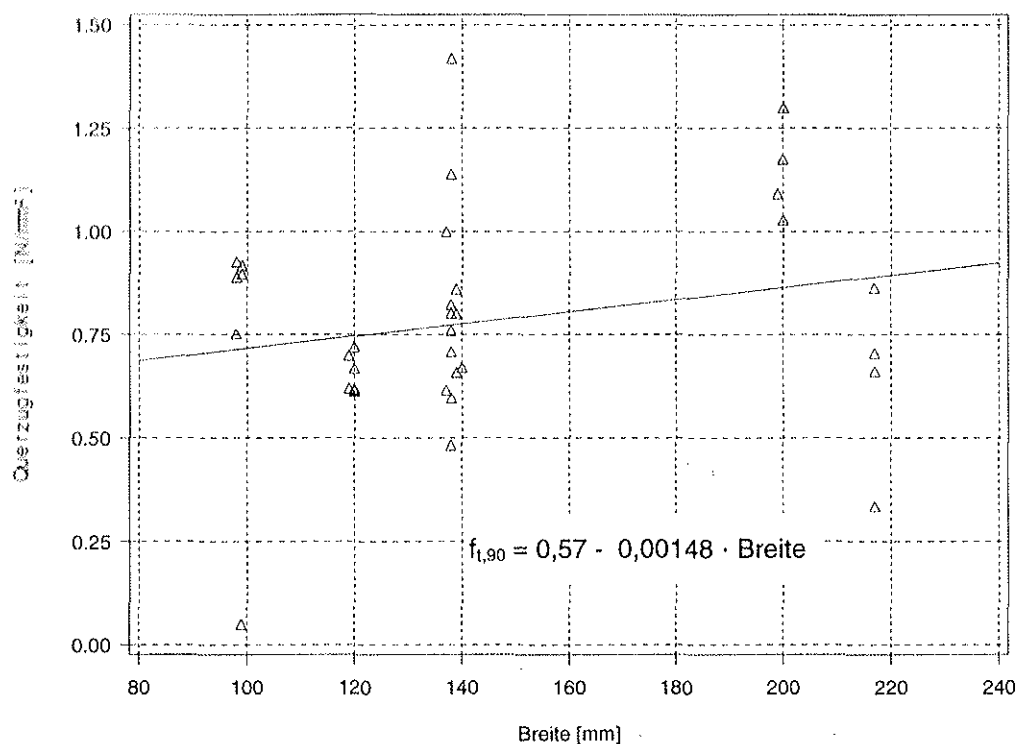
In den Bildern 3-11 bis 3-13 ist die Querzugfestigkeit der einzelnen Festigkeitsklassen über der Lamellenbreite aufgetragen.



**Bild 3-11:** Querzugfestigkeit der Prüfkörper der Festigkeitsklassen BS11 oder BS14 über der Lamellenbreite



**Bild 3-12:** Querzugfestigkeit der Prüfkörper der Festigkeitsklassen BS16 über der Lamellenbreite



**Bild 3-13:** Querzugfestigkeit der Prüfkörper der Festigkeitsklassen BS18 über der Lamellenbreite

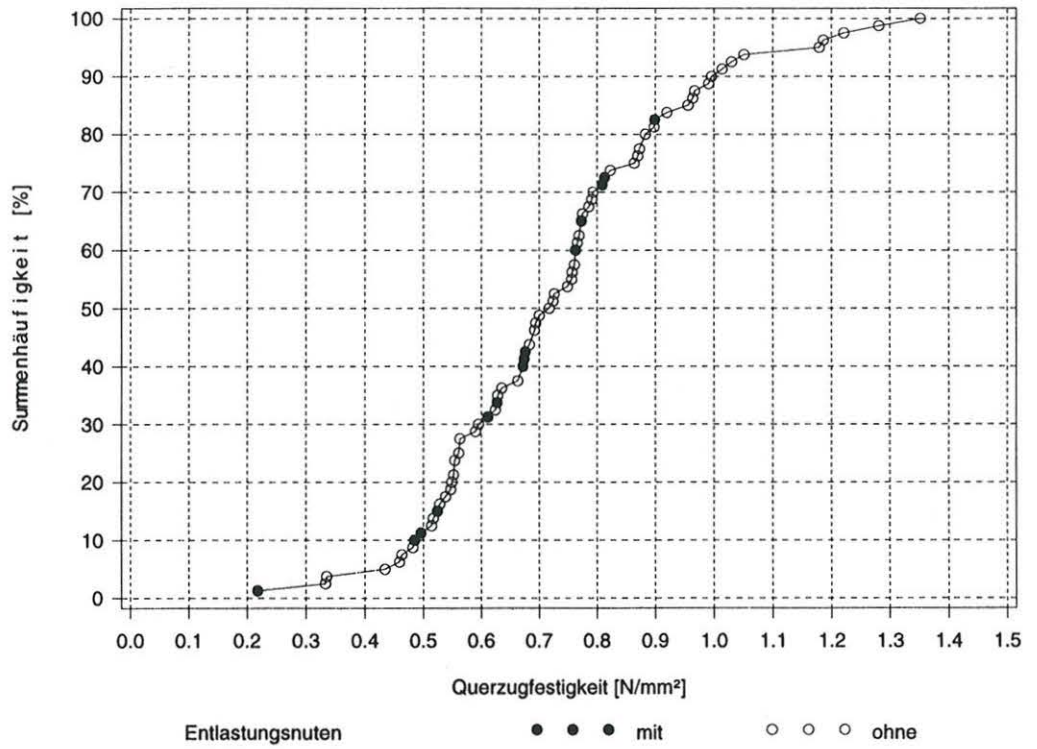
Die Korrelationskoeffizienten der Querzugfestigkeit mit der Lamellenbreite betragen für die Prüfkörper der Festigkeitsklassen BS11 und BS14  $r = 0,161$ , für die der Festigkeitsklasse BS16  $r = 0,154$  und für BS18  $r = 0,218$ .

Einige der Prüfkörper wiesen Entlastungsnuten auf.

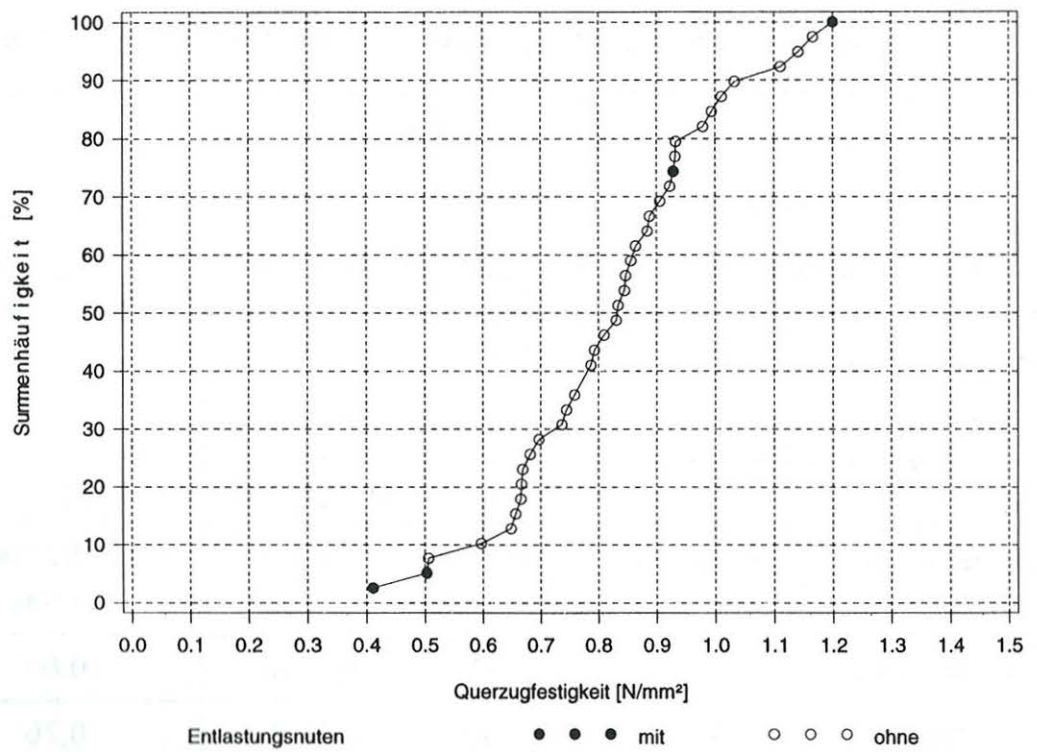
Tabelle 3-4 zeigt die Mittelwerte der Querzugfestigkeit getrennt nach Festigkeitsklassen und dem Vorhandensein von Nuten, die Bilder 3-14 bis 3-16 zeigen entsprechend die Summenhäufigkeit.

**Tabelle 3-4:** Einfluß von Entlastungsnuten auf die Querzugfestigkeit

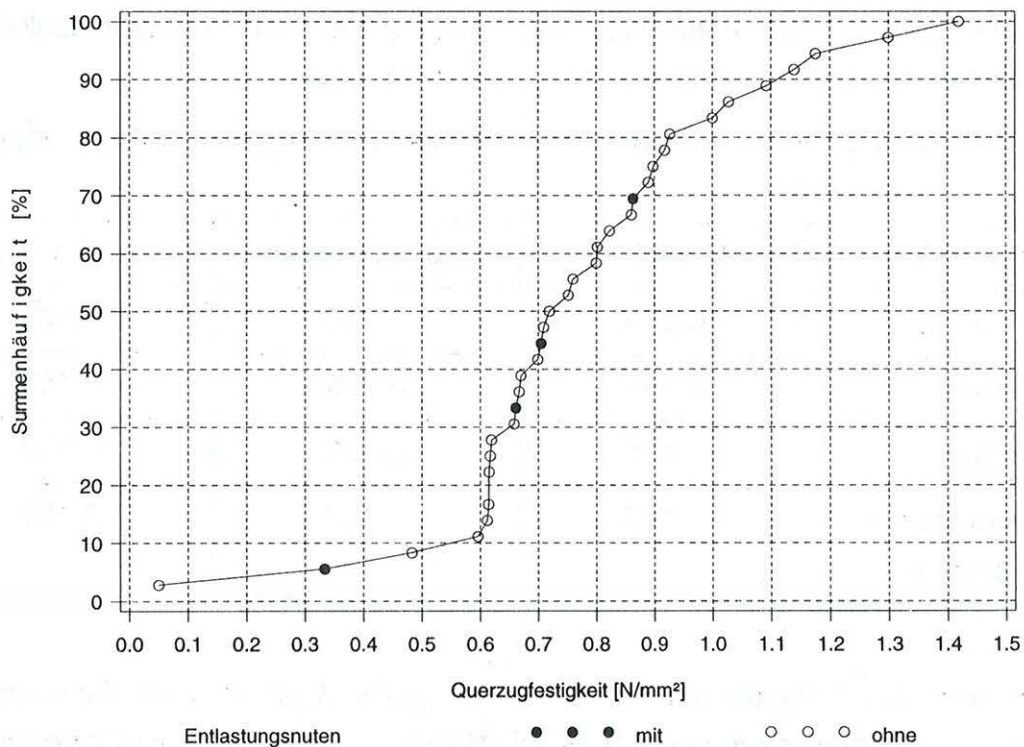
Festigkeitsklasse	Mittelwert der Querzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]			
	Anzahl	ohne Entlastungsnuten	Anzahl	mit Entlastungsnuten
BS11 oder BS14	64	0,75	15	0,65
BS16	34	0,84	4	0,76
BS18	32	0,80	4	0,64



**Bild 3-14:** Querzugfestigkeit der Prüfkörper der Festigkeitsklassen BS11 und BS 14



**Bild 3-15:** Querzugfestigkeit der Prüfkörper der Festigkeitsklasse BS16



**Bild 3-16:** Querzugfestigkeit der Prüfkörper der Festigkeitsklasse BS18

Die Mittelwerte der Querzugfestigkeit nach Tabelle 3-4 der Prüfkörper mit Entlastungsnuten sind geringer, als für Prüfkörper ohne Entlastungsnuten. Vier Prüfkörper in den Festigkeitsklassen BS16 und BS18 hatten Entlastungsnuten. Diese vier Prüfkörper wurden jeweils einem Träger entnommen, trotzdem streuen die Querzugfestigkeiten über den gesamten Bereich. Die Bedeutung von Entlastungsnuten für die Querzugfestigkeit scheint gering zu sein.

Tabelle 3-5 enthält die wichtigsten statistischen Kennwerte für die ermittelten Querzugfestigkeiten.

**Tabelle 3-5:** statistische Kennwerte der Querzugfestigkeit

Festigkeitsklasse	Anzahl	Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	Minimum [N/mm <sup>2</sup> ]	Maximum [N/mm <sup>2</sup> ]	5% - Fraktile [N/mm <sup>2</sup> ]	Standard- abweichg. [N/mm <sup>2</sup> ]
BS11 oder BS14	79	0,73	0,22	1,35	0,43	0,22
BS16	38	0,83	0,41	1,20	0,50	0,18
BS18	36	0,78	0,05	1,42	0,33	0,26
alle gemeinsam ausgewertet	153	0,77	0,05	1,42	0,46	0,22



Tabelle 3-6 zeigt die Korrelationskoeffizienten zwischen der Querkzugfestigkeit und der Rohdichte, der Lamellendicke und der Lamellenbreite.

**Tabelle 3-6:** Korrelationskoeffizienten zwischen der Querkzugfestigkeit und anderen Parametern

Festigkeitsklasse	Rohdichte	Lamellendicke	Lamellenbreite
BS11 oder BS14	-0,248	-0,159	0,171
BS16	-0,164	0,085	0,153
BS18	-0,174	0,223	0,218
alle gemeinsam ausgewertet	-0,148	-0,151	0,161

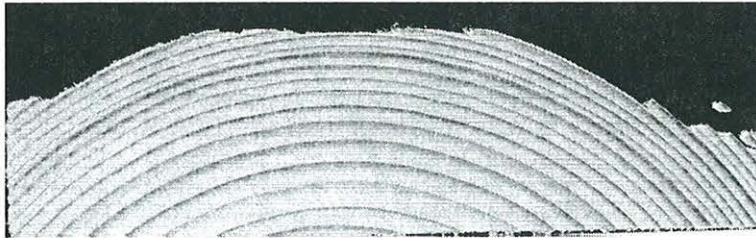
Die Korrelationskoeffizienten sind alle sehr niedrig. Die Korrelationskoeffizienten zwischen der Querkzugfestigkeit und der Rohdichte sind negativ, entsprechend den Regressionsgeraden der Bilder 3-7 bis 3-9 mit negativer Steigung. Dies widerspricht den Annahmen der DIN EN 1194, die als charakteristischen Wert der Querkzugfestigkeit von Brettschichtholz einen um 15% erhöhten Wert der Lamellenquerkzugfestigkeit vorgibt. Für die Querkzugfestigkeit der Lamellen wiederum wird nach DIN EN 384 eine Korrelation mit der Rohdichte nach folgender Gleichung angenommen:

$$f_{t,90,k} = 0,001 \rho_k \quad (15).$$

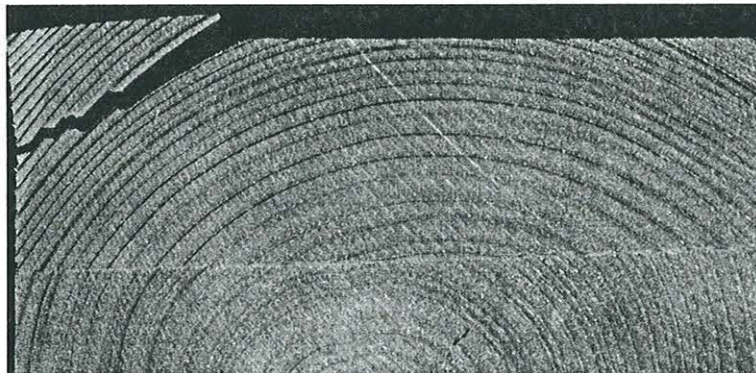
Für den Kleinstwert von  $f_{t,90} = 0,05 \text{ N/mm}^2$  bei einem Prüfkörper der Festigkeitsklasse BS18 ist Ringschäle evtl. im Zusammenwirken mit einer mechanischen Beschädigung bei der Herstellung des Prüfkörpers verantwortlich zu machen. Dieser Holzfehler wurde weder bei der maschinellen Festigkeitssortierung der Lamelle noch bei der Herstellung des Prüfkörpers entdeckt. Bemerkte wurde die Ringschäle jedoch bei einem Prüfkörper, der für Versuche mit kleineren Volumen vorgesehen war und dem gleichen Träger entnommen wurde. Bild 3-17 zeigt den Prüfkörper der Festigkeitsklasse BS18 mit der geringsten Querkzugfestigkeit, Bild 3-18 den nicht verwendeten Prüfkörper aus dem gleichen Träger mit Beschädigung.

Eine sprunghafte Veränderung der Jahrringbreite, die die Entstehung der Ringschäle begünstigt, ist nicht zu erkennen. Es ist deshalb nicht auszuschließen, daß eine mechanische Beschädigung bei der Herstellung stattgefunden hat. Trotzdem muß ein Holzfehler bereits vor der Herstellung vorgelegen haben, da die Prüfkörper immer gleichartig hergestellt wurden.

Die Rohdichte der in Bild 3-17 gezeigten Lamelle lag mit  $438 \text{ kg/m}^3$  zwar unter dem Durchschnitt für die Prüfkörper der Festigkeitsklasse BS18 von  $477 \text{ kg/m}^3$ , sie wird aber noch von 20% der Prüfkörper dieser Festigkeitsklasse unterschritten.



**Bild 3-17:** Für den Bruch maßgebende Lamelle des Prüfkörpers mit der geringsten Querkzugfestigkeit



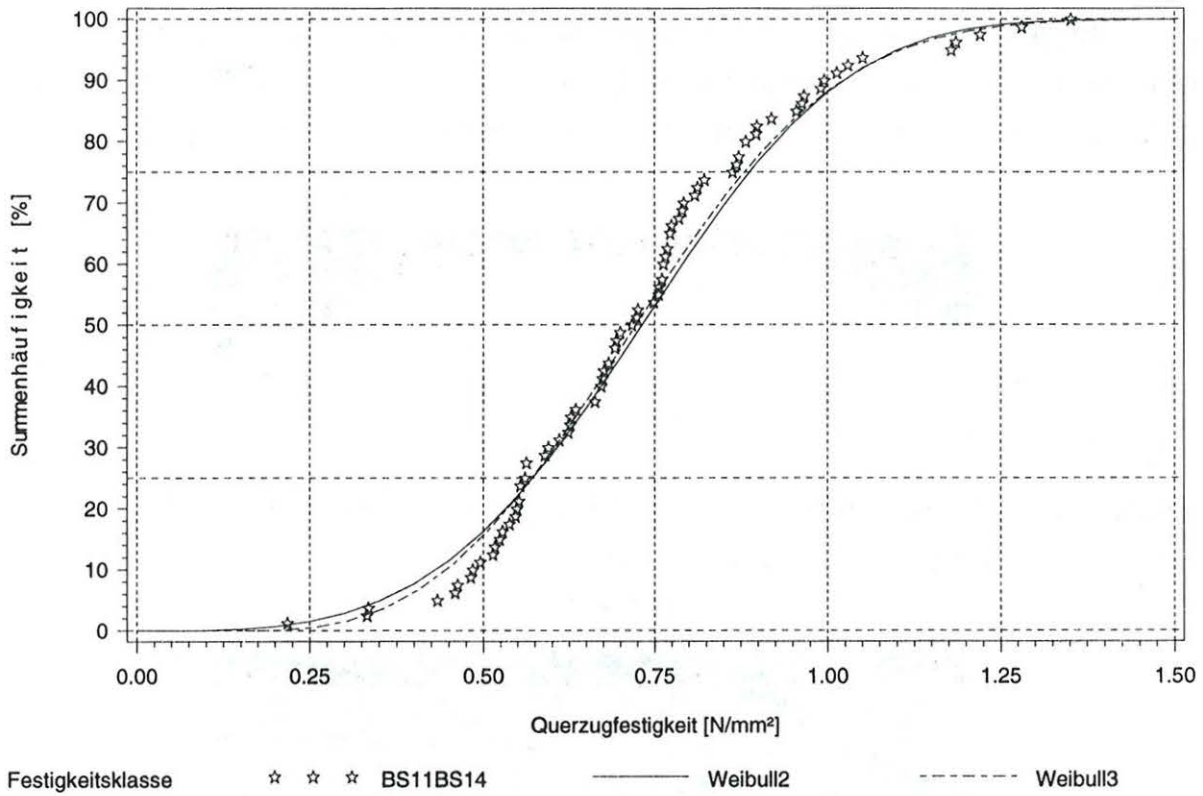
**Bild 3-18:** Als Prüfkörper vorgesehenes Stück mit Ringschale und evtl. mechanischer Beschädigung

Eine ähnliche Beschädigung wurde noch bei der Herstellung eines weiteren Prüfkörpers bemerkt, der wie das in Bild 3-18 gezeigte Stück nicht verwendet wurde.

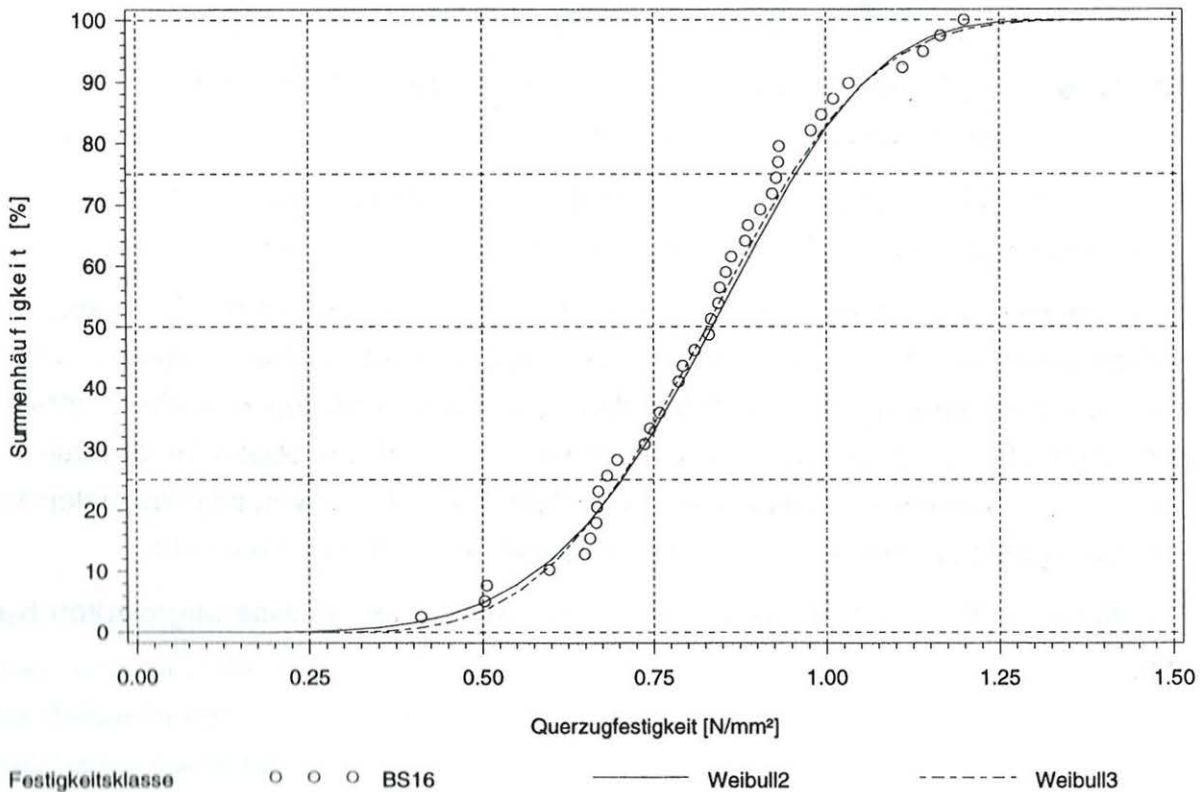
Neben diesen makroskopischen Fehlern scheinen Eigenschaften für die Querkzugfestigkeit maßgebend zu sein, die bei einer makroskopischen Betrachtung kaum zu erfassen sind. Im Folgenden werden den Häufigkeitsverteilungen Weibullverteilungen angepaßt. Dabei ist zu beachten, daß die oben beschriebene Ringschale nur bedingt die theoretischen Annahmen von Weibull erfüllt, der von infinitesimalen Volumenelementen mit einer statistischen Verteilung der Festigkeit ausgeht.

Die Bilder 3-19 bis 3-22 enthalten die an die Versuchsergebnisse angepaßten Kurven.





**Bild 3-19:** Weibullverteilungen für die Prüfkörper der Festigkeitsklassen BS11 oder BS14



**Bild 3-20:** Weibullverteilungen für die Prüfkörper der Festigkeitsklassen BS16



Tabelle 3-7 enthält die mit der Maximum-Likelihood-Methode von einem Software-Programm an die Versuchsergebnisse angepaßten, 2- und 3-parametrischen Gleichungen der Weibullverteilungen (SAS 1996) und die mit dem  $\chi^2$ -Test ermittelten Signifikanzniveaus dieser Gleichungen.

**Tabelle 3-7:** Weibullverteilungen, Signifikanzniveau  $\alpha$

Festigkeitsklasse	2-parametrische Weibullverteilung	3-parametrische Weibullverteilung
BS11 oder BS14	$S = 1 - \exp - \{f_{t,90}/0,813\}^{3,591}$ $\alpha = 6,2 \%$	$S = 1 - \exp - \{(f_{t,90}-0,153)/0,651\}^{2,848}$ $\alpha = 9,2 \%$
BS16	$S = 1 - \exp - \{f_{t,90}/0,900\}^{5,092}$ $\alpha = 42,6 \%$	$S = 1 - \exp - \{(f_{t,90}-0,234)/0,659\}^{3,650}$ $\alpha = 71,5 \%$
BS18	$S = 1 - \exp - \{f_{t,90}/0,862\}^{3,172}$ $\alpha = 27,3 \%$	$S = 1 - \exp - \{(f_{t,90}+0,218)/1,093\}^{4,190}$ $\alpha = 48,1 \%$
alle zusammen	$S = 1 - \exp - \{f_{t,90}/0,848\}^{3,688}$ $\alpha = 2,2 \%$	$S = 1 - \exp - \{(f_{t,90}+0,060)/0,910\}^{3,987}$ $\alpha = 5,4 \%$

Um die Spannungsverteilung in den Prüfkörpern abschätzen zu können, wurden wiederum FE-Berechnungen durchgeführt. Wie in Abschnitt 2.2 beziehen sich die Materialeigenschaften auf ein zylindrisches Koordinatensystem, um so die Orthotropie und die deutlichen Steifigkeitsunterschiede zwischen der radialen und der tangentialen Richtung zu erfassen. Bild 3-23 zeigt das verwendete System einer Lamelle. Der Prüfkörper wurde aus 13 Lamellen mit einer Dicke von 30 mm simuliert, an den zwei mit einer Gleichstreckenlast von 0,77 N/mm<sup>2</sup> beanspruchte Zwischenstücke mit einer Länge von 150 mm angefügt waren.

Die verwendete Elastizitätsmatrix orientiert sich wie in Abschnitt 2.2 an den von Neuhaus (1981) an fehlerfreiem Vollholz bei 12% Holzfeuchte ermittelten Elastizitätszahlen.

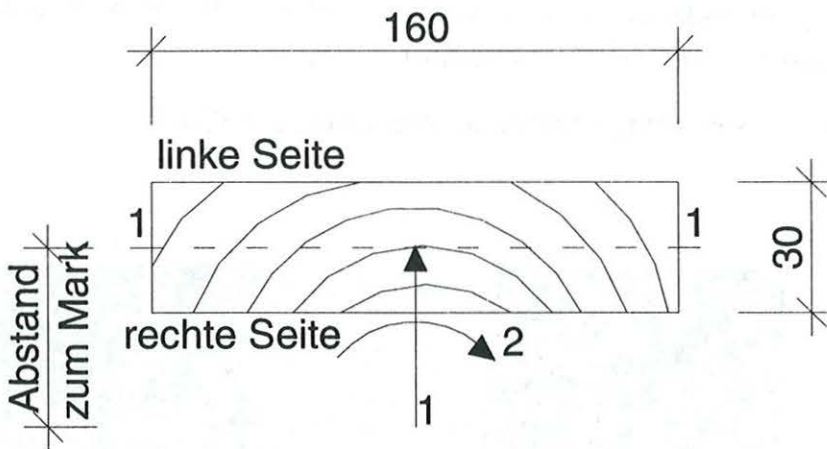
Der Index 1 bezeichnet die radiale Richtung, 2 die tangentiale und 3 die faserparallele. Der erste Index gibt die Richtung der Flächennormalen an, der zweite die Richtung des Spannungs- oder Verzerrungsvektors.



$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} & 0 & 0 & 0 \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} & 0 & 0 & 0 \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix}$$

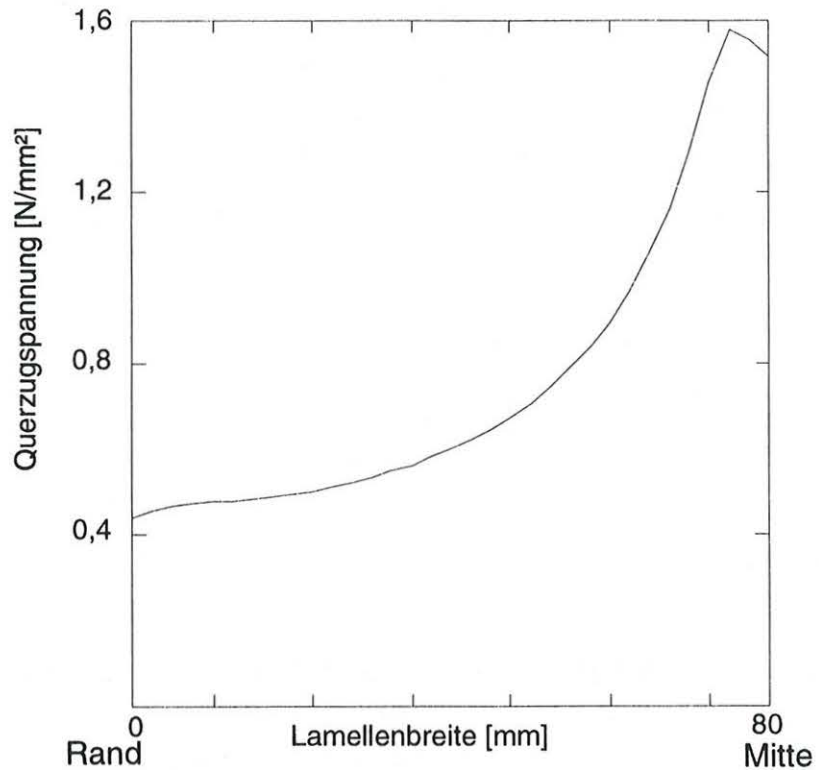
$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,25 \cdot 10^{-3} & -750 \cdot 10^{-6} & -50,0 \cdot 10^{-6} & 0 & 0 & 0 \\ -750 \cdot 10^{-6} & 5,0 \cdot 10^{-3} & -64 \cdot 10^{-6} & 0 & 0 & 0 \\ -50,0 \cdot 10^{-6} & -64 \cdot 10^{-6} & 83,33 \cdot 10^{-6} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 24 \cdot 10^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1,60 \cdot 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,35 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix}$$

Wiederum wurde die Elastizitätszahl  $a_{22}$  abweichend von Neuhaus zu  $5,0 \cdot 10^{-3}$   $[\text{N}/\text{mm}^2]^{-1}$  gewählt, um den bei den Vollholzversuchen ermittelten, geringeren Elastizitätsmodul bei überwiegend tangentialer Beanspruchung zu berücksichtigen.



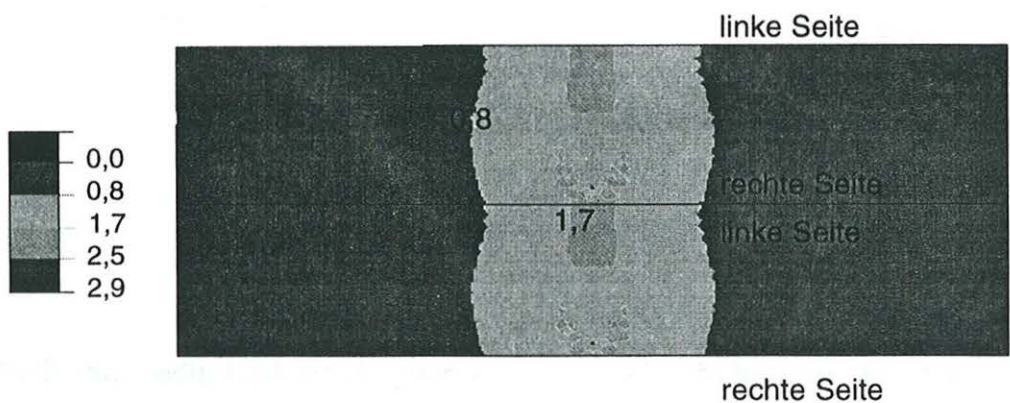
**Bild 3-23:** Anordnung des zylindrischen Koordinatensystems

Bild 3-24 zeigt den Verlauf der Querkzugspannung über die halbe Lamellenbreite entlang Schnitt 1-1, für Koordinatensysteme, deren Zylinderachsen auf den Leimfugen, d.h. im Abstand von 15 mm vom Schwerpunkt der Lamellen liegen. Die Markröhren aller Lamellen würden also auf den Leimfugen liegen.



**Bild 3-24:** Spannungsverlauf über halbe Lamellenbreite, Markröhre im Abstand von 15 mm vom Zentrum der Lamelle

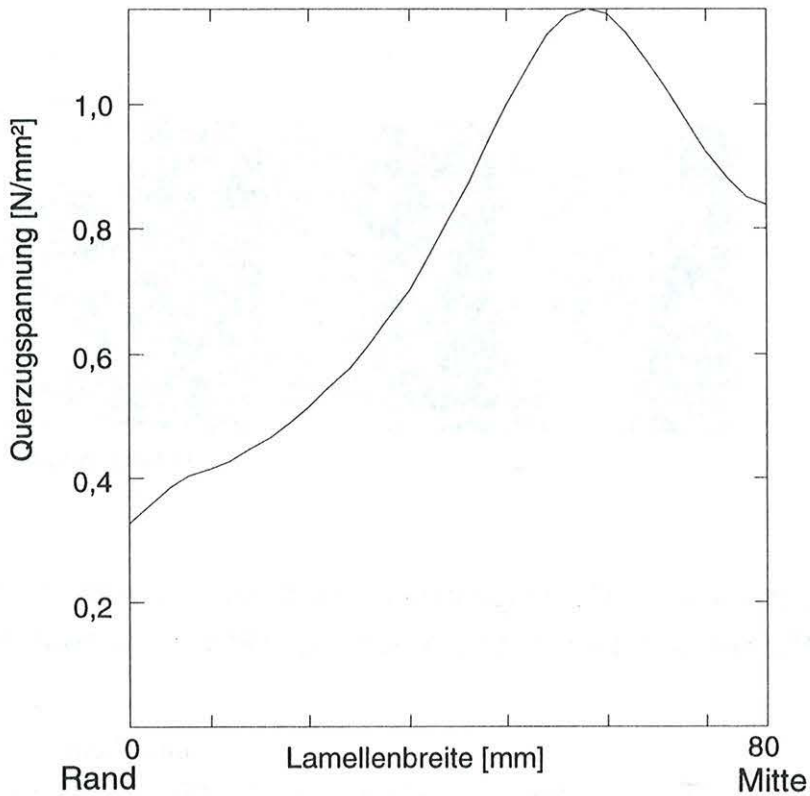
Bild 3-25 zeigt die Spannungsverteilung über zwei Lamellen.



**Bild 3-25:** Spannungsverteilung über zwei Lamellen

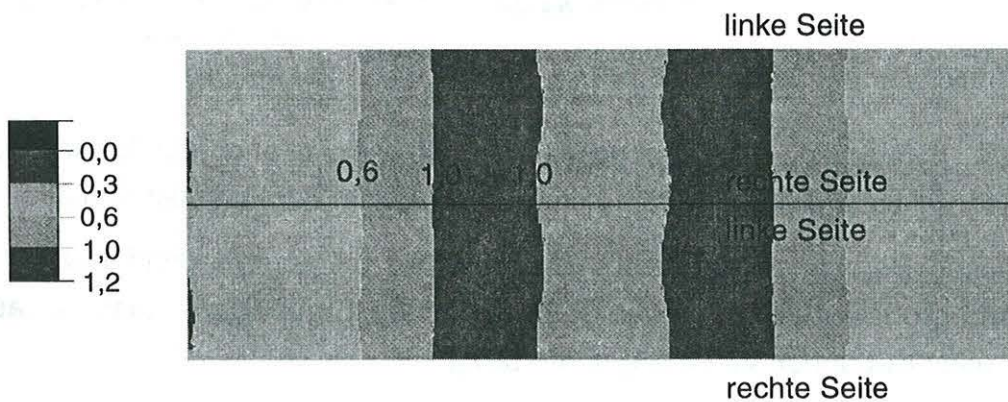
Im Bereich der Markröhre und entsprechend im Bereich unter der Markröhre in der nächsten Lamelle treten Spannungskonzentrationen auf. Die Risse nahezu aller Brüche von Lamellen mit Mark verliefen durch das Mark.

Bild 3-26 zeigt den Verlauf der Querkzugspannung über die halbe Lamellenbreite entlang Schnitt 1-1 in Bild 3-23, für eine Lamelle deren Markröhre, das ist die Zylinderachse des Koordinatensystems, in einem Abstand von 45 mm zum Schwerpunkt der Lamelle liegt.



**Bild 3-26:** Verlauf der Querkzugspannung über halbe Lamellenbreite, Markröhre im Abstand von 45 mm vom Schwerpunkt der Lamelle

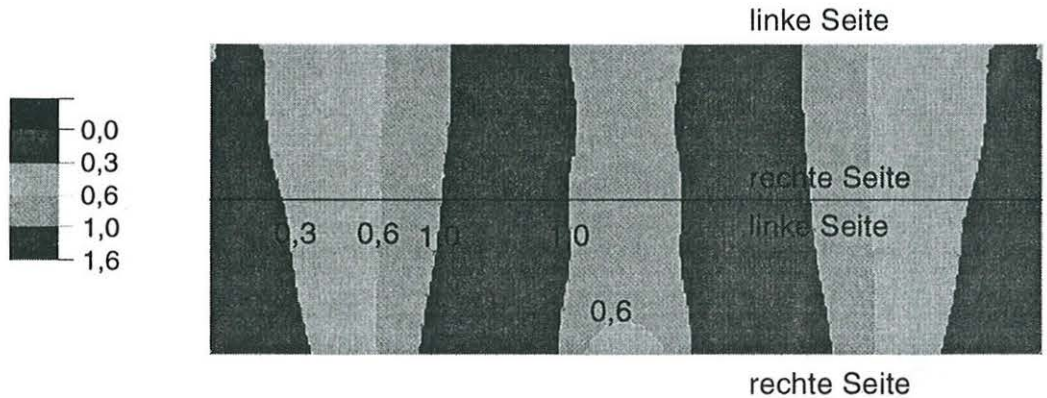
Bild 3-27 zeigt die Spannungsverteilung für zwei der inneren Lamellen.



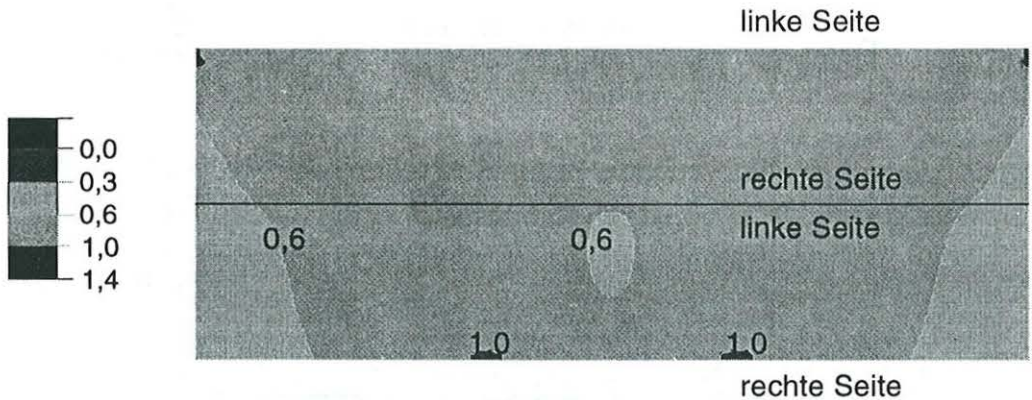
**Bild 3-27:** Verteilung der Querkzugspannung über zwei Lamellen, Markröhre im Abstand von 45 mm vom Zentrum der Lamelle



Die Spannungsverteilungen in den äußeren Lamellen unterscheiden sich von denen der inneren. Bild 3-28 zeigt die Spannungsverteilung in den beiden unteren Lamellen, d.h. die Lasteinleitung über das Zwischenholz findet an der unteren rechten Seite statt. In Bild 3-29 wird entsprechend die Spannungsverteilung in den oberen beiden Lamellen gezeigt, die Lasteinleitung findet an der oberen linken Seite statt.



**Bild 3-28:** Verteilung der Querspannung über die zwei unteren Lamellen, Abstand der Markröhre vom Schwerpunkt der Lamellen: 45 mm



**Bild 3-29:** Verteilung der Querspannung über die zwei oberen Lamellen, Abstand der Markröhre vom Schwerpunkt der Lamellen: 45 mm

Nach diesen Berechnungen weisen die Bereiche mit überwiegend radialer Beanspruchung größere Spannungen auf. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch Aicher, S. und Dill-Langer, G. (1995) und (1997).

Abweichend von den Annahmen für die FE-Berechnung wird die Lage der Markröhre in horizontaler und in vertikaler Richtung in jeder Lamelle variieren. Ebenso kann die verwendete Elastizitätsmatrix das Verhalten des inhomogenen Werkstoffes Holz allenfalls im Mittel beschreiben, so daß die gezeigten Spannungsverteilungen nur als

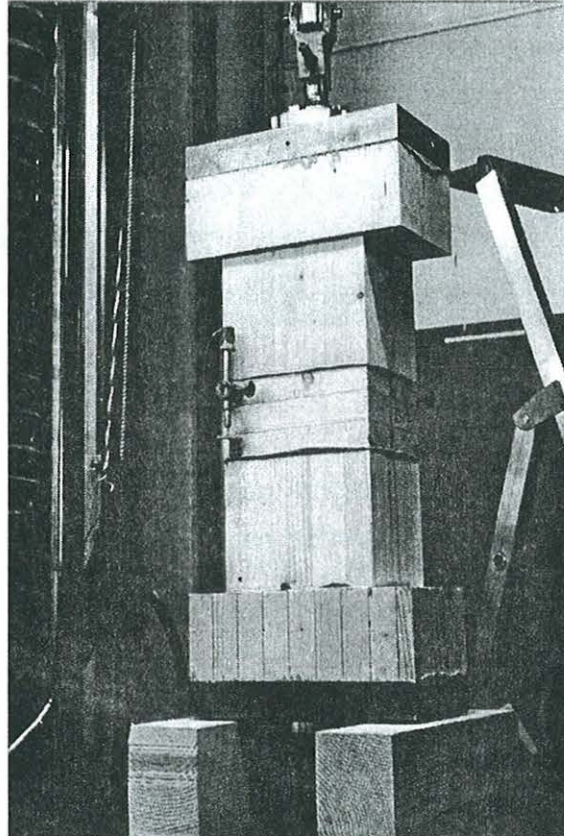
Näherung der tatsächlichen Spannungsverteilungen angesehen werden können. Waren in den gebrochenen Lamellen Markröhren vorhanden, verlief der Riß nahezu immer durch diese. Dies kann als Bestätigung der FE-Berechnung gewertet werden. Die Bruchbilder der Versuche und die Ergebnisse sind in der Anlage enthalten.

Der über den Prüfkörper gemittelte Elastizitätsmodul, der sich bei der FE-Berechnung ergibt, liegt je nach Lage der Markröhre zwischen  $380 \text{ N/mm}^2$ , für den Fall daß das Zentrum des zylindrischen Koordinatensystems auf der Leimfuge liegt, und  $770 \text{ N/mm}^2$ , für den Abstand von  $45 \text{ mm}$  vom Schwerpunkt der Lamelle zum Zentrum der Zylinderachse. Der Mittelwert des Elastizitätsmoduls rechtwinklig zur Faserrichtung ergab sich nach Auswertung der Versuche zu  $E_{t,90,\text{mean}} = 345 \text{ N/mm}^2$ . Demnach scheint die Elastizitätsmatrix ein steiferes Verhalten vorzugeben als tatsächlich vorhanden ist, was an den sehr kleinen, nahezu fehlerfreien Prüfkörpern liegen kann, an denen Neuhaus die Elastizitätszahlen bestimmt hat.



### 3.3 Versuche mit kleineren Volumen

Um die Anwendbarkeit des in Abschnitt 1.1.1 und 3.2 beschriebenen Volumeneffektes nach Weibull zu überprüfen, wurden Versuche mit kleineren Volumen durchgeführt. Bild 3-30 zeigt einen Versuch mit einem Prüfkörper mit drei Lamellen.



**Bild 3-30:** Versuchsaufbau für Brettschichtholz, hier mit einem Prüfkörper mit drei Lamellen

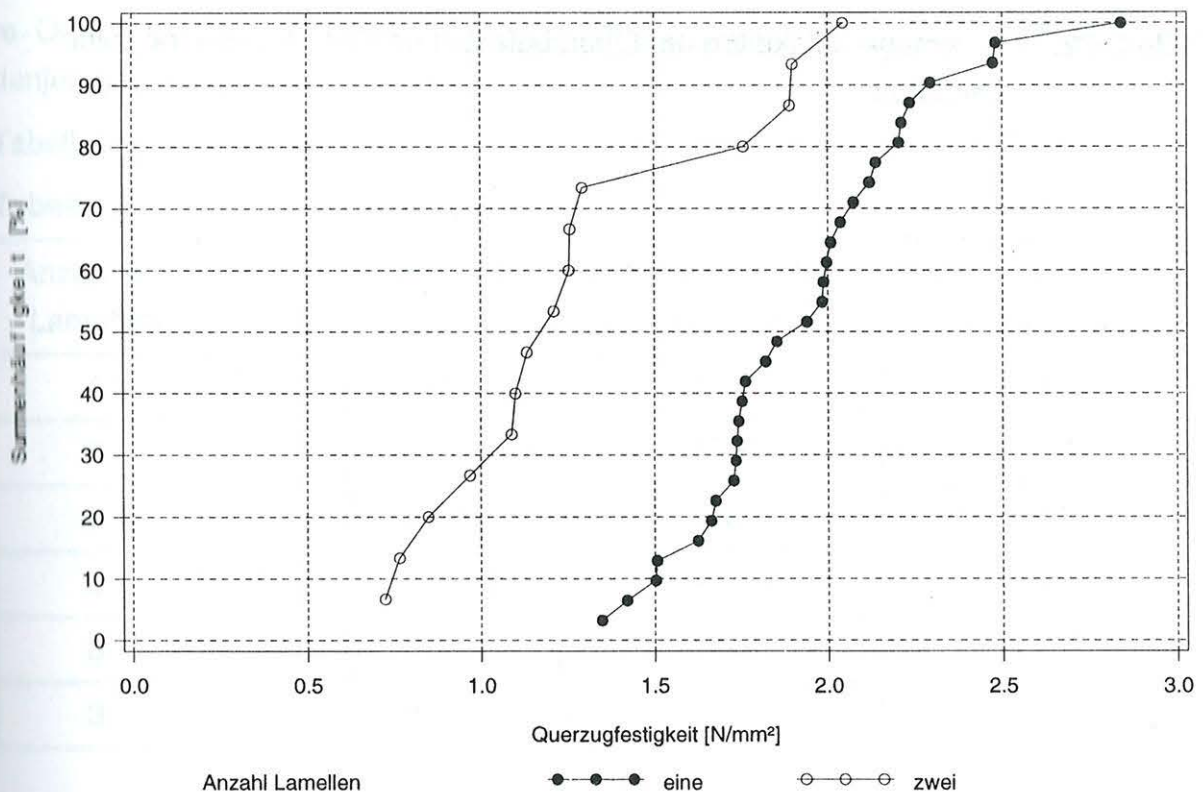
Zunächst wurden 31 Versuche mit einer Lamelle, die Trägern der Festigkeitsklassen BS11 oder BS14 entnommen wurden, durchgeführt. Um einen möglichen Einfluß der Leimfugen oder ungleichförmiger Spannungsverteilungen zu erfassen, wurden dann Prüfkörper mit zwei und drei Lamellen hergestellt. Die Prüfkörper mit zwei Lamellen wurden Trägern aller Festigkeitsklassen entnommen, die mit drei Lamellen Trägern der Festigkeitsklassen BS16 und BS18.

Tabelle 3-8 enthält die statistischen Kennwerte für Prüfkörper mit einer, zwei oder drei Lamellen.

**Tabelle 3-8:** statistische Werte der Querkzugfestigkeit

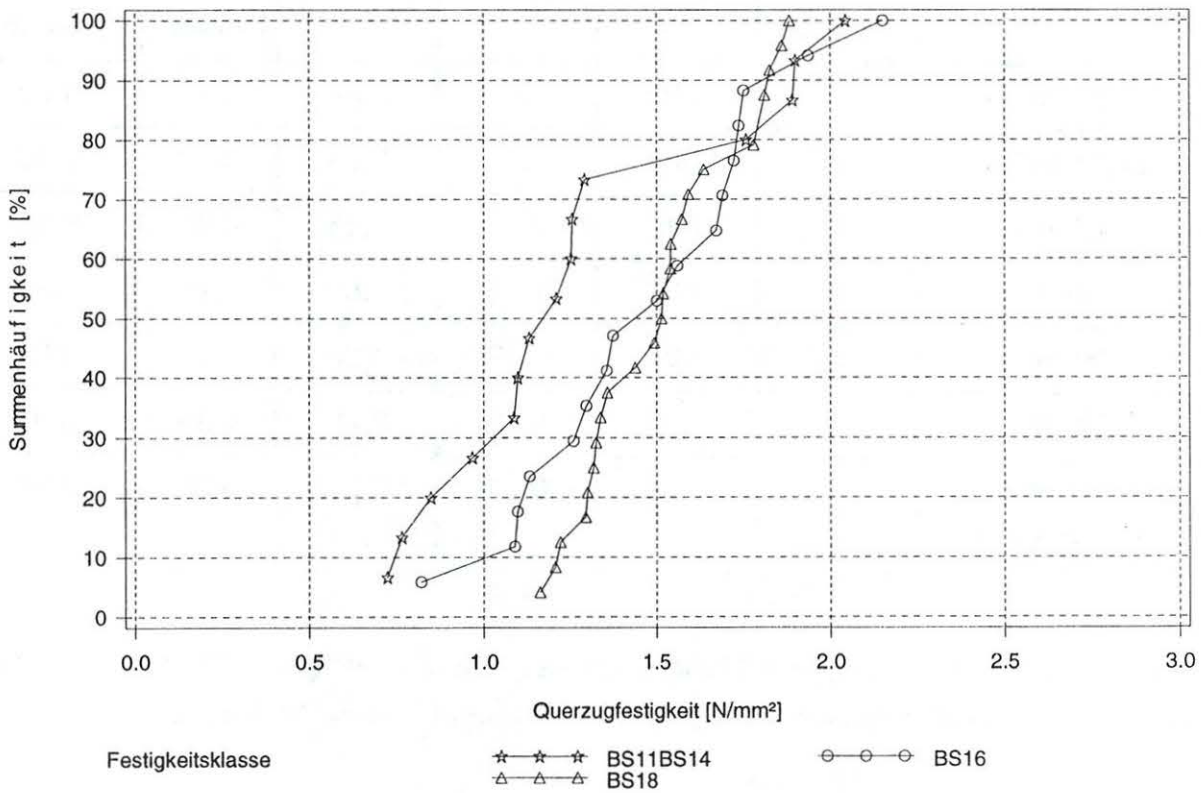
Festigkeitsklasse	Anzahl der Lamellen	Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	Minimum [N/mm <sup>2</sup> ]	Maximum [N/mm <sup>2</sup> ]	5% - Fraktile [N/mm <sup>2</sup> ]	Standardabweichg. [N/mm <sup>2</sup> ]
BS11 BS14	1	1,93	1,35	2,84	1,42	0,33
BS11 BS14	2	1,28	0,72	2,04	0,72	0,43
BS16	2	1,48	0,82	2,15	0,82	0,35
BS18	2	1,51	1,16	1,88	1,21	0,22
BS16	3	1,37	0,99	1,82	1,01	0,22
BS18	3	1,29	0,83	2,23	0,90	0,31
alle gemeinsam ausgewertet		1,49	0,72	2,84	0,94	0,38

In Bild 3-31 sind die Summenhäufigkeiten der Querkzugfestigkeit der Versuche mit einer oder zwei Lamellen der Festigkeitsklassen BS11 und BS14 dargestellt.



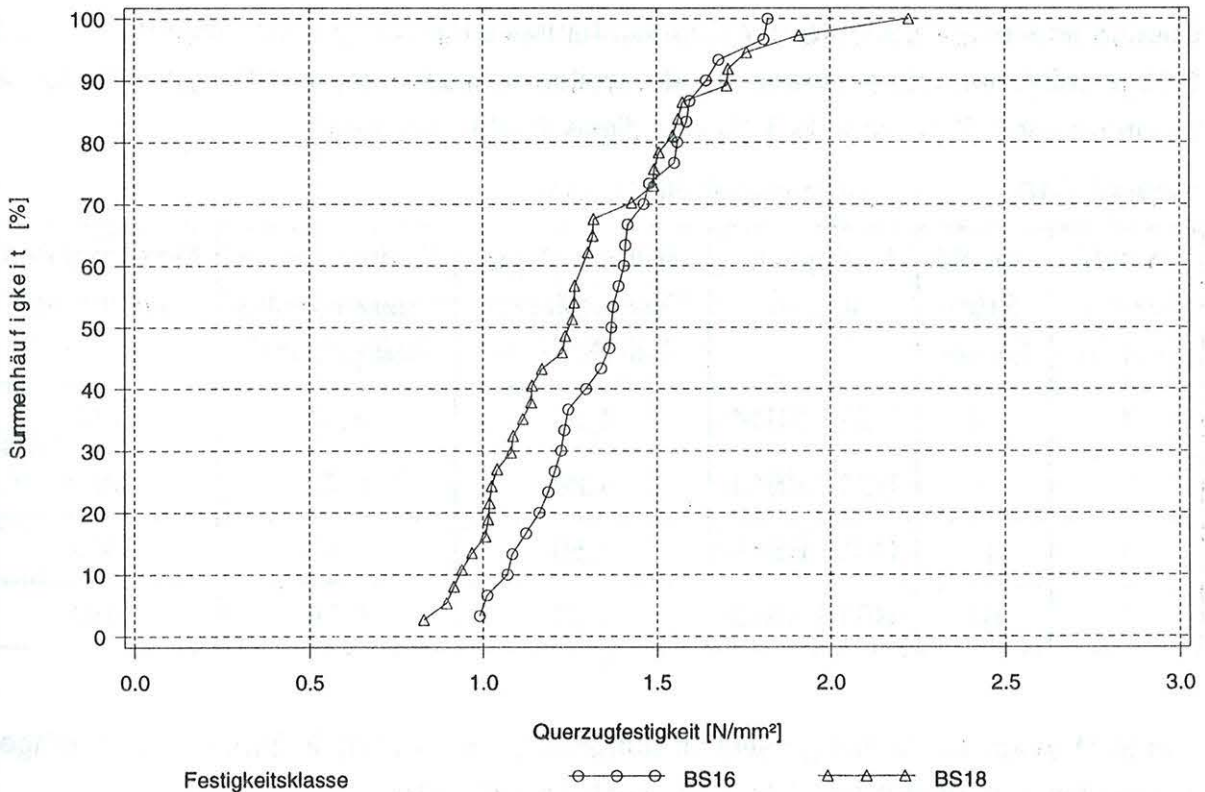
**Bild 3-31:** Summenhäufigkeiten der Querkzugfestigkeit der Festigkeitsklassen BS11 und BS14

Die Bilder 3-32 und 3-33 zeigen die Summenhäufigkeiten der Querkzugfestigkeit für die Versuche mit zwei und drei Lamellen.



**Bild 3-32:** Summenhäufigkeiten der Querkzugfestigkeit für Versuche mit zwei Lamellen





**Bild 3-33:** Summenhäufigkeiten der Querzugfestigkeit der Festigkeitsklassen BS16 und BS18 für Versuche mit drei Lamellen

Bild 3-33 zeigt, wie bei den Versuchen mit dem Bezugsvolumen  $V_0 = 0,01 \text{ m}^3$ , höhere Querzugfestigkeiten der Prüfkörper der Festigkeitsklasse BS16 verglichen mit denjenigen der Festigkeitsklasse BS18.

Tabelle 3-9 enthält die Mittelwerte des Volumens und der Querzugfestigkeit.

**Tabelle 3-9:** Volumen der Prüfkörper

Anzahl der Lamellen	Anzahl	Festigkeitsklasse	Mittelwert der Querzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittelwert des Volumens [cm <sup>3</sup> ]
1	31	BS11 BS14	1,93	912
2	15	BS11 BS14	1,28	1822
2	17	BS16	1,48	1476
2	24	BS18	1,51	1471
3	31	BS16	1,36	2186
3	37	BS18	1,29	2195

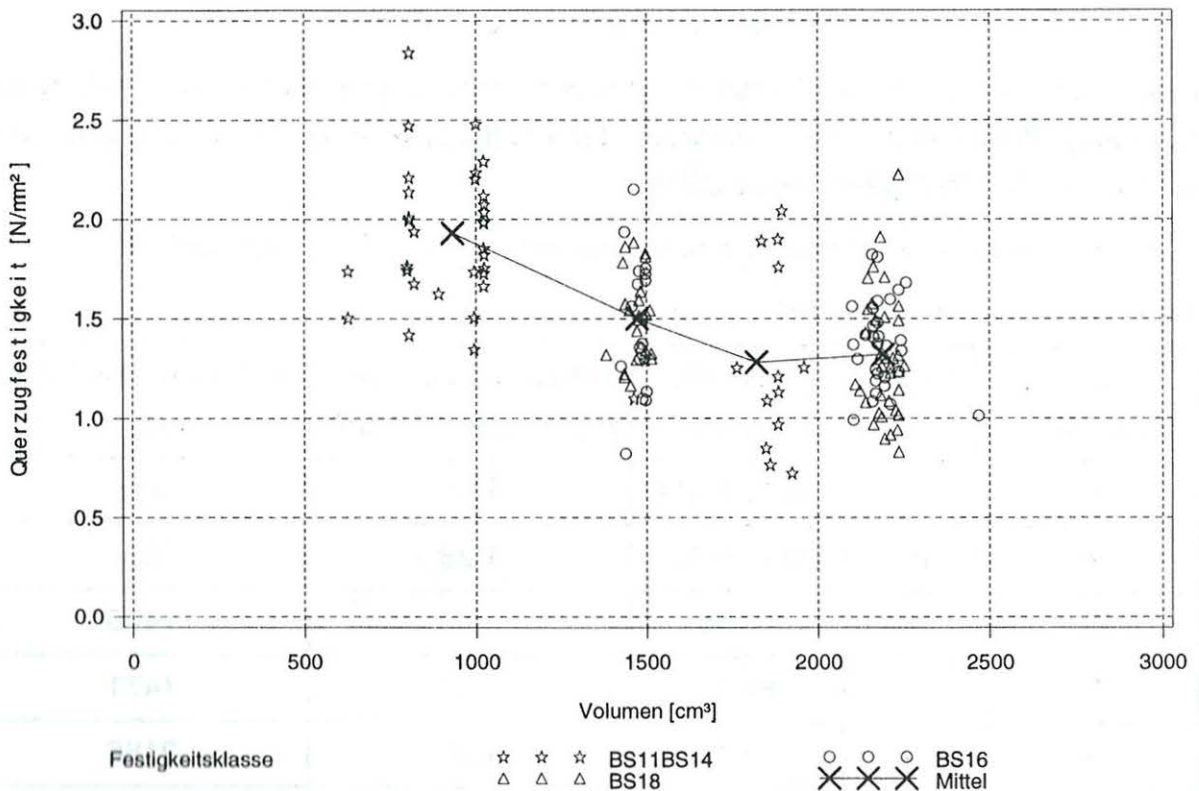
Die Prüfkörper mit zwei und drei Lamellen der Festigkeitsklassen BS16 und BS18 haben annähernd die gleichen Mittelwerte der Querzugfestigkeit und des Volumens.

Ebenso liegen die Verläufe der Summenhäufigkeiten, wie in den Bildern 3-32 und 3-33 gezeigt, nahe beieinander. Bei der weiteren Auswertung werden diese Gruppen zusammengefaßt. In Tabelle 3-10 sind diese Werte enthalten.

**Tabelle 3-10:** Zusammengefaßte Gruppen

Anzahl der Lamellen	Anzahl Prüfkörper	Festigkeitsklasse	Mittelwert der Querkzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	5%-Fraktile der Querkzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittelwert des Volumens [cm <sup>3</sup> ]
1	31	BS11 BS14	1,93	1,42	932
2	15	BS11 BS14	1,28	0,72	1822
2	41	BS16 BS18	1,50	1,10	1473
3	67	BS16 BS18	1,32	0,94	2191

Bild 3-34 zeigt die Querkzugfestigkeit aufgetragen über dem Volumen. Die durchgezogene Linie verbindet die Mittelwerte nach Tabelle 3-10.



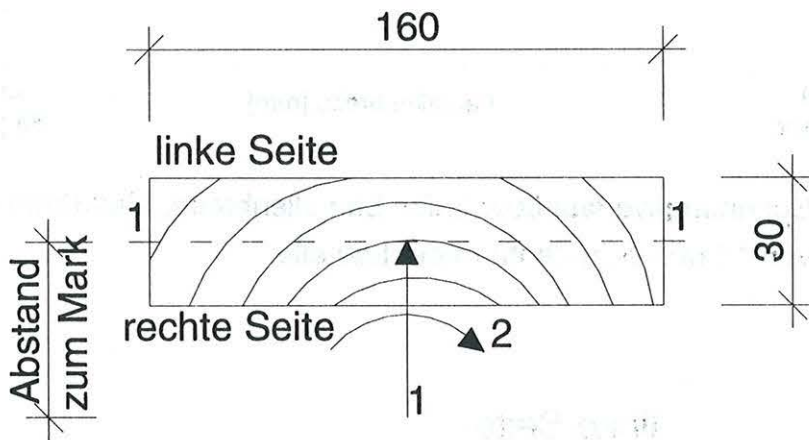
**Bild 3-34:** Querkzugfestigkeit über dem Volumen

Im Abschnitt 3.2 wurde in den Bildern 3-27 bis 3-29 gezeigt, daß deutliche Unterschiede zwischen den Spannungsverteilungen in den Lamellen nahe an der Klebefuge, die das Zwischenholz und den Prüfkörper verbindet, und in den übrigen La-

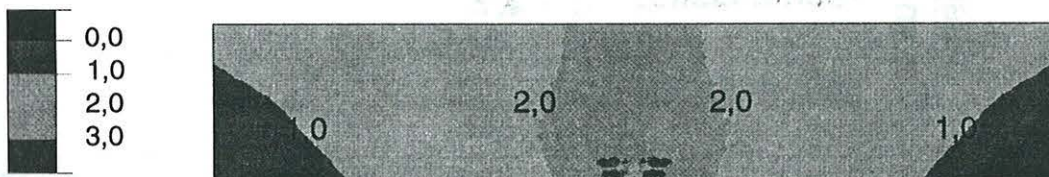


mellen bestehen. Unterschiede in der Spannungsverteilung zwischen Versuchen mit einer, zwei und drei Lamellen waren deshalb bei den Versuchen mit kleineren Volumen ebenfalls zu erwarten. Bild 3-36 zeigt die Spannungsverteilung für einen Prüfkörper mit einer Lamelle, Bild 3-37 den Spannungsverlauf über die linke Hälfte entlang Schnitt 1-1 nach Bild 3-35. Die Bilder 3-39 und 3-40 zeigen die berechneten Spannungen für einen Prüfkörper mit zwei Lamellen nach Bild 3-38.

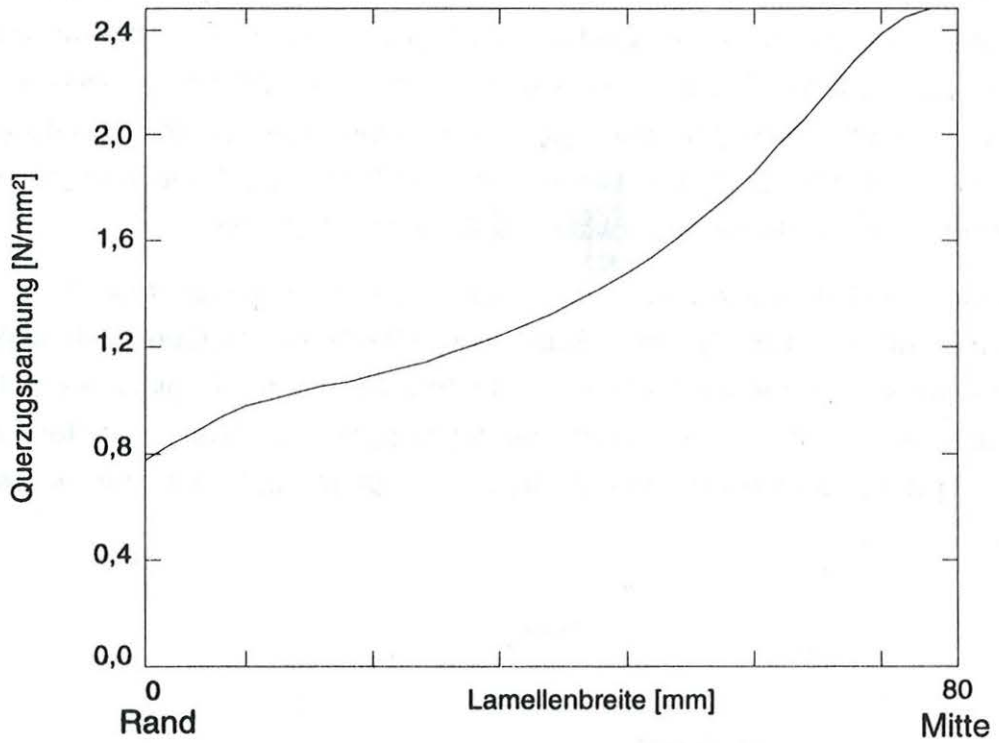
Die über Zwischenhölzer aufgebrachte Last würde zu einer gleichförmigen Spannungsverteilung von  $\sigma = 1,50 \text{ N/mm}^2$  führen, dem Mittelwert der Querkzugfestigkeit bestimmt an allen Versuchen mit kleineren Volumen. Es wurde die gleiche Elastizitätsmatrix wie in Abschnitt 3.2 verwendet, der Abstand vom Schwerpunkt der Prüfkörper zum Ursprung des zylindrischen Koordinatensystems betrug 15 mm in vertikaler Richtung.



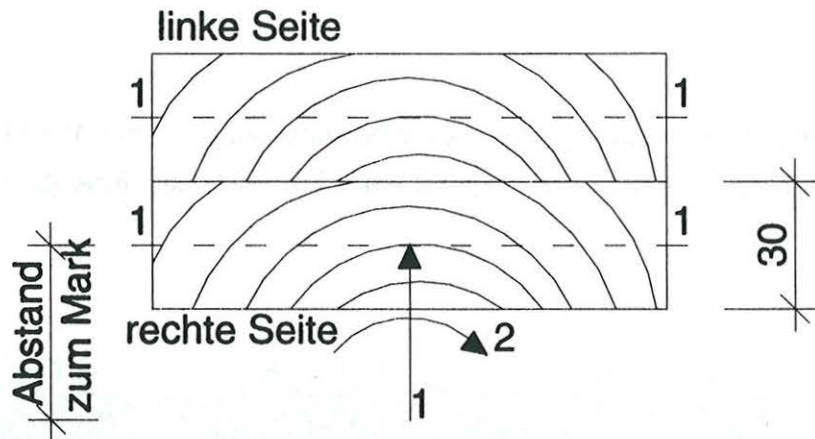
**Bild 3-35:** Anordnung des zylindrischen Koordinatensystems das der FE-Berechnung für Versuche mit einer Lamelle zugrunde gelegt wurde



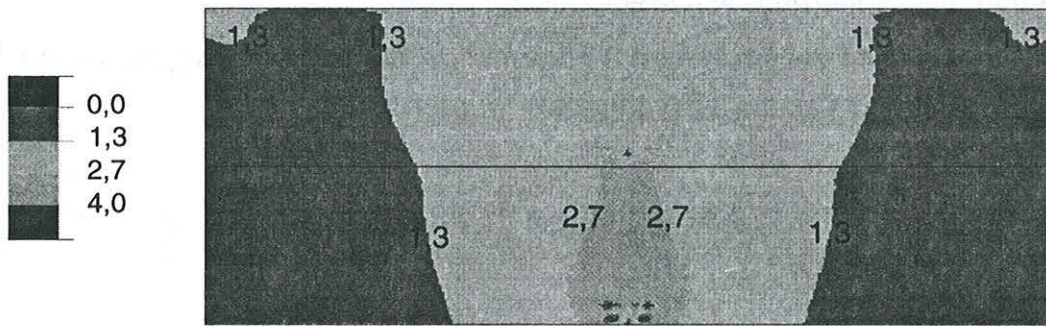
**Bild 3-36:** Berechnete Spannungsverteilung für einen Prüfkörper mit einer Lamelle, der Ursprung des Koordinatensystems liegt in der Mitte der unteren Klebefuge



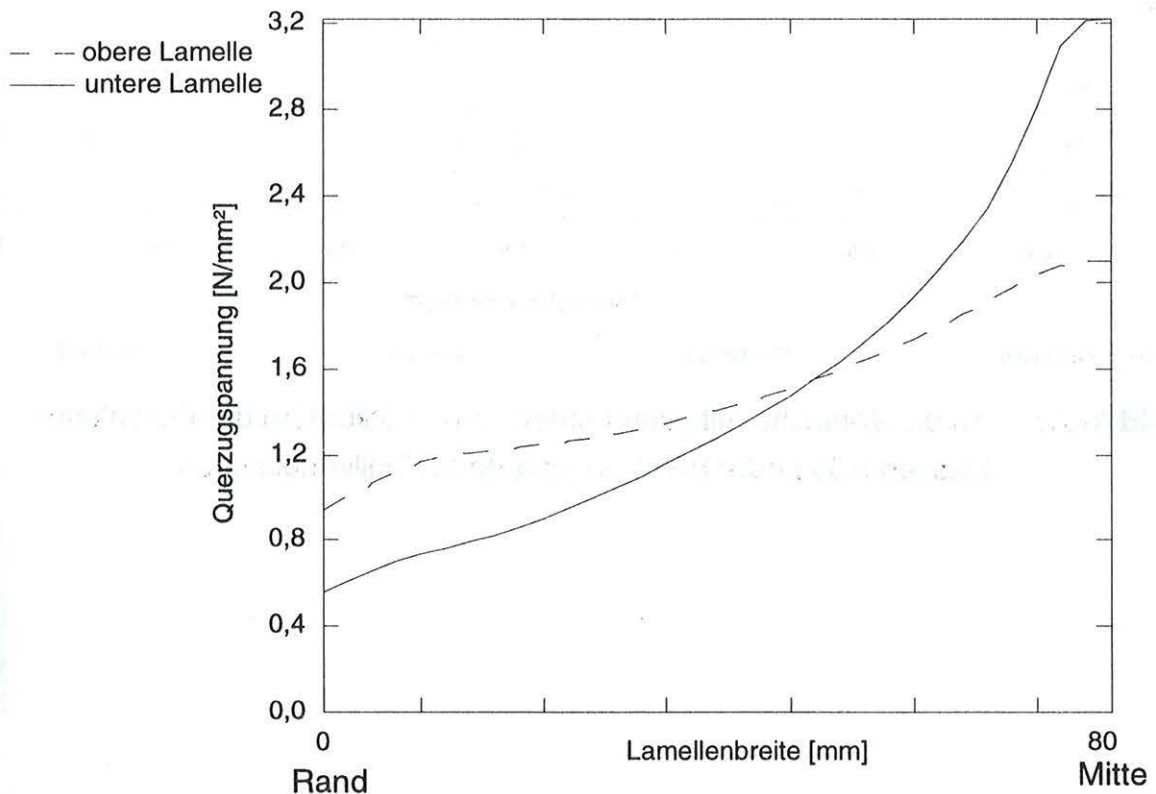
**Bild 3-37:** Spannungsverlauf über halbe Lamellenbreite, Markröhre im Abstand von 15 mm vom Zentrum der Lamelle



**Bild 3-38:** System für die FE-Berechnung für Versuche mit zwei Lamellen



**Bild 3-39:** Berechnete Spannungsverteilung für einen Prüfkörper mit zwei Lamellen, der Ursprung der Koordinatensysteme liegt in der Mitte der unteren Klebe- bzw. Leimfuge



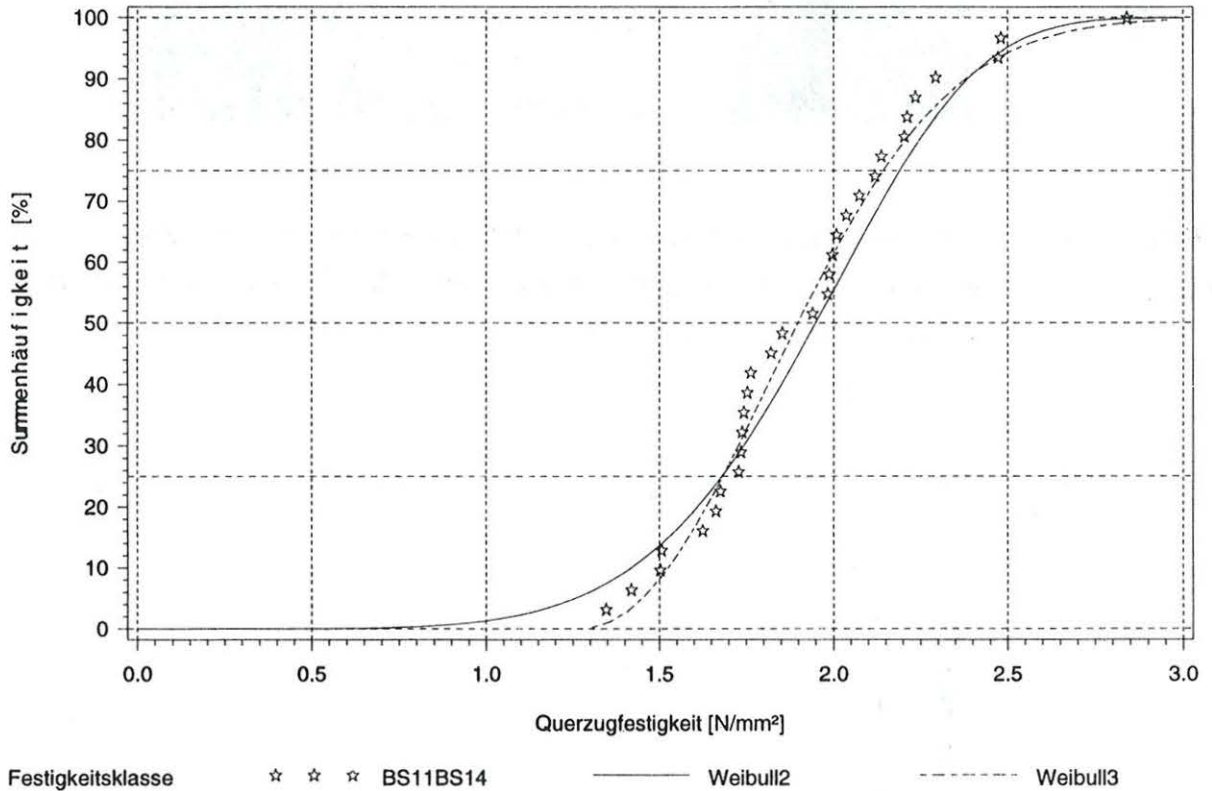
**Bild 3-40:** Spannungsverlauf über die halbe Lamellenbreite der beiden Lamellen, Markröhre jeweils im Abstand von 15 mm vom Zentrum der Lamelle

Vergleicht man diese Spannungsverteilungen mit den in Abschnitt 3.2 berechneten (Bilder 3-24 und 3-25), wird deutlich, daß die Spannungen bei den Versuchen mit einer Lamelle und in der oberen Lamelle bei den Versuchen mit zwei Lamellen, gleichförmiger verteilt sind, als in den Lamellen der Prüfkörper mit dem Bezugsvolu-

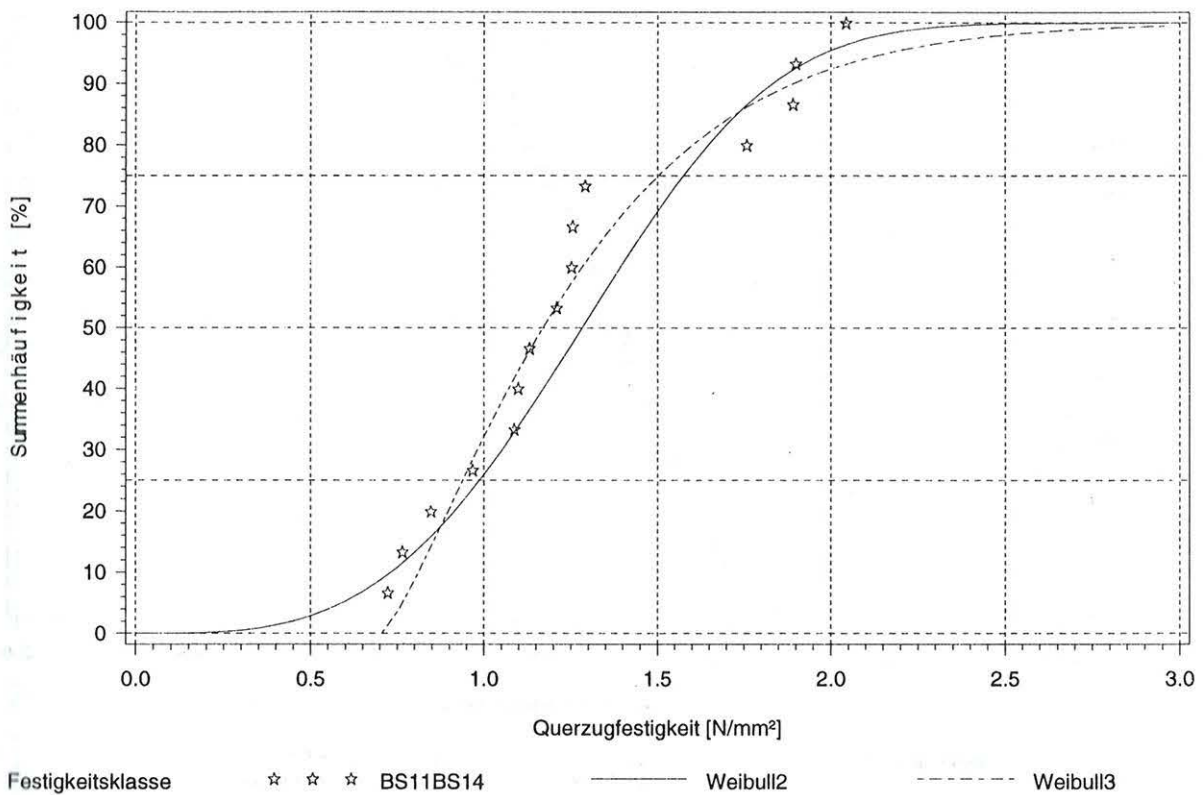


men von  $V_0 = 0,01 \text{ m}^3$ . Das Gleiche wird für die Spannungen in der oberen Lamelle bei Versuchen mit Prüfkörpern aus drei Lamellen gelten.

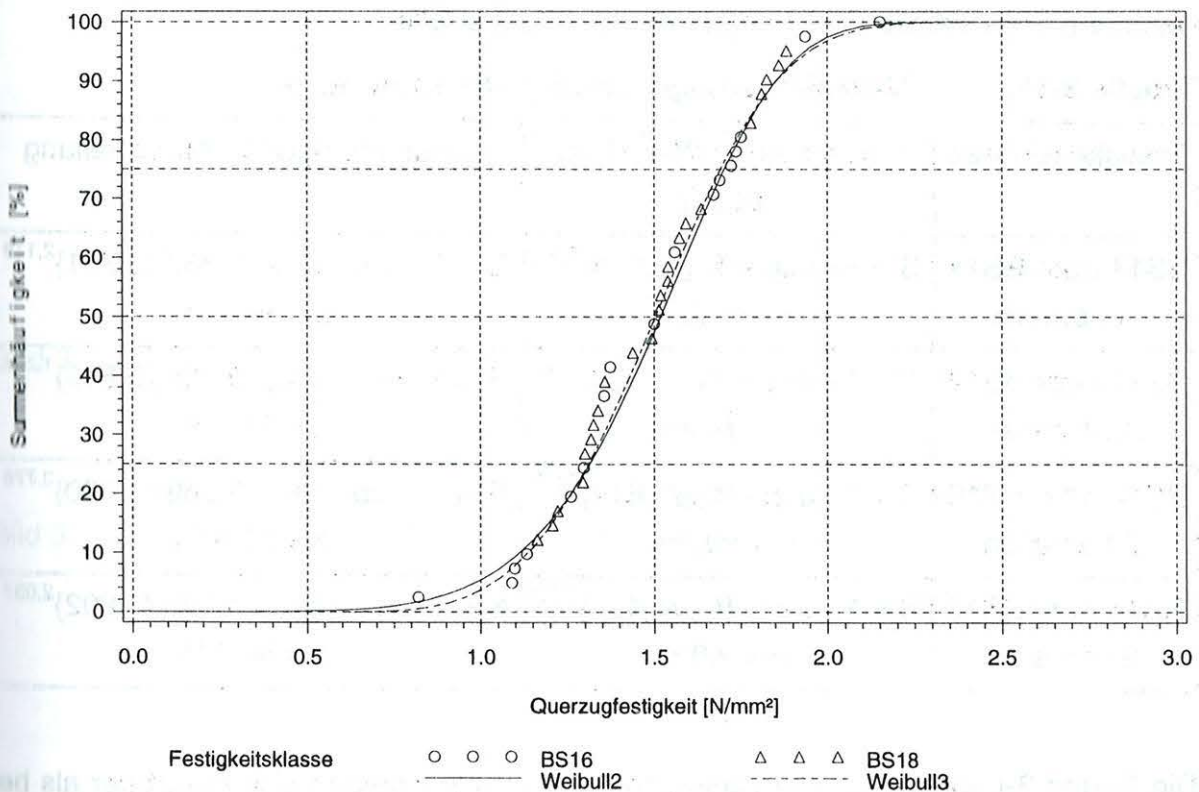
Die Bilder 3-41 bis 3-44 zeigen 2- und 3-parametrische Weibullverteilungen, die an die Gruppen entsprechend Tabelle 3-10 angepaßt wurden.



**Bild 3-41:** An die Versuche mit einer Lamelle aus Prüfkörpern der Festigkeitsklassen BS11 oder BS14 angepaßte Weibullverteilungen



**Bild 3-42:** An die Versuche mit zwei Lamellen aus Prüfkörpern der Festigkeitsklassen BS11 oder BS14 angepaßte Weibullverteilungen



**Bild 3-43:** An die Versuche mit zwei Lamellen aus Prüfkörpern der Festigkeitsklassen BS16 oder BS18 angepaßte Weibullverteilungen

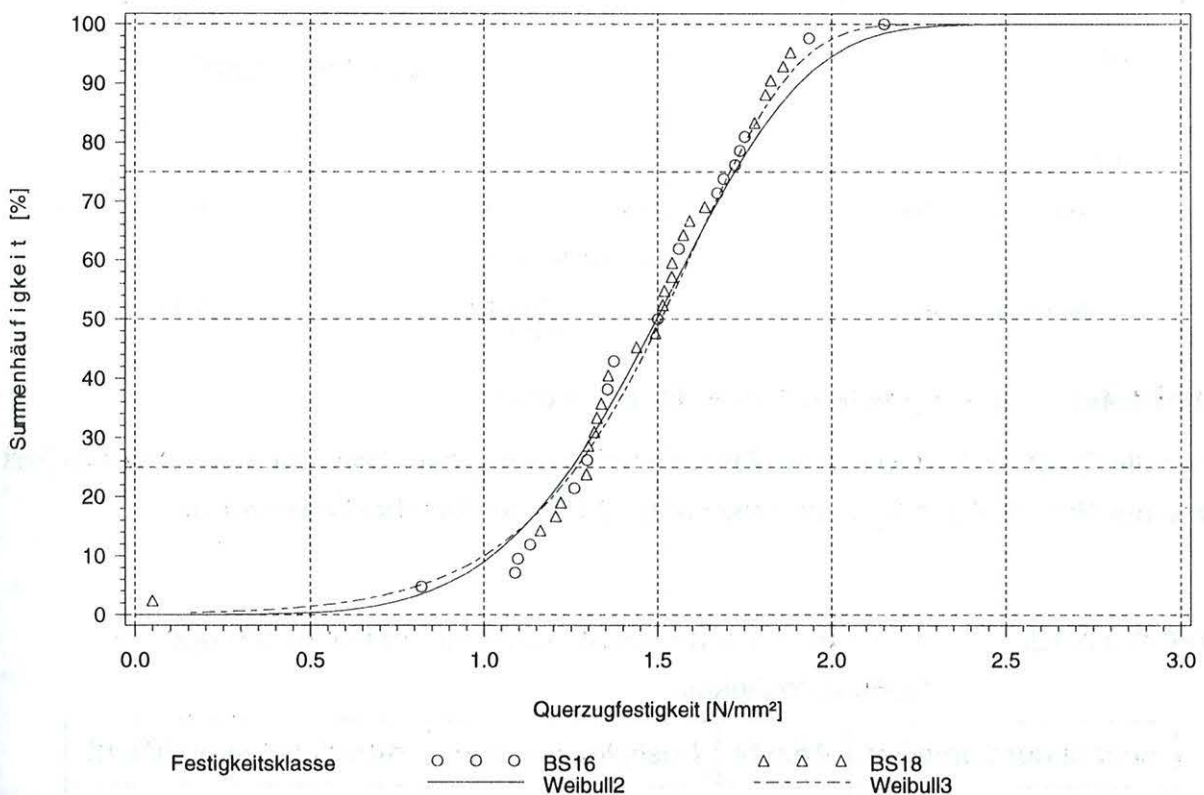




Der Fehler des in Bild 3-18 dargestellten Prüfkörpers der Festigkeitsklasse BS18, der für Versuche mit zwei Lamellen vorgesehen war, hätte sicherlich auch bei diesen Versuchen zu einem viel geringeren Kleinstwert der Querkzugfestigkeit geführt. Fügt man diesen Versuch mit einem hypothetischen Wert der Querkzugfestigkeit von  $f_{t,90} = 0,05 \text{ N/mm}^2$  der Versuchsreihe mit zwei Lamellen der Festigkeitsklassen BS16 und BS18 hinzu, ergeben sich folgende Gleichungen für die Weibullverteilungen:

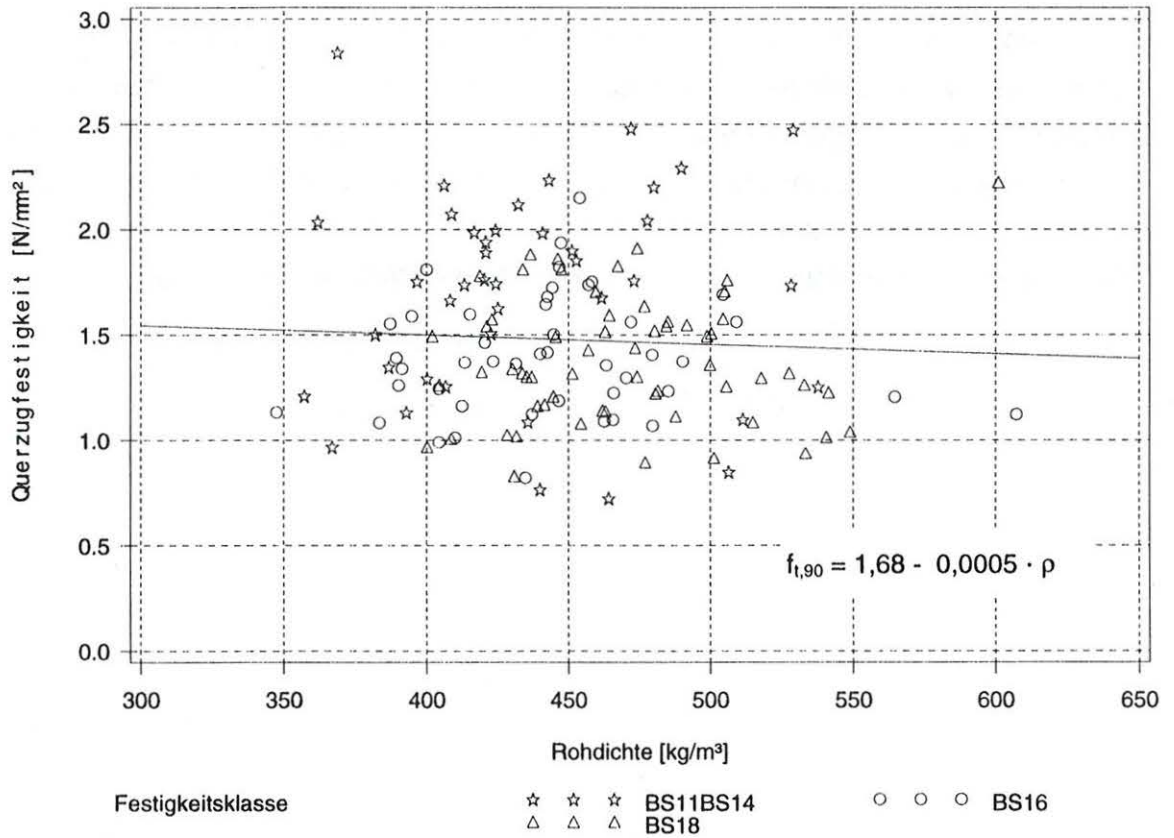
$$S = 1 - \exp - \{f_{t,90}/1,613\}^{4,945}; \quad \text{Signifikanzniveau } \alpha = 40,6 \%$$

$$S = 1 - \exp - \{(f_{t,90}+4,835)/6,4497\}^{22,49} \quad \text{Signifikanzniveau } \alpha = 41,9 \%$$



**Bild 3-45:** An die Versuche mit zwei Lamellen und hypothetischem Nullwert der Festigkeitsklasse BS16 oder BS18 angepaßte Weibullverteilungen

Bild 3-46 zeigt schließlich noch die Querkzugfestigkeit über der Rohdichte.



**Bild 3-46:** Querkzugfestigkeit über der Rohdichte

Tabelle 3-12 enthält die Korrelationskoeffizienten zwischen der Querkzugfestigkeit und der Rohdichte, die wie im Abschnitt 3.2 beschrieben bestimmt wurde.

**Tabelle 3-12:** Korrelationskoeffizienten zwischen der Rohdichte und der Querkzugfestigkeit

Anzahl der Lamellen	Anzahl	Festigkeits-klasse	Korrelationskoeffizient
1	31	BS11 BS14	0,223
2	15	BS11 BS14	0,060
2	41	BS16 BS18	0,133
3	67	BS16 BS18	0,086
alle	154	BS11 BS14 BS16 BS18	-0,035



### 3.4 Volumeneffekt

Der Exponent  $k$  der 2-parametrischen Weibullverteilungen

$$S = 1 - \exp - \left\{ \sigma / \sigma_V \right\}^k \quad (16)$$

wird zur Ermittlung des Volumeneffektes verwendet. Die Querkzugfestigkeit von querzugbeanspruchten Volumen, die vom Bezugsvolumen  $V_0 = 0,01 \text{ m}^3$ , an dem der charakteristische Wert bestimmt wurde abweichen, muß nach EC5, 5.1.3 mit dem Faktor

$$\left( V_0 / V_{\perp} \right)^{1/k} \quad (17)$$

multipliziert werden. Der EC5 gibt

$$1/k = 0,2 = 1/5 \quad (18)$$

vor. Beinahe alle Werte für  $k$  der an die Versuche mit dem Bezugsvolumen  $V_0$  angepaßten Verteilungsgleichungen sind kleiner als 5, siehe Abschnitt 3.2 Tabelle 3-7. Demnach wäre der Volumeneffekt stärker ausgeprägt, als bisher angenommen, siehe hierzu auch Bild 1-1.

Der  $\chi^2$  - Test führt nur auf geringen Signifikanzniveaus zur Annahme der Hypothese, daß die Weibullgleichungen den Verteilungsfunktionen der Querkzugfestigkeit entsprechen. Die Höhe dieses Signifikanzniveaus scheint von der Höhe des Variationskoeffizienten abzuhängen. In der Tabelle 3-13 sind die Variationskoeffizienten, das sind die Quotienten aus den Standardabweichungen und den arithmetischem Mitteln der Verteilungsfunktionen der Querkzugfestigkeit, und die Signifikanzniveaus der Weibullverteilungen gezeigt.

**Tabelle 3-13:** Signifikanzniveaus, Variationskoeffizient

Festigkeitsklassen Prüfkörper	Signifikanzniveau der 2-parametrischen Weibullverteilung	Signifikanzniveau der 3-parametrischen Weibullverteilung	Variationskoeffizient
BS11 BS14 $V_0 = 10000 \text{ cm}^3$	6,2 %	9,2 %	0,301
BS16 $V_0 = 10000 \text{ cm}^3$	42,6 %	71,5 %	0,217
BS18 $V_0 = 10000 \text{ cm}^3$	27,3 %	48,1 %	0,333



**Tabelle 3-13 (Fortsetzung):**

Festigkeitsklassen Prüfkörper	Signifikanzniveau der 2-parametrischen Weibullverteilung	Signifikanzniveau der 3-parametrischen Weibullverteilung	Variationskoeffizient
alle $V_0 = 10000 \text{ cm}^3$	2,2 %	5,4 %	0,286
BS11 BS14 $V = 932 \text{ cm}^3$	11,3 %	96,5 %	0,173
BS11 BS14 $V = 1822 \text{ cm}^3$	14,4 %	31,2 %	0,331
BS16 BS18 $V = 1473 \text{ cm}^3$	90,3 %	98,8 %	0,185
BS16 BS18 $V = 2191 \text{ cm}^3$	2,9 %	98,8 %	0,208

Der große Unterschied zwischen den Signifikanzniveaus der 2- und 3-parametrischen Weibullverteilungen der letzten Zeile zeigt, daß der Variationskoeffizient nicht immer bestimmend für das Signifikanzniveau ist. Trotzdem zeigt die Tabelle, daß insbesondere die 3-parametrischen Weibullverteilungen besser den Versuchsergebnissen angepaßt werden können, je geringer der Variationskoeffizient ist. Dies steht im Einklang mit Weibulls Theorie, die unter der Annahme infinitesimaler Volumenelemente mit einer statistischen Verteilung der Festigkeit entwickelt wurde. Mit anderen Worten scheinen Verteilungen, bei denen Prüfkörper makroskopische Fehler, wie z.B. Ringschäle oder Harzgallen, oder auch makroskopische Verstärkungen aufwiesen, nur bedingt durch Weibullsche Gleichungen erfaßbar zu sein.

In Abschnitt 1.1.1 wurde der Volumeneffekt nach Weibull beschrieben. Um für verschiedene, gleichförmig beanspruchte Volumen die gleiche Versagenswahrscheinlichkeit  $S$  zu erhalten, kann danach die Beanspruchbarkeit  $\sigma_2$  von einem Volumen  $V_2$  das sich vom Volumen  $V_1$  unterscheidet berechnet werden.

$$S_1 = 1 - \exp(-V_1((\sigma_1 - \sigma_0) / m)^k) = S_2 = 1 - \exp(-V_2((\sigma_2 - \sigma_0) / m)^k) \quad (19).$$

Bei Verwendung der 2-parametrischen Weibullverteilung, d.h. unter der Annahme daß  $\sigma_0 = 0$  ist, ergibt sich:

$$\sigma_2 = (V_1 / V_2)^{1/k} \cdot \sigma_1 \quad (20).$$

Für die 3-parametrische Weibullverteilung ergibt sich:

$$V_1((\sigma_1 - \sigma_0) / m)^k = V_2((\sigma_2 - \sigma_0) / m)^k \quad (21)$$

$$(V_1 / V_2)^{1/k} = (\sigma_2 - \sigma_0) / (\sigma_1 - \sigma_0) \quad (22)$$

$$\sigma_2 = (V_1 / V_2)^{1/k} \cdot (\sigma_1 - \sigma_0) + \sigma_0 \quad (23).$$

In Abschnitt 3.2 wurden 2- und 3-parametrische Weibullverteilungen an die Verteilungsfunktionen der Querkzugfestigkeit angepaßt. Die Gleichungen der Weibullverteilungen aller Prüfkörper mit dem Bezugsvolumen  $V_0$ , ohne Berücksichtigung der Festigkeitsklasse, sind in Bild 3-22 gezeigt und in Tabelle 3-7 enthalten.

Die 2-parametrische Weibullverteilung ergab sich danach zu:

$$S = 1 - \exp - \{f_{t,90}/0,848\}^{3,688} \quad (24)$$

die dreiparametrische Weibullverteilung zu:

$$S = 1 - \exp - \{(f_{t,90}+0,060)/0,910\}^{3,987} \quad (25)$$

Tabelle 3-14 enthält die Verhältnisse zwischen den an den kleineren Volumen ermittelten Mittelwerten der Querkzugfestigkeit  $f_{t,90,mean,2}$  nach Tabelle 3-10 und den nach den Gleichungen (20) und (23) bestimmten Werten von  $\sigma_2$ . Dabei wurde in den Gleichungen (20) und (23) für  $V_1$  das Bezugsvolumen  $V_0 = 10000 \text{ cm}^3$ , für  $V_2$  die jeweiligen Mittelwerte der Volumen der kleineren Prüfkörper, für  $\sigma_1$  der Mittelwert der Querkzugfestigkeit  $f_{t,90,mean,1} = 0,77 \text{ N/mm}^2$  nach Tabelle 3-5 und für  $\sigma_0$  und  $k$  die werte der Gleichungen (24) und (25) eingesetzt.

**Tabelle 3-14:** Verhältnisse  $\sigma_2 / f_{t,90,mean,2}$

	$\sigma_2 / f_{t,90,mean,2}$ Gleichung (20) $k = 3,688$	$\sigma_2 / f_{t,90,mean,2}$ Gleichung (20) $k = 5$ nach EC5	$\sigma_2 / f_{t,90,mean,2}$ Gleichung (23) $k = 3,987; \sigma_0 = -0,06 \text{ N/mm}^2$
BS11 BS14 $V_2 = 932 \text{ cm}^3$	0,76	0,64	0,75
BS11 BS14 $V_2 = 1822 \text{ cm}^3$	0,95	0,85	0,95

**Tabelle 3-14 (Fortsetzung):**

	$\sigma_2 / f_{t,90,mean,2}$ Gleichung (20) $k = 3,688$	$\sigma_2 / f_{t,90,mean,2}$ Gleichung (20) $k = 5$ nach EC5	$\sigma_2 / f_{t,90,mean,2}$ Gleichung (23) $k = 3,987; \sigma_0 = -0,06 \text{ N/mm}^2$
BS16 BS18 $V_2 = 1473 \text{ cm}^3$	0,86	0,75	0,85
BS16 BS18 $V_2 = 2191 \text{ cm}^3$	0,88	0,79	0,87

Tabelle 3-15 zeigt die Verhältnisse zwischen den 5 %-Fraktile der Querkzugfestigkeit der Prüfkörper mit kleineren Volumen und den nach Gleichungen (20) und (23) bestimmten Werten von  $\sigma_2$ . Dabei wurde für  $\sigma_1$  die 5 %-Fraktile der Querkzugfestigkeit  $f_{t,90,05,1} = 0,46 \text{ N/mm}^2$  nach Tabelle 3-5 eingesetzt.

**Tabelle 3-15:** Verhältnisse  $\sigma_2 / f_{t,90,05,2}$ 

	$\sigma_2 / f_{t,90,05,2}$ Gleichung (20) $k = 3,688$	$\sigma_2 / f_{t,90,05,2}$ Gleichung (20) $k = 5$ nach EC5	$\sigma_2 / f_{t,90,05,2}$ Gleichung (23) $k = 3,987; \sigma_0 = -0,06 \text{ N/mm}^2$
BS11 BS14 $V_2 = 932 \text{ cm}^3$	0,62	0,52	0,62
BS11 BS14 $V_2 = 1822 \text{ cm}^3$	1,01	0,90	1,01
BS16 BS18 $V_2 = 1473 \text{ cm}^3$	0,70	0,61	0,71
BS16 BS18 $V_2 = 2191 \text{ cm}^3$	0,74	0,66	0,75

Der Exponent  $k$  des Volumeneffektes nach Weibull kann außer durch Anpassen von Weibullverteilungen an Versuchsergebnisse auch durch direkten Vergleich der Querkzugfestigkeiten von Prüfkörpern mit unterschiedlichen Volumen bestimmt werden. Nach Abschnitt 1.1.1 gilt:



$$\sigma_2/\sigma_1 = (V_1/V_2)^{1/k} \quad (26)$$

daraus folgt

$$k = \{\log(V_1/V_2)\} / \{\log(\sigma_2/\sigma_1)\}. \quad (27)$$

Die Tabellen 3-16 und 3-17 zeigen die so ermittelten k-Werte mit den Mittelwerten und den 5 %-Fraktile der Querkzugfestigkeit. Für  $V_1$  bzw.  $\sigma_1$  wurden die Werte des Bezugsvolumens  $V_0 = 10000 \text{ cm}^3$  nach Abschnitt 3.2 Tabelle 3-5 verwendet, für  $V_2$  bzw.  $\sigma_2$  jeweils diejenigen Werte, die an kleineren Volumen bestimmt wurden.

**Tabelle 3-16:** Berechnung der k-Werte mit den Mittelwerten der Querkzugfestigkeit

$V_0 = 10000 \text{ cm}^3$	Exponent k der 2-parametrischen Weibullverteilung für $V_0$	BS11 BS14 $V = 932 \text{ cm}^3$	BS11 BS14 $V = 1822 \text{ cm}^3$	BS16 BS18 $V = 1473 \text{ cm}^3$	BS16 BS18 $V = 2191 \text{ cm}^3$
BS11 BS14	3,59	2,44	3,03	2,66	2,56
BS16	5,09	2,81	3,93	3,24	3,27
BS18	3,17	2,62	3,44	2,93	2,89
alle	3,69	2,58	3,35	2,87	2,82

**Tabelle 3-17:** Berechnung der k-Werte mit den 5 %- Fraktile der Querkzugfestigkeit

$V_0 = 10000 \text{ cm}^3$	Exponent k der 2-parametrischen Weibullverteilung für $V_0$	BS11 BS14 $V = 932 \text{ cm}^3$	BS11 BS14 $V = 1822 \text{ cm}^3$	BS16 BS18 $V = 1473 \text{ cm}^3$	BS16 BS18 $V = 2191 \text{ cm}^3$
BS11 BS14	3,59	1,99	3,30	2,04	1,94
BS16	5,09	2,27	4,67	2,43	2,41
BS18	3,17	1,63	2,18	1,59	1,45
alle	3,69	2,11	3,80	2,20	2,12

Die zweite Zeile der Tabellen 3-14 und 3-15 bzw. die vierte Spalte der Tabellen 3-16 und 3-17 zeigen eine gute Übereinstimmung für die Prüfkörper mit zwei Lamellen der



Festigkeitsklassen BS11 und BS14. Diese Reihe umfaßte allerdings lediglich 15 Prüfkörper, zudem wird die größere Lamellendicke zu anderen Spannungsverteilungen führen als bei den Versuchen mit zwei Lamellen der Festigkeitsklassen BS16 und BS18.

Wie in den Abschnitten 3.2 und 3.3 gezeigt wurde, sind die Spannungsverteilungen in den Versuchen mit einer Lamelle und in den oberen Lamellen nach Bild 3-38 bei den Versuchen mit zwei und drei Lamellen gleichförmiger verteilt als bei den Lamellen der Versuche mit dem Bezugsvolumen  $V_0$ . Wäre die Spannung in den Versuchen mit kleineren Volumen gleichermaßen verteilt wie bei den Versuchen mit dem Bezugsvolumen  $V_0$ , wären die gemessenen Querkzugfestigkeiten wahrscheinlich geringer, und die Verhältnisse in den Tabellen 3-14 und 3-15 lägen näher bei 1.

Nach diesen Ergebnissen müßte der Exponent  $k$  kleiner als 3,0 gewählt werden.

Die Querkzugfestigkeit größerer Volumen müßte demnach stärker abgemindert werden als im EC5 angenommen.

Zu dem gleichen Ergebnis kommt A. Ranta-Maunus (1998), der die Querkzugfestigkeit von Versuchen mit dem Bezugsvolumen entsprechend DIN EN 1193, wie sie in Abschnitt 3.2 beschrieben wurden, mit der Querkzugfestigkeit von gekrümmten Satteldachträgern mit einem größeren querkzugbeanspruchten Volumen vergleicht. Dieser Vergleich mit größeren Volumen als  $V_0 = 0,01 \text{ m}^3$  ist sicherlich von größerer Bedeutung als der Vergleich mit kleineren Volumen. A. Ranta-Maunus gibt als Exponent  $k = 3,33$ , ein Wert der sehr nahe bei dem in Gleichung (24) enthaltenen Exponenten  $k = 3,688$  liegt. In dem zitierten Bericht wird auch auf die überragende Bedeutung wechselnder Holzfeuchte, hervorgerufen durch Klimawechsel der Umgebung, eingegangen. Die Querkzugfestigkeit müßte demnach je nach Klimaverlauf um bis zu 40 % abgemindert werden, während eine Beanspruchung über eine längere Zeit lediglich zu Abminderungsfaktoren von ca. 25 % führt.

Für ein querkzugbeanspruchtes Volumen von  $V_{\perp} = 0,1 \text{ m}^3$  müßte die Querkzugfestigkeit mit folgenden Faktoren abgemindert werden:

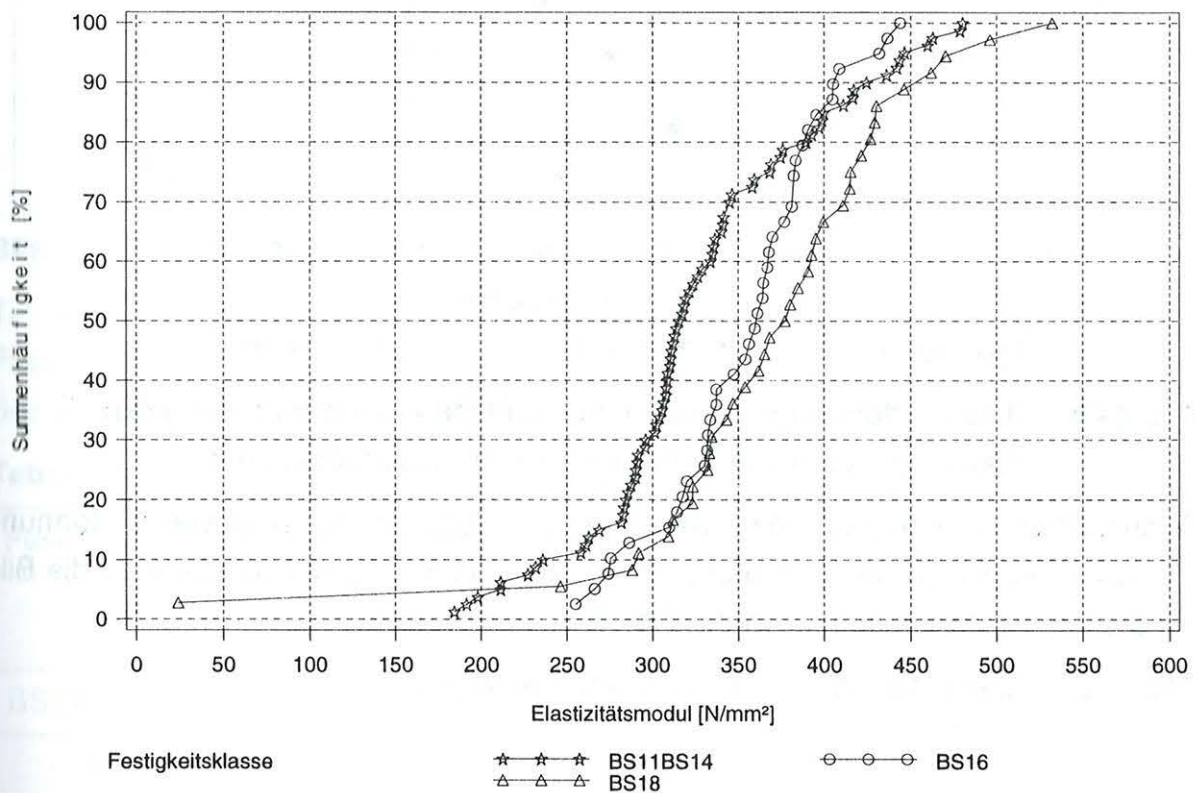
$$(V_0 / V_{\perp})^{1/k} = (0,01 / 0,1)^{0,2} = 0,63 \quad \text{nach EC5}$$

$$(V_0 / V_{\perp})^{1/k} = (0,01 / 0,1)^{0,3} = 0,50 \quad \text{für den Exponent } k = 3,33.$$

### 3.5 Elastizitätsmodul

Die Ermittlung des Elastizitätsmoduls entsprechend DIN EN 1193 wurde im Abschnitt 1.2 erläutert. Aufgrund der sehr geringen Längenänderungen bei den Versuchen mit den kleineren Prüfkörpern nach Abschnitt 3.3, für die die Genauigkeit der Wegaufnahme nicht ausreichend war, konnte der Elastizitätsmodul nur an den Prüfkörpern mit einer Höhe von 40 cm und dem Bezugsvolumen  $V_0 = 0,01 \text{ m}^3$  nach Abschnitt 3.2 bestimmt werden.

Bild 3-47 zeigt die Summenhäufigkeiten des Elastizitätsmoduls rechtwinklig zur Faserrichtung für die verschiedenen Festigkeitsklassen.

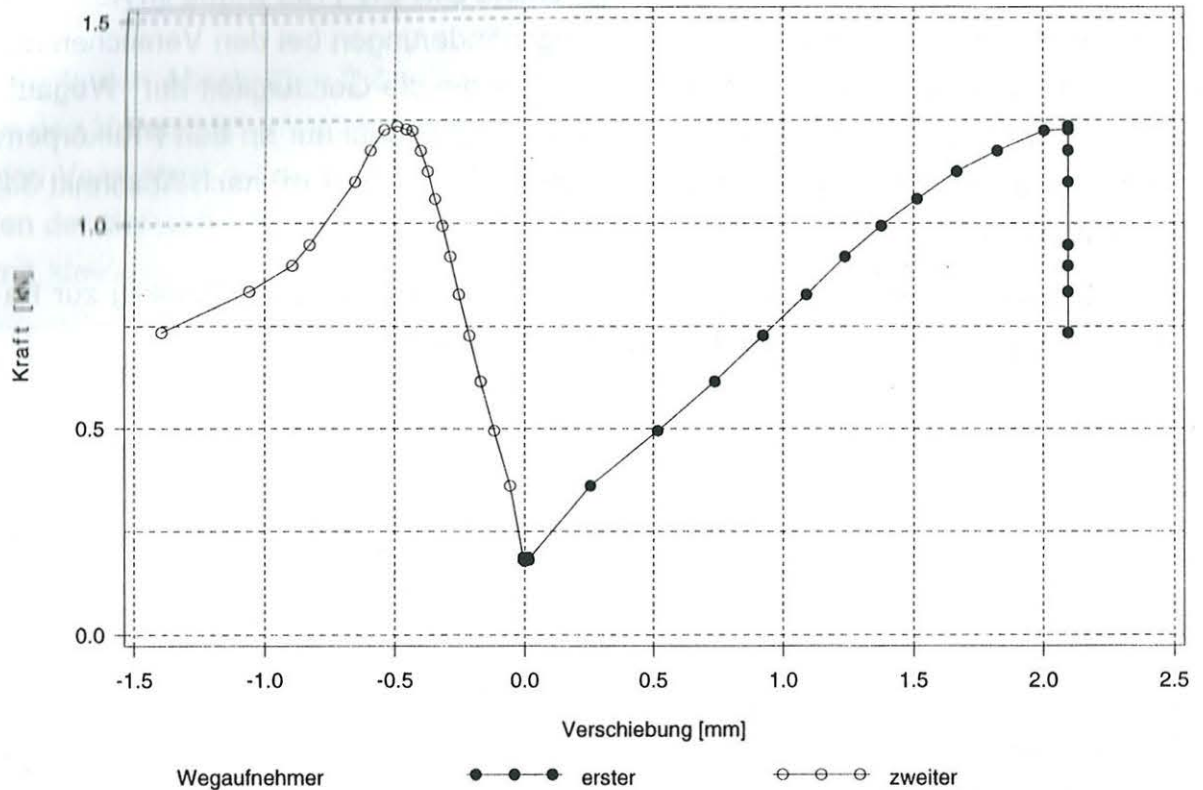


**Bild 3-47:** Summenhäufigkeit des Elastizitätsmoduls rechtwinklig zur Faserrichtung

Anders als bei der Querkzugfestigkeit, siehe hierzu Bild 3-6, weisen die höheren Festigkeitsklassen höhere Elastizitätsmoduln auf.

Derjenige Prüfkörper der Festigkeitsklasse BS18, der die geringste Querkzugfestigkeit aufwies, hat auch den geringsten Elastizitätsmodul.

Das Lastverformungsdiagramm dieses Prüfkörpers, dargestellt in Bild 3-28, ist allerdings sehr ungewöhnlich, da ein Wegaufnehmer negative Längenänderungen aufzeichnete.

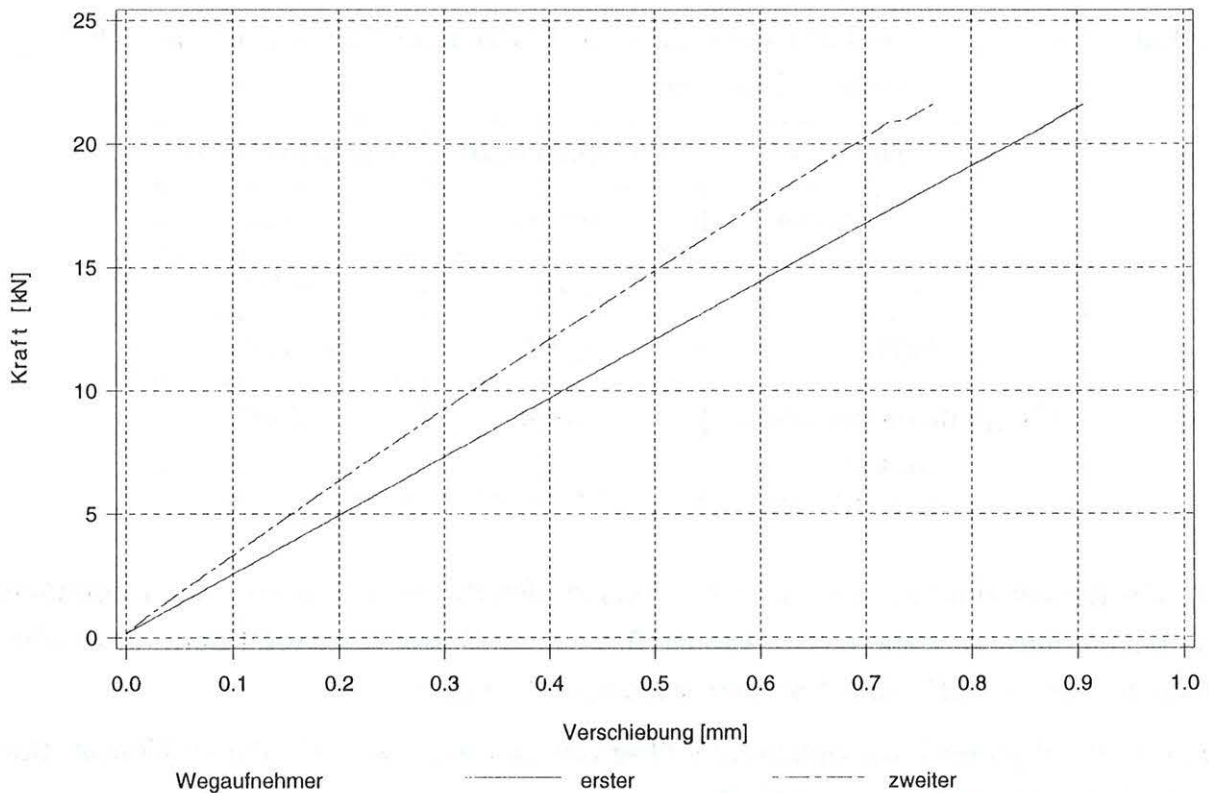


**Bild 3-48:** Last-Verformungsdiagramm des Prüfkörpers mit der niedrigsten Querkzugfestigkeit und dem niedrigsten Elastizitätsmodul

Offensichtlich beginnt das Rißwachstum auf der Seite mit den positiven Verformungen während die gegenüberliegende Seite gedrückt wird, siehe hierzu auch die Bilder 3-17 und 3-18 mit den mechanischen Beschädigungen.

Bild 3-49 zeigt ein „normales“ Last-Verformungsdiagramm.





**Bild 3-49:** Übliches Last-Verformungsdiagramm (hier für den Prüfkörper bsh101)

Tabelle 3-18 zeigt die statistischen Kennwerte der Elastizitätsmoduln rechtwinklig zur Faserrichtung ermittelt an den in Abschnitt 3.2 beschriebenen Prüfkörpern mit dem Bezugsvolumen  $V_0 = 0,01 \text{ m}^3$ .

**Tabelle 3-18:** statistische Parameter der Elastizitätsmoduln

Festigkeitsklasse	Anzahl	Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	Minimum [N/mm <sup>2</sup> ]	Maximum [N/mm <sup>2</sup> ]	5% - Fraktile [N/mm <sup>2</sup> ]	Standard- abweichg. [N/mm <sup>2</sup> ]
BS11 oder BS14	79	329	184	480	211	67,3
BS16	38	354	255	444	266	46,6
BS18	36	370	24,0	532	246	85,0
alle gemeinsam ausgewertet	153	345	24,0	532	232	69,5

Eine Untersuchung der Korrelation zwischen der Querkzugfestigkeit und der mittleren Rohdichte der Prüfkörper konnte nicht erfolgen, da die Rohdichte nur an der gerissenen Lamelle bestimmt wurde und nicht für den ganzen Prüfkörper.

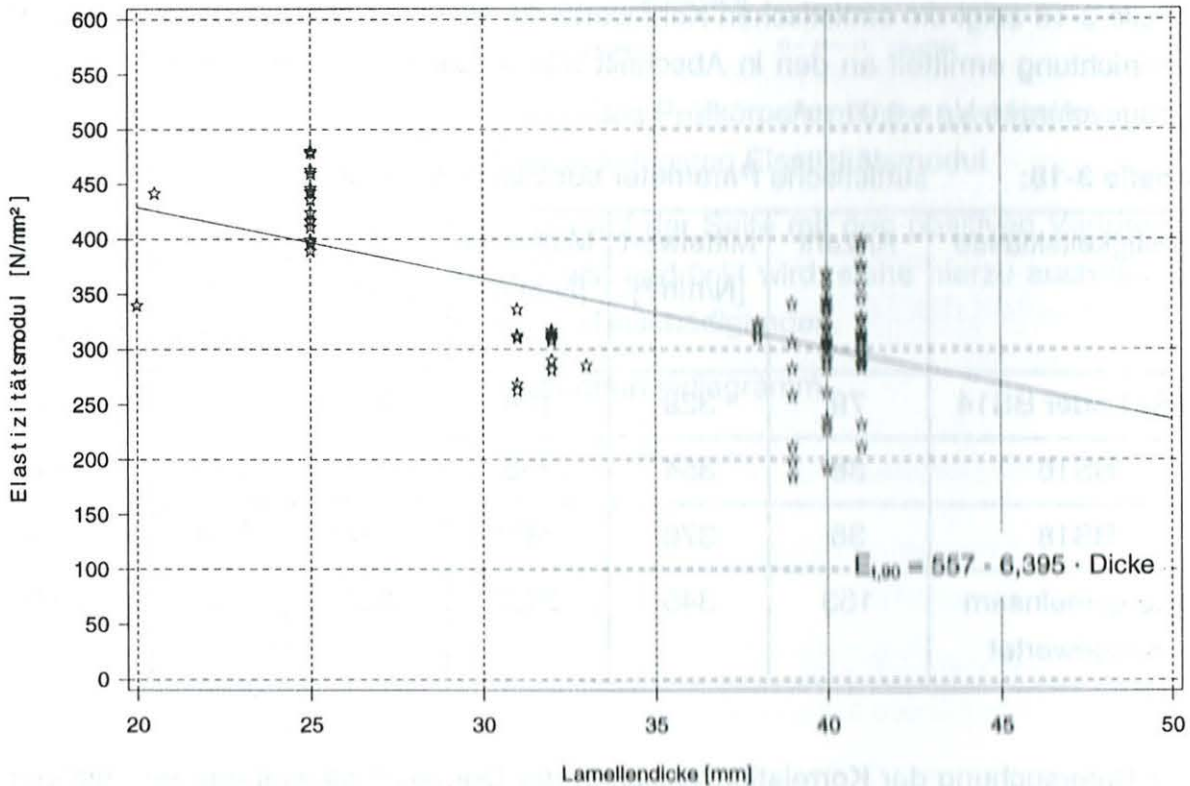


**Tabelle 3-19:** Korrelationskoeffizienten zwischen der Querkzugfestigkeit und anderen Parametern

Festigkeitsklasse	Lamellendicke	Lamellenbreite
BS11 oder BS14	-0,618	-0,361
BS16	0,010	-0,489
BS18	0,467	-0,174
alle gemeinsam ausgewertet	-0,353	0,111

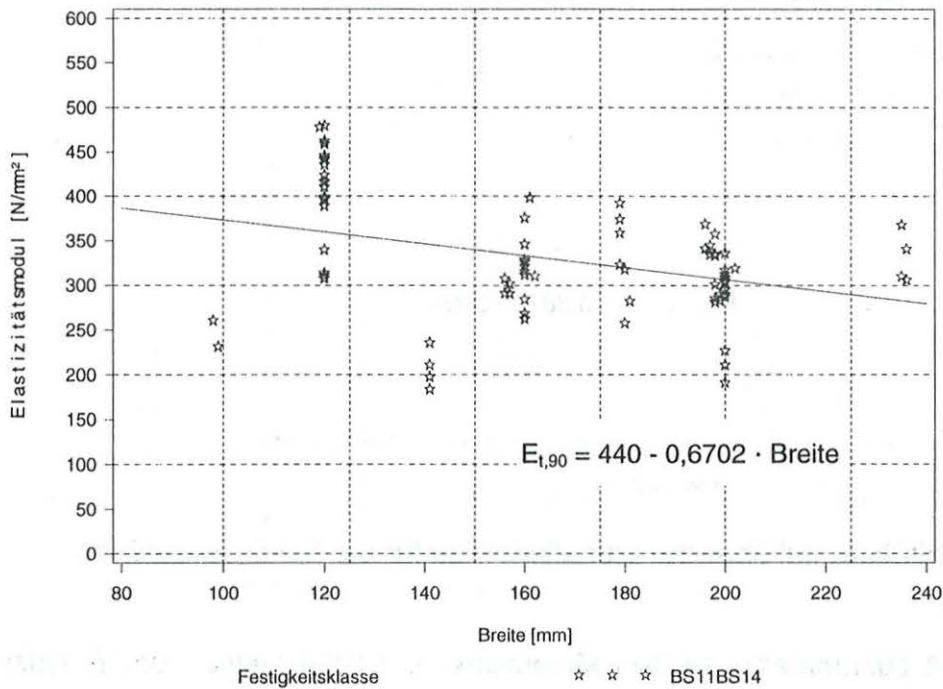
Da die Lamellendicken der Festigkeitsklassen BS16 und BS18 nur einen geringen Bereich umfaßten, siehe hierzu Tabelle 3-2, ist der Korrelationskoeffizient für die Festigkeitsklassen BS11 und BS14 am aussagekräftigsten.

Bild 3-50 zeigt den Elastizitätsmodul über der Lamellendicke für die Prüfkörper der Festigkeitsklassen BS11 und BS14.

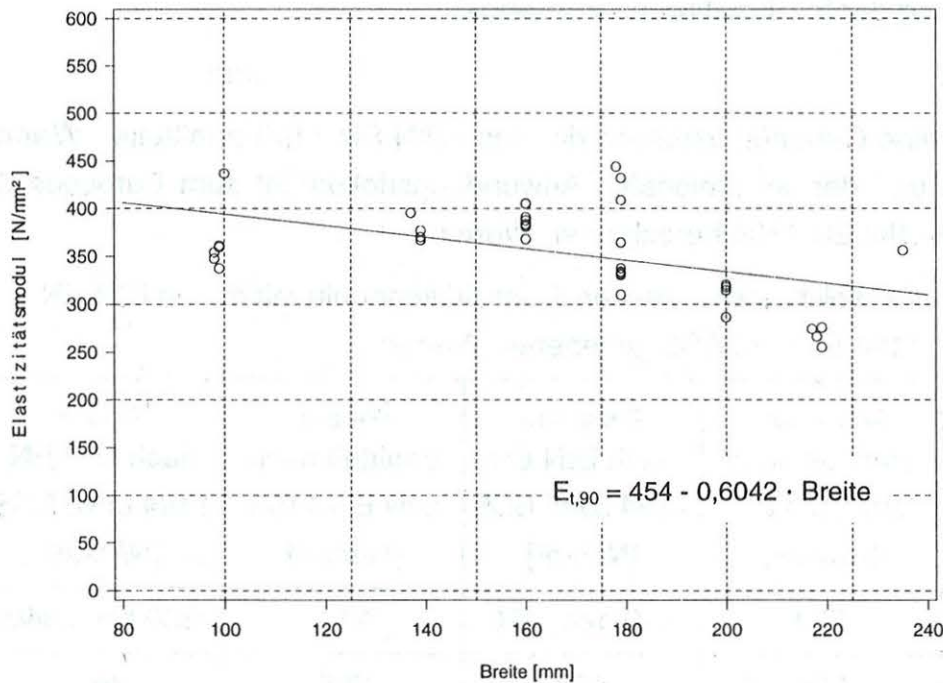


**Bild 3-50:** Elastizitätsmodul über der Lamellendicke für die Festigkeitsklassen BS11 und BS14

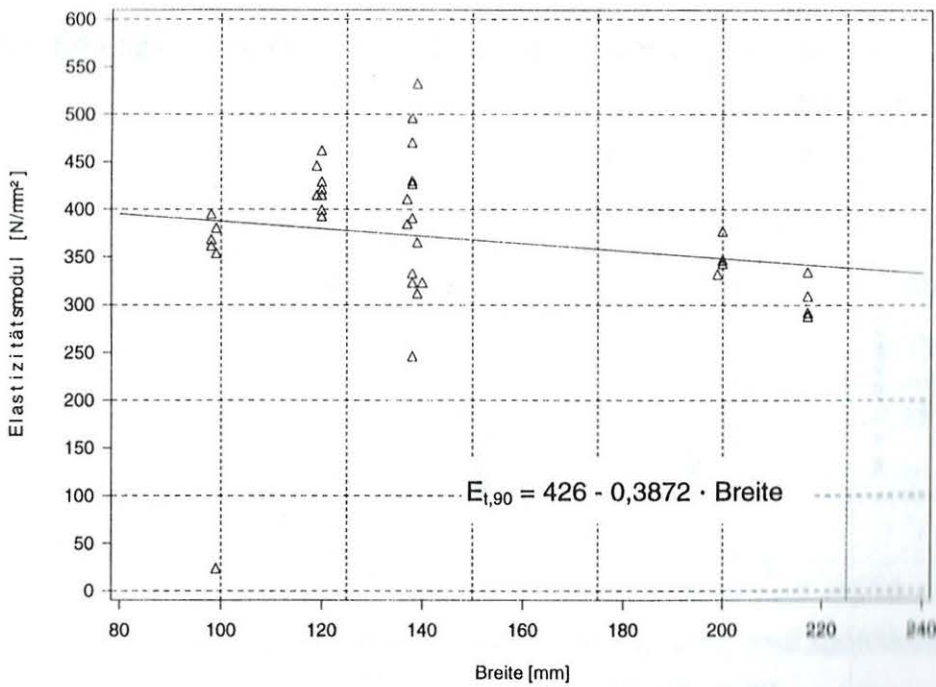
Die Bilder 3-51 bis 3-53 zeigen den Elastizitätsmodul über der Lamellenbreite für die verschiedenen Festigkeitsklassen.



**Bild 3-51:** Elastizitätsmodul über der Lamellenbreite für die Festigkeitsklassen BS11 und BS14



**Bild 3-52:** Elastizitätsmodul über der Lamellenbreite für die Festigkeitsklasse BS16



**Bild 3-53:** Elastizitätsmodul über der Lamellenbreite für die Festigkeitsklasse BS18

Die in Tabelle 3-18 zusammengestellten Mittelwerte und 5%-Fraktile der Elastizitätsmoduln sind deutlich niedriger als die gemäß DIN EN 1194 mit der Gleichung:

$$E_{90,g,\text{mean}} = E_{0,g,\text{mean}} / 30 \quad (28)$$

bestimmten Werte. Diese Gleichung wird im nationale Anwendungsdokument (NAD) auch zur Bestimmung der 5%-Fraktile verwendet:

$$E_{90,g,05} = E_{0,g,05} / 30 \quad (29)$$

Tabelle 3-20 zeigt eine Gegenüberstellung der nach DIN EN 1193 ermittelten Werte nach Tabelle 3-18 und den im nationalen Anwendungsdokument zum Eurocode 5 gegebenen, gemäß DIN EN 1194 berechneten Werten.

**Tabelle 3-20:** Vergleich der ermittelten Elastizitätsmoduln mit den in DIN EN 1194 bzw. im EC5 gegebenen Werten

Festigkeits-klasse	$E_{90,g,\text{mean}}$ ermittelt nach DIN EN 1193 [ $\text{N/mm}^2$ ]	$E_{90,g,\text{mean}}$ nach DIN EN 1194 bzw. EC5 [ $\text{N/mm}^2$ ]	$E_{90,g,05}$ ermittelt nach DIN EN 1193 [ $\text{N/mm}^2$ ]	$E_{90,g,05}$ nach DIN EN 1194 bzw. EC5 [ $\text{N/mm}^2$ ]
BS11 und BS14	329	380 bzw. 420	211	300 bzw. 340
BS16	354	450	266	360
BS18	370	480	246	380



## 4 Zusammenfassung

Ziel des im vorliegenden Bericht dargestellten Forschungsvorhabens war die Ermittlung der Querkzugfestigkeit von Voll- und Brettschichtholz gemäß dem in DIN EN 1193 beschriebenen Prüfverfahren. Mit Hilfe der Ergebnisse sollten die zum Teil widersprüchlichen Regelungen zwischen den europäischen Normen DIN EN 384, DIN EN 338 und DIN EN1194 auf der einen Seite und der DIN 1052 Ausgabe 04.88 bzw. dem nationalen Anwendungsdokument zum Eurocode 5 auf der anderen Seite geklärt werden. Diese Unterschiede sind in Abschnitt 1.1.2 dargestellt.

Üblicherweise wird im Ingenieurholzbau das unterschiedliche elastische Verhalten zwischen der tangentialen und der radialen Richtung nicht berücksichtigt. Im Rahmen der hier beschriebenen Versuche konnte diese Vereinfachung bei der Auswertung nicht zugrunde gelegt werden. Die mit Vollholz durchgeführten Versuche zeigten signifikante Unterschiede der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften je nach Beanspruchungsrichtung der Prüfkörper.

Um einen Eindruck der Spannungsverteilungen in den Prüfkörpern zu erhalten, wurden FE-Berechnungen unter Verwendung eines orthotropen Elastizitätsgesetzes mit drei Vorzugsrichtungen durchgeführt. Als Materialkoordinatensystem wurde dabei ein zylindrisches Koordinatensystem verwendet, das die Struktur des Holzes am besten erfaßt. Die Berechnungen zeigten sehr ungleichförmige Spannungsverteilungen. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch Aicher und Dill-Langer (1995 und 1997), Ranta-Maunus (1998) und Canisius (1995).

Die Berechnungen für die Vollholzprüfkörper zeigten deutliche Spannungskonzentrationen an der Klebefuge zwischen dem Zwischenholz und dem Prüfkörper. Dies dürfte der wesentliche Grund für das häufige Brechen der Vollholzprüfkörper an dieser Stelle sein. Für die Prüfkörper, die an der Klebefuge brachen, wurde eine verhältnismäßig hohe Korrelation zwischen der Querkzugfestigkeit und der Rohdichte ermittelt, während der Korrelationskoeffizient zwischen diesen beiden Parametern für die Prüfkörper mit Bruch im Holz nahe bei null lag. Eine Erklärung für diesen Unterschied wurde in Abschnitt 2.2 mit Hilfe der probabilistischen Theorie Weibulls gegeben. Dies widerspricht der Annahme der DIN EN 384, die eine Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit von der Rohdichte nach der Gleichung

$$f_{t,90,k} = 0,001 \cdot \rho_k \quad (30)$$

annimmt.

Die mit den an Vollholz durchgeführten Versuchen bestimmten Querkzugfestigkeiten können nicht als Werte der Tragfähigkeit für Bauholz angesehen werden. Die Prüf-



körper bestanden aus nahezu fehlerfreiem Material, das insbesondere keine mit bloßem Auge wahrzunehmende Schwindrisse aufwies. Das Versagen eines Holzes mit Schwindriß dürfte nur mit Hilfe der Bruchmechanik zu erfassen sein. An der Spitze des Risses werden Spannungskonzentrationen auftreten, die relativ schnell zu instabilem Rißwachstum führen dürften, so daß die Tragfähigkeit eines Querschnittes mit Riß sehr viel geringer sein wird als die Tragfähigkeit der untersuchten Prüfkörper.

Schwindrisse und Ringschäle sind auch die Fehler, die der Kommentar zur National Design Specification for Wood Construction (1993) als Begründung dafür angibt, daß in der National Design Specification (1997) der USA keine Werte der Querkzugfestigkeit für Vollholz angegeben werden, sondern mechanische Verstärkungen quer zur Faser gefordert werden.

Für Brettschichtholz empfiehlt die National Design Specification (1997) als Querkzugfestigkeit ein Drittel der Scherfestigkeit parallel zur Faserrichtung. Die in Abschnitt 3.2 dargestellten Versuche mit Prüfkörpern des Bezugsvolumen  $V_0$  zeigten jedoch, daß auch für Brettschichtholz eine Lamelle mit Ringschäle zu einer Querkzugfestigkeit nahe Null führt. Inwiefern Umlagerungen der Querkzugspannungen in größeren querkzugbeanspruchten Volumen, wie beispielsweise bei gekrümmten Trägern, erfolgen kann, wird davon abhängen über welche Länge sich die Ringschäle erstreckt. Jedoch werden selbst bei einer solchen Umlagerung Risse zu sehen sein, die kaum zu akzeptieren sind. Es sei hier auch noch einmal auf die überragende Bedeutung wechselnder Holzfeuchte hingewiesen, die bei Ranta-Maunus (1998) und Aicher und Dill-Langer (1995) beschrieben wird und die die Querkzugfestigkeit stark herabsetzt.

Festzuhalten bleibt auch, daß die Annahmen der DIN EN 1194 und DIN EN 384 nicht bestätigt werden konnten, wonach höhere Festigkeitsklassen auch höhere Querkzugfestigkeiten aufweisen. Im Gegenteil lagen die Querkzugfestigkeiten der Prüfkörper der Festigkeitsklasse BS18 meist unter denjenigen der Prüfkörper der Festigkeitsklasse BS16.

Es konnte gezeigt werden, daß der Volumeneffekt für Kurzzeitbelastung stärker ausgeprägt ist als im Eurocode 5 angenommen. Zu diesem Ergebnis kommt auch Ranta-Maunus (1998). Danach müßte die Querkzugfestigkeit für Volumen die vom Bezugsvolumen  $V_0$  abweichen mit

$$(V_0 / V_1)^{0,3} \quad (31)$$

multipliziert werden, während der Eurocode 5 den Exponenten 0,2 angibt.

Die an den Prüfkörpern aus Brettschichtholz ermittelten Elastizitätsmoduln sind kleiner als in allen bisher zitierten Normen angegeben wird.

## Literatur

Aicher, S. und Dill-Langer, G. (1995). Zugfestigkeit senkrecht zur Faserrichtung von qualitativ hochwertigem Brettschichtholz gemäß CEN Festigkeitsklassen GL32 und GL36. Otto Graf Journal Vol.6 1995, Forschungs- und Materialprüfanstalt Baden-Württemberg FMPA -Otto Graf Institut-

Aicher, S. und Dill-Langer, G. (1997). DOL Effect in Tension Perpendicular to Grain of Glulam Depending on Service Classes and Volume. CIB-W18/30-9-1

Canisius, T. (1995). End Conditions for Tension Testing of Solid Timber Perpendicular to Grain. CIB-W18/28-6-6

Colling, F. (1986). Influence of Volume and Stress Distribution on the Shear Strength and Tensile Strength Perpendicular to Grain. CIB-W18/30-9-1

Commentary on the National Design Specification for Wood Construction (1993). American Forest Paper Association, Washington, D.C.

DIN EN 338, Ausgabe Juli 1996. Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen

DIN EN 384, Ausgabe Juli 1996. Bauholz für tragende Zwecke - Bestimmung charakteristischer Festigkeits-, Steifigkeits- und Rohdichtewerte

DIN EN 1193, Entwurf Ausgabe Dezember 1993. Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung zusätzlicher physikalischer und mechanischer Eigenschaften

DIN EN 1194, Entwurf Ausgabe Dezember 1993. Brettschichtholz - Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte

Ehlbeck, J. und Kürth, J. (1994). Ermittlung der Querkzugfestigkeit von Voll- und Brettschichtholz - Entwicklung eines Prüfverfahrens, Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe (TH)

Ehlbeck, J. und Kürth, J. (1994). Ermittlung der Querkzugfestigkeit von Voll- und Brettschichtholz, Entwicklung eines Prüfverfahrens. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Karlsruhe

Gross, D. (1996). Bruchmechanik, Springer-Verlag

Larsen, H.J. und Gustafsson, P.J. (1990). The Fracture Energy of Wood in Tension Perpendicular to Grain. CIB-W18A/23-19-2

National Design Specification for Wood Construction (1997). American Forest Paper Association, Washington, D.C..

Neuhaus, F.-H. (1981). Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchte, Mitteilung Nr. 81-8, Institut für konstruktiven Ingenieurbau Ruhr-Universität Bochum

Ranta-Maunus, Alpo (1998). Duration of Load Effect in Tension Perpendicular to Grain in Curved Glulam. CIB-W18/31-9-1

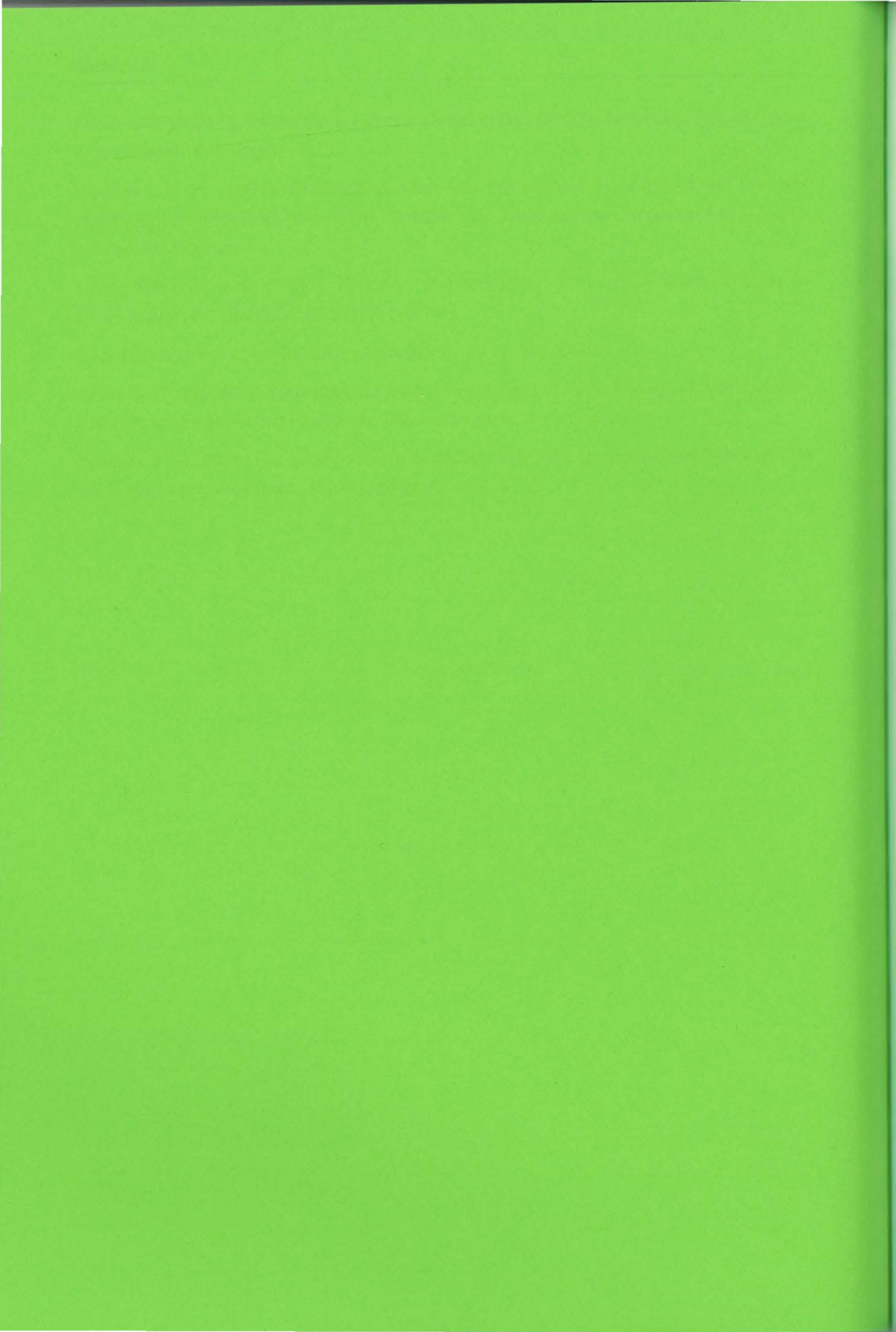
SAS Release 6.11 (1996). SAS Institute Inc.. Cary, NC, USA.

Weibull, W. (1939). A statistical theory of the strength of materials. In: Royal Swedish Institute for Engineering Research, Proceedings, N. 141, S. 45

Weibull, W. (1939). The phenomenon of rupture in solids. In: Royal Swedish Institute for Engineering Research, Proceedings, N. 153, S. 55







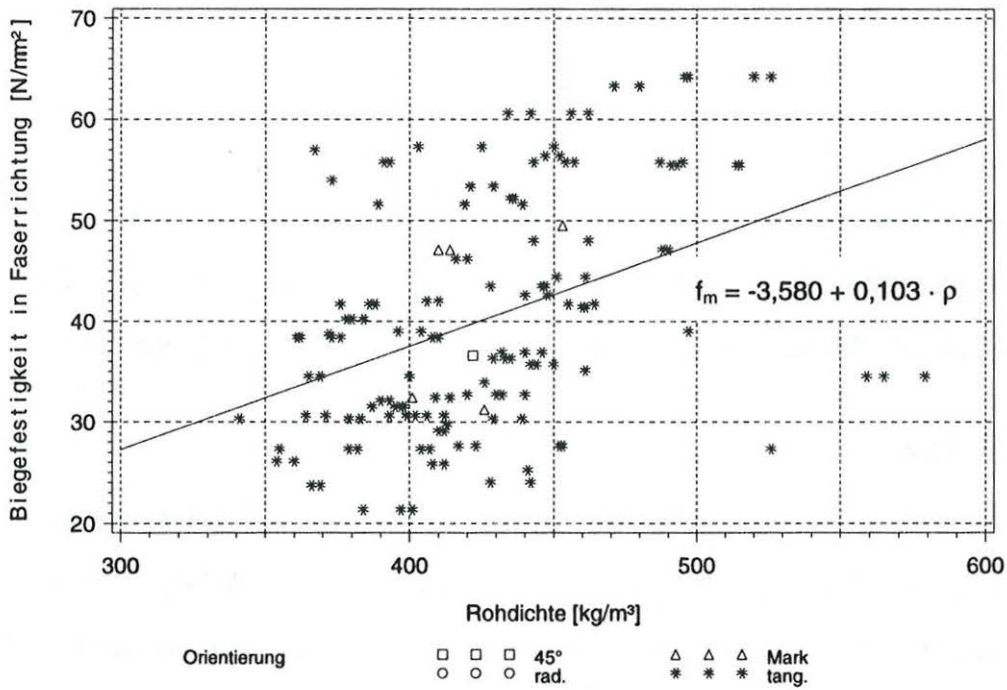
## Anlagen

### Vollholz

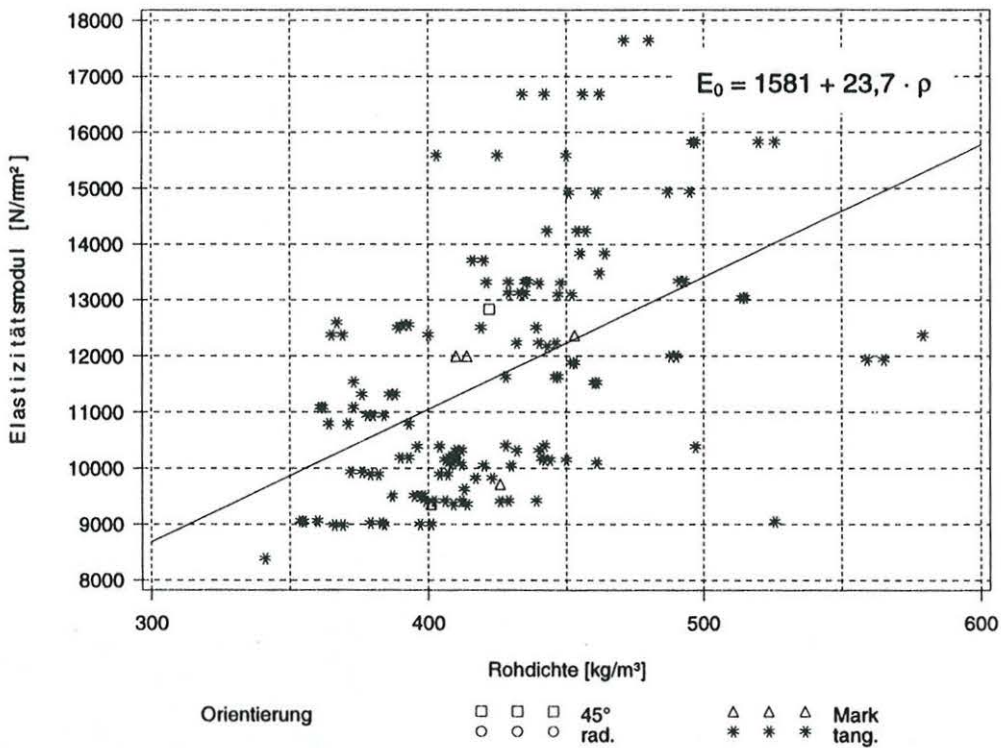
- Korrelation zwischen den Materialeigenschaften.....Anlage 2 bis 5
- Zusammenstellung der Ergebnisse.....Anlage 6 bis 13
- Bruchbilder der Prüfkörper.....Anlage 14 bis 60

### Brettschichtholz

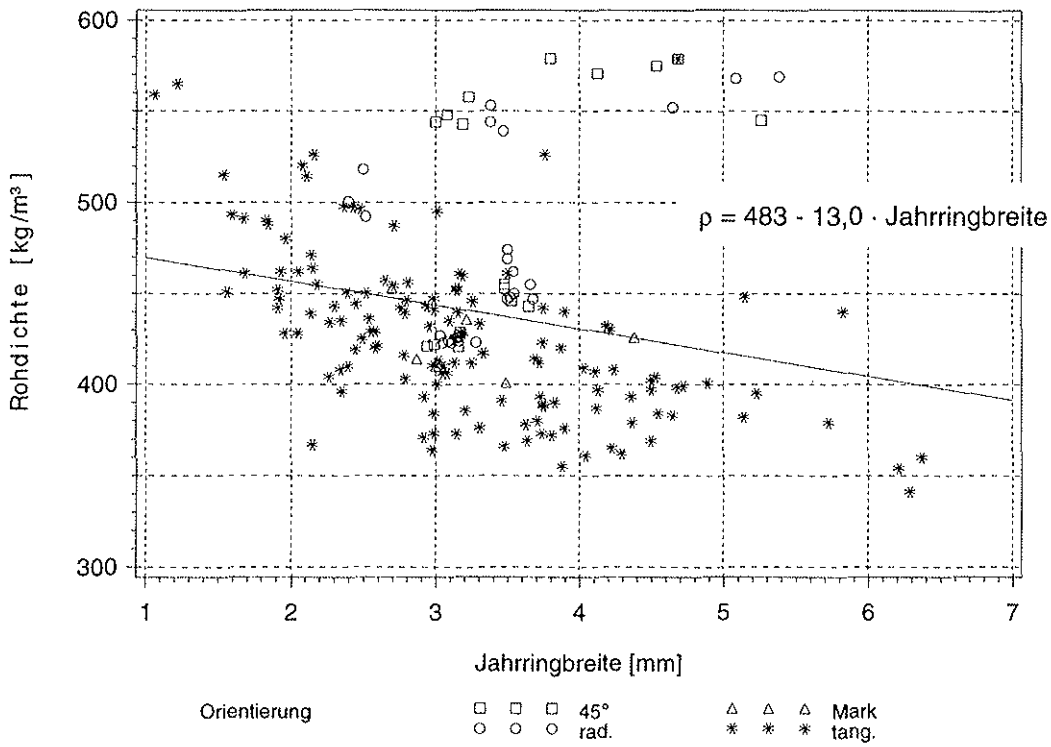
- Ergebnisse für die Prüfkörper mit  $V_0 = 0,01 \text{ m}^3$  .....Anlage 61 bis 67
- Bruchbilder der Prüfkörper mit  $V_0 = 0,01 \text{ m}^3$ .....Anlage 14 bis 153
- Ergebnisse für die Prüfkörper mit  $V < V_0$ .....Anlage 154 bis 160



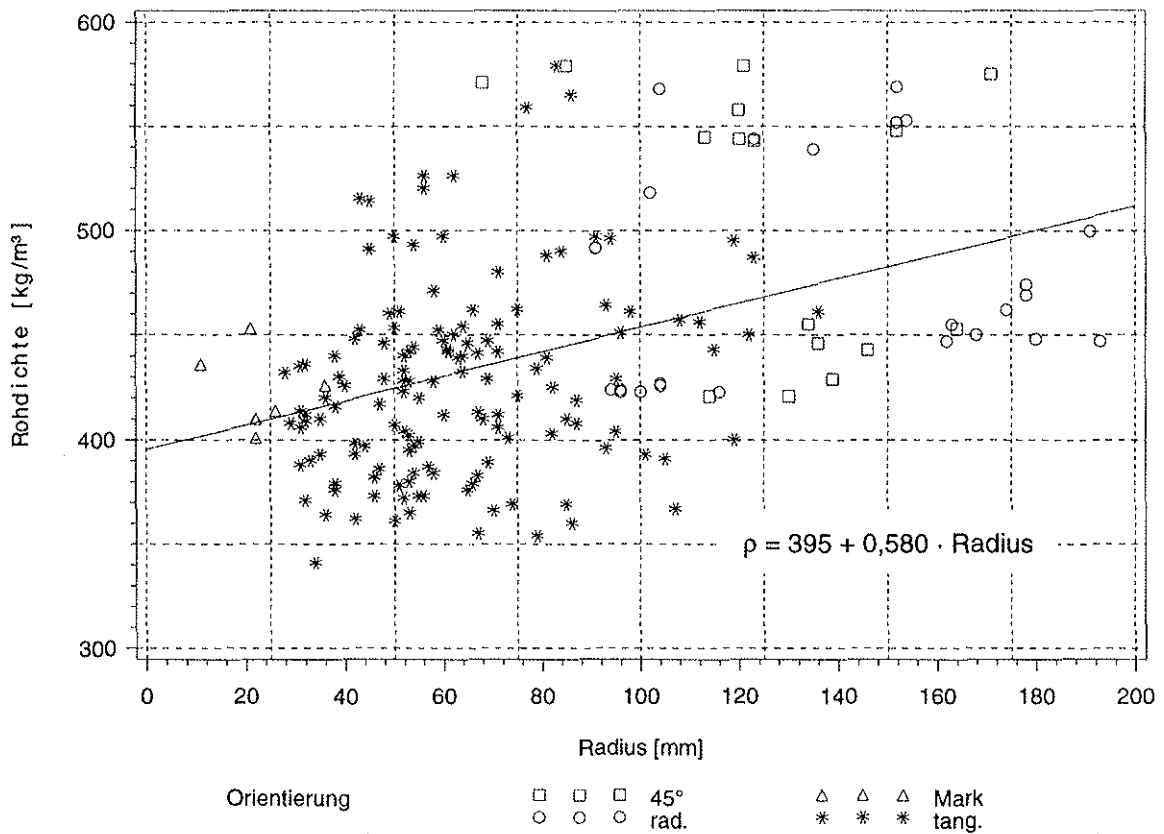
**Bild A1:** Biegefestigkeit in Faserrichtung  $f_m$  in Abhängigkeit von der Rohdichte  $\rho$  für die Vollholzprüfkörper; Korrelationskoeffizient  $r = 0,398$



**Bild A2:** Elastizitätsmodul in Faserrichtung in Abhängigkeit von der Rohdichte  $\rho$  für die Vollholzprüfkörper; Korrelationskoeffizient  $r = 0,492$

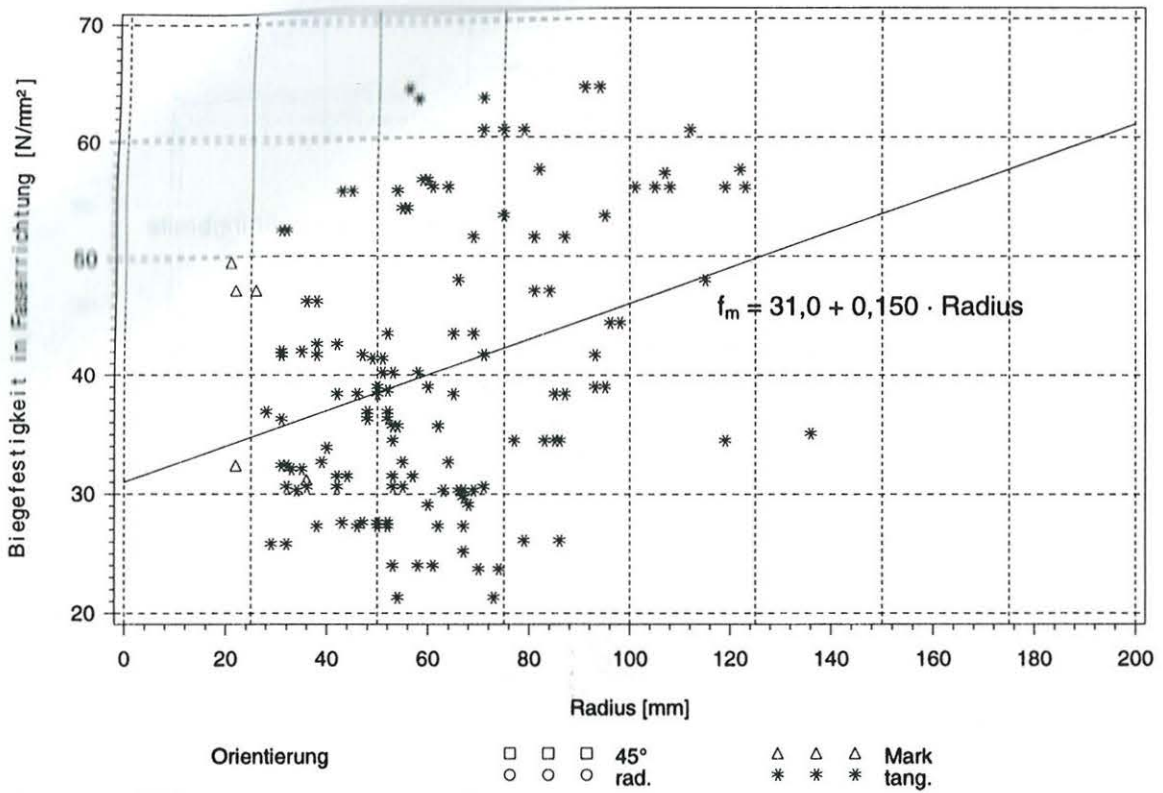


**Bild A3:** Rohdichte  $\rho$  in Abhängigkeit von der Jahrringbreite für die Vollholzprüfkörper; Korrelationskoeffizient  $r = -0,235$

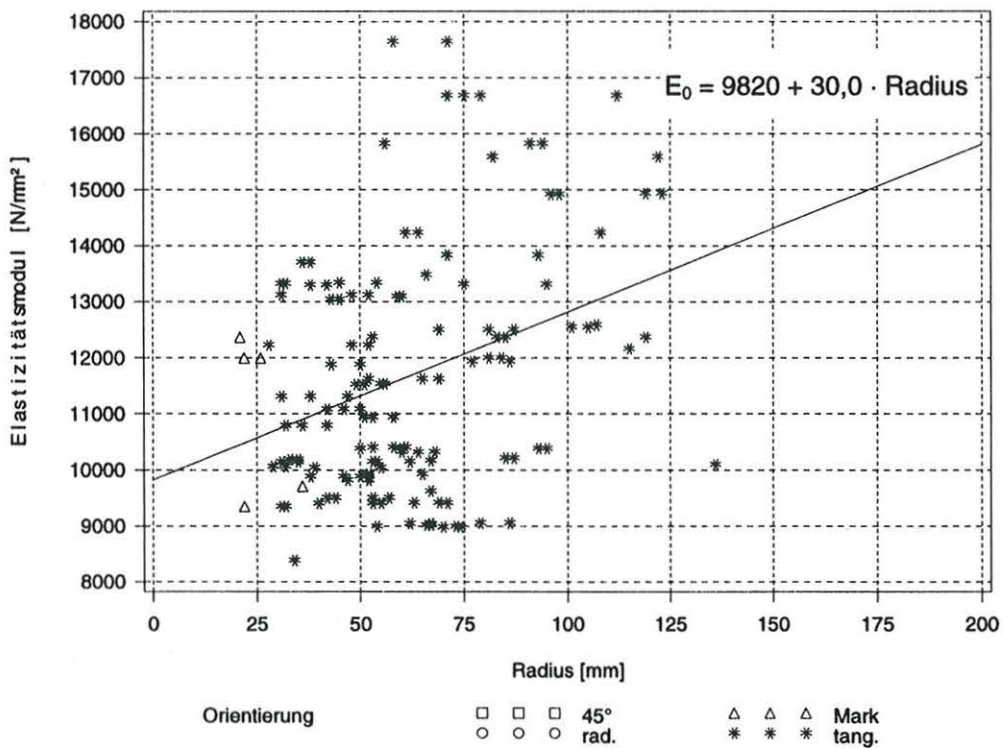


**Bild A4:** Rohdichte  $\rho$  in Abhängigkeit vom Radius für die Vollholzprüfkörper; Korrelationskoeffizient  $r = 0,424$

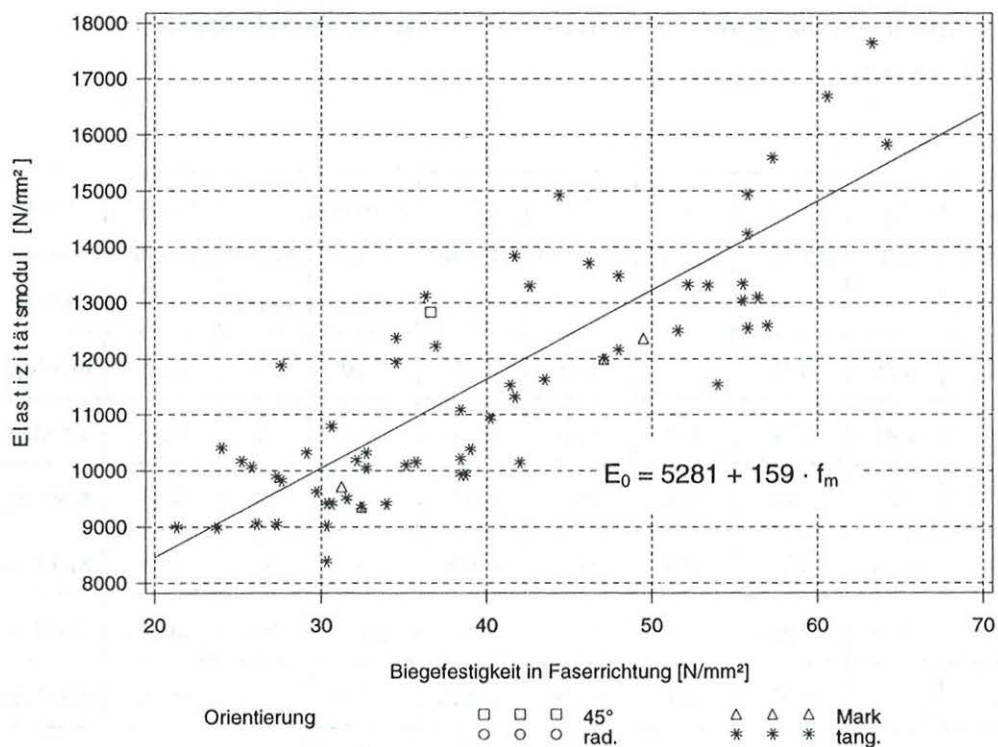




**Bild A5:** Biegefestigkeit  $f_m$  in Abhängigkeit vom Radius für die Vollholzprüfkörper; Korrelationskoeffizient  $r = 0,308$



**Bild A6:** Elastizitätsmodul  $E_0$  in Faserrichtung in Abhängigkeit vom Radius für die Vollholzprüfkörper; Korrelationskoeffizient  $r = 0,330$



**Bild A7:** Elastizitätsmodul  $E_0$  in Faserrichtung in Abhängigkeit von der Biegefestigkeit  $f_m$  in Faserrichtung für die Vollholzprüfkörper; Korrelationskoeffizient  $r = 0,853$

**Tabelle A1:** Zusammenstellung der Ergebnisse aller Versuche mit Vollholzprüfkörpern

Versuch	$f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$E_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Jahrring breite [mm]	Ab- stand [mm]	Orien- tierung	Stelle des Bruchs
1	2,14	6,75	190	461	35,1	10100	3,50	136	tang.	Klebfuge
2	0,45	1,42	179	426	31,2	9700	4,38	36	Mark	im Mark
3	2,10	6,61	139	455	41,7	13800	2,18	71	tang.	Klebfuge
4	1,57	4,94	136	464	41,7	13800	2,15	93	tang.	Klebfuge
5	1,38	4,34	126	497	39,0	10400	2,43	50	tang.	im Holz
6	2,41	7,55	200	497	39,0	10400	2,43	60	tang.	Klebfuge
7	2,52	7,92	266	565	34,5	11900	1,22	86	tang.	im Holz
8	2,51	7,93	242	559	34,5	11900	1,06	77	tang.	Klebfuge
9	1,47	4,62	380	453	49,5	12400	2,70	21	Mark	im Holz
10	2,12	6,66	208	441	25,2	10200	2,99	67	tang.	Klebfuge
11	1,59	5,01	155	413	29,7	9600	3,02	67	tang.	im Holz
12	0,92	2,89	145	408	38,4	10200	2,34	87	tang.	im Holz
13	1,76	5,55	138	410	38,4	10200	2,39	85	tang.	Klebfuge
14	2,21	6,98	182	451	44,4	14900	1,56	96	tang.	Klebfuge
15	2,44	7,70	182	461	44,4	14900	1,68	98	tang.	Klebfuge
16	1,98	6,28	196	419	51,6	12500	2,44	87	tang.	Klebfuge
17	2,11	6,66	216	439	51,6	12500	2,14	81	tang.	Klebfuge
18	1,55	4,90	226	389	51,6	12500	3,75	69	tang.	Klebfuge
19	1,82	5,68	155	422	36,6	12800	2,99	.	45°	Klebfuge
20	2,77	8,71	181	514	55,5	13000	2,11	45	tang.	Klebfuge
21	2,77	8,73	172	515	55,5	13000	1,54	43	tang.	im Holz
22	1,90	6,00	134	442	60,6	16700	3,75	71	tang.	im Holz
23	1,78	5,62	193	456	60,6	16700	2,81	112	tang.	Klebfuge



Tabelle A1 (Fortsetzung):

Versuch	$f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$E_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Jahrring breite [mm]	Ab- stand [mm]	Orien- tierung	Stelle des Bruchs
24	1,49	4,70	143	391	55,8	12500	3,46	105	tang.	Klebfuge
25	1,37	4,33	122	393	55,8	12500	3,73	101	tang.	im Holz
26	2,08	6,55	188	490	47,1	12000	1,83	84	tang.	Klebfuge
27	1,25	3,93	195	488	47,1	12000	1,84	81	tang.	Klebfuge
28	2,61	8,21	224	487	55,8	14900	2,71	123	tang.	Klebfuge
29	2,44	7,67	269	495	55,8	14900	3,01	119	tang.	Klebfuge
30	1,60	5,05	164	367	57,0	12600	2,15	107	tang.	Klebfuge
31	1,95	6,13	179	443	48,0	12200	2,30	115	tang.	Klebfuge
32	1,50	4,70	174	369	34,5	12400	4,50	85	tang.	Klebfuge
33	1,89	5,95	107	365	34,5	12400	4,23	53	tang.	Klebfuge
34	2,27	7,14	209	396	39,0	10400	2,35	93	tang.	Klebfuge
35	1,27	4,02	124	404	39,0	10400	2,26	95	tang.	Klebfuge
36	1,79	5,65	143	429	53,4	13300	2,55	95	tang.	Klebfuge
37	1,84	5,79	146	421	53,4	13300	2,59	75	tang.	Klebfuge
38	1,66	5,24	96	526	27,3	9000	3,76	62	tang.	Klebfuge
39	0,57	1,80	109	355	27,3	9000	3,88	67	tang.	Klebfuge
40	1,77	5,59	173	462	60,6	16700	2,05	75	tang.	Klebfuge
41	2,19	6,91	164	434	60,6	16700	2,27	79	tang.	Klebfuge
42	1,86	5,85	148	471	63,3	17600	2,14	58	tang.	Klebfuge
43	1,74	5,48	161	480	63,3	17600	1,96	71	tang.	Klebfuge
44	1,51	4,76	122	354	26,1	9100	6,21	79	tang.	im Holz
45	1,38	4,37	129	360	26,1	9100	6,37	86	tang.	im Holz
46	1,88	5,90	116	341	30,3	8400	6,29	34	tang.	im Holz
47	1,96	6,19	161	450	57,3	15600	2,39	122	tang.	Klebfuge
48	1,86	5,87	165	425	57,3	15600	2,49	82	tang.	Klebfuge



Tabelle A1 (Fortsetzung):

Versuch	$f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$E_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Jahrring breite [mm]	Ab- stand [mm]	Orien- tierung	Stelle des Bruchs
49	1,66	5,25	164	403	57,3	15600	2,79	82	tang.	im Holz
50	1,91	6,02	193	457	55,8	14200	2,65	108	tang.	Klebfuge
51	2,20	6,94	178	454	55,8	14200	2,71	64	tang.	im Holz
52	2,12	6,67	162	443	55,8	14200	2,94	61	tang.	Klebfuge
53	0,68	2,15	259	410	47,1	12000	3,00	22	Mark	im Mark
54	0,96	3,02	229	414	47,1	12000	2,87	26	Mark	im Mark
55	1,88	5,93	178	400	34,5	12400	3,01	119	tang.	im Holz
56	2,25	7,03	199	579	34,5	12400	4,69	83	tang.	Klebfuge
57	3,05	9,64	872	469	.	.	3,50	178	rad.	im Holz
58	2,08	6,53	423	447	.	.	3,50	193	rad.	Klebfuge
59	3,17	9,94	793	448	.	.	3,52	180	rad.	Klebfuge
60	3,16	9,92	883	474	.	.	3,50	178	rad.	im Holz
61	3,18	9,98	894	575	.	.	4,54	171	45°	im Holz
62	2,41	7,56	943	552	.	.	4,65	152	rad.	im Holz
63	3,18	9,93	972	568	.	.	5,09	104	rad.	im Holz
64	1,84	5,76	1032	569	.	.	5,39	152	rad.	Klebfuge
65	2,03	6,34	421	436	.	.	3,22	11	Mark	im Holz
66	2,69	8,37	142	421	.	.	2,94	130	45°	Klebfuge
67	2,24	6,99	148	421	.	.	2,94	114	45°	im Holz
68	2,50	7,72	143	429	.	.	3,17	139	45°	im Holz
69	1,61	5,06	199	443	.	.	3,65	146	45°	Klebfuge
70	1,77	5,53	182	446	.	.	3,53	136	45°	Klebfuge
71	1,72	5,39	208	455	.	.	3,48	134	45°	Klebfuge
72	1,77	5,54	206	453	.	.	3,48	164	45°	Klebfuge
73	2,99	9,40	791	450	.	.	3,55	168	rad.	im Holz

Tabelle A1 (Fortsetzung):

Versuch	$f_{1,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$E_{1,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Jahring breite [mm]	Ab- stand [mm]	Orien- tierung	Stelle des Bruchs
74	2,88	9,00	742	462	.	.	3,54	174	rad.	im Holz
75	3,19	9,96	728	447	.	.	3,68	162	rad.	im Holz
76	1,84	5,77	761	455	.	.	3,66	163	rad.	im Holz
77	2,29	7,17	584	423	.	.	3,11	100	rad.	Klebfuge
78	2,83	8,83	537	426	.	.	3,15	104	rad.	Klebfuge
79	2,49	7,77	615	424	.	.	3,16	94	rad.	Klebfuge
80	2,26	7,07	758	427	.	.	3,03	104	rad.	im Holz
81	2,04	6,38	541	424	.	.	3,09	96	rad.	Klebfuge
82	2,68	8,41	562	423	.	.	3,28	96	rad.	Klebfuge
83	3,18	9,95	594	421	.	.	3,16	114	45°	Klebfuge
84	2,20	6,90	536	423	.	.	3,05	116	rad.	Klebfuge
85	1,76	5,52	236	548	.	.	3,08	152	45°	Klebfuge
86	1,51	4,74	217	543	.	.	3,19	123	45°	Klebfuge
87	1,45	4,55	231	544	.	.	3,00	120	45°	Klebfuge
88	2,01	6,30	209	558	.	.	3,23	120	45°	Klebfuge
89	2,97	9,33	725	544	.	.	3,38	123	rad.	im Holz
90	2,76	8,68	784	539	.	.	3,47	135	rad.	Klebfuge
91	2,92	9,16	849	553	.	.	3,38	154	rad.	im Holz
92	1,93	6,03	712	518	.	.	2,50	102	rad.	Klebfuge
93	1,88	5,89	614	492	.	.	2,52	91	rad.	Klebfuge
94	2,08	6,50	672	500	.	.	2,40	191	rad.	Klebfuge
95	3,18	9,97	447	545	.	.	5,26	113	45°	Klebfuge
96	1,01	3,17	217	579	.	.	4,69	85	45°	Klebfuge
97	1,88	5,90	370	571	.	.	4,13	68	45°	Klebfuge
98	1,49	4,69	342	579	.	.	3,80	121	45°	Klebfuge

Tabelle A1 (Fortsetzung):

Versuch	$f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$E_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Jahrring breite [mm]	Ab- stand [mm]	Orien- tierung	Stelle des Bruchs
99	1,86	5,82	176	416	46,2	13700	2,78	38	tang.	im Holz
100	2,27	7,04	164	420	46,2	13700	2,58	36	tang.	Klebfuge
101	0,52	1,62	228	401	32,4	9300	3,49	22	Mark	im Holz
102	1,66	5,20	202	409	32,4	9300	4,03	32	tang.	im Holz
103	1,93	6,07	222	414	32,4	9300	3,69	31	tang.	im Holz
104	1,79	5,62	186	406	42,0	10100	3,08	31	tang.	im Holz
105	1,84	5,78	182	410	42,0	10100	2,98	35	tang.	im Holz
106	1,97	6,17	188	402	30,6	9400	4,50	53	tang.	Klebfuge
107	1,96	6,13	168	399	30,6	9400	4,72	55	tang.	Klebfuge
108	2,09	6,51	179	432	32,7	10300	4,19	64	tang.	im Holz
109	1,97	6,18	186	440	32,7	10300	3,90	64	tang.	im Holz
110	1,91	5,97	120	361	38,4	11100	4,04	50	tang.	im Holz
111	1,50	4,71	115	362	38,4	11100	4,30	42	tang.	im Holz
112	2,08	6,52	158	461	41,4	11500	3,17	51	tang.	Klebfuge
113	2,13	6,73	159	460	41,4	11500	3,19	49	tang.	Klebfuge
114	1,88	5,91	138	452	56,4	13100	1,91	59	tang.	im Holz
115	2,03	6,38	128	447	56,4	13100	1,92	60	tang.	im Holz
116	0,95	2,99	179	435	52,2	13300	2,35	31	tang.	im Holz
117	1,92	6,01	143	436	52,2	13300	2,54	32	tang.	im Holz
118	0,91	2,83	172	430	32,7	10000	4,22	39	tang.	im Holz
119	1,67	5,26	121	372	38,7	9900	3,81	52	tang.	Klebfuge
120	2,53	7,90	159	446	43,5	11600	2,80	65	tang.	Klebfuge
121	2,52	7,90	158	447	43,5	11600	2,99	69	tang.	Klebfuge
122	2,19	6,86	157	428	43,5	11600	3,19	52	tang.	im Holz
123	2,38	7,48	167	442	35,7	10100	2,76	53	tang.	Klebfuge

Tabelle A1 (Fortsetzung):

Versuch	$f_{1,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$E_{1,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Jahrring breite [mm]	Ab- stand [mm]	Orien- tierung	Stelle des Bruchs
124	1,33	4,15	169	450	35,7	10100	2,52	62	tang.	im Holz
125	1,58	4,99	157	444	35,7	10100	2,45	54	tang.	im Holz
126	1,78	5,60	226	448	42,6	13300	5,15	42	tang.	im Holz
127	1,56	4,89	208	440	42,6	13300	5,83	38	tang.	im Holz
128	1,97	6,19	152	407	27,3	9900	4,11	50	tang.	im Holz
129	0,97	3,07	156	404	27,3	9900	4,53	52	tang.	im Holz
130	0,95	2,99	159	462	48,0	13500	1,93	66	tang.	im Holz
131	1,18	3,69	187	426	33,9	9400	3,14	40	tang.	im Holz
132	1,68	5,27	168	412	30,6	9400	3,13	71	tang.	Klebfuge
133	1,69	5,32	172	406	30,6	9400	3,05	71	tang.	im Holz
134	2,18	6,87	166	376	38,4	9900	3,90	65	tang.	im Holz
135	1,91	6,01	141	373	38,4	11100	3,74	46	tang.	im Holz
136	1,97	6,20	199	429	30,3	9400	2,58	69	tang.	Klebfuge
137	1,72	5,39	210	439	30,3	9400	2,79	63	tang.	Klebfuge
138	1,87	5,87	144	420	32,7	10000	3,87	55	tang.	im Holz
139	0,70	2,21	189	408	25,8	10100	4,24	29	tang.	im Holz
140	1,08	3,39	177	412	25,8	10100	3,72	32	tang.	im Holz
141	1,52	4,79	128	366	23,7	9000	3,48	70	tang.	im Holz
142	1,60	5,03	135	369	23,7	9000	3,64	74	tang.	Klebfuge
143	2,41	7,59	133	382	27,3	9900	5,14	46	tang.	im Holz
144	1,65	5,19	126	379	27,3	9900	5,73	38	tang.	Klebfuge
145	1,90	6,01	163	428	24,0	10400	2,05	53	tang.	Klebfuge
146	0,93	2,93	152	428	24,0	10400	1,96	58	tang.	im Holz
147	1,91	5,99	148	442	24,0	10400	1,91	61	tang.	Klebfuge
148	2,15	6,76	137	388	41,7	11300	3,75	31	tang.	im Holz



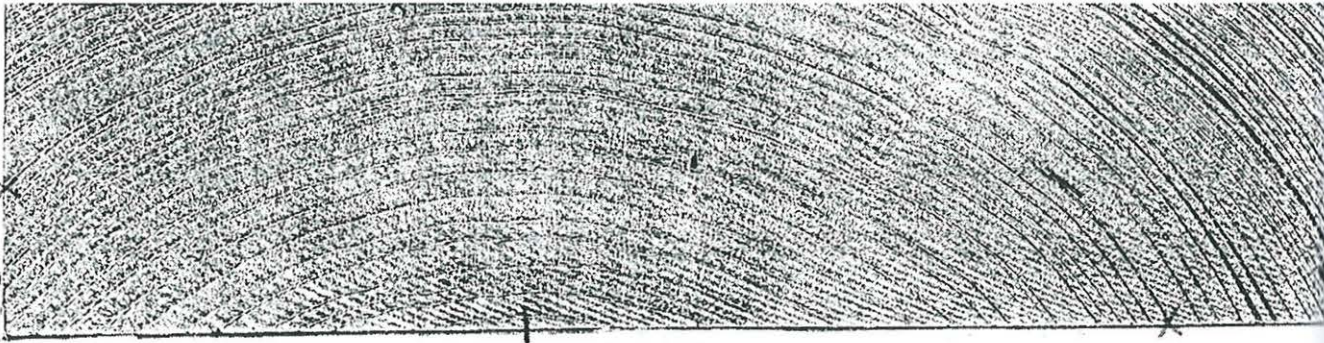
Tabelle A1 (Fortsetzung):

Versuch	$f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$E_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Jahrring breite [mm]	Ab- stand [mm]	Orien- tierung	Stelle des Bruchs
149	1,18	3,71	114	386	41,7	11300	3,21	47	tang.	im Holz
150	1,39	4,34	114	393	30,6	10800	2,92	42	tang.	im Holz
151	1,80	5,65	162	379	30,3	9000	4,37	66	tang.	im Holz
152	2,13	6,70	172	383	30,3	9000	4,65	67	tang.	im Holz
153	1,10	3,45	279	496	64,2	15800	2,48	94	tang.	im Holz
154	2,66	8,33	304	497	64,2	15800	2,37	91	tang.	Klebfuge
155	1,79	5,63	87	373	54,0	11500	2,99	55	tang.	Klebfuge
156	1,78	5,59	92	373	54,0	11500	3,15	56	tang.	im Holz
157	1,45	4,56	276	432	36,9	12200	2,96	28	tang.	im Holz
158	1,67	5,24	195	440	36,9	12200	3,16	52	tang.	im Holz
159	1,96	6,18	171	446	36,9	12200	3,26	48	tang.	im Holz
160	1,63	5,11	222	433	36,3	13100	3,31	52	tang.	im Holz
161	1,73	5,43	183	429	36,3	13100	3,18	48	tang.	im Holz
162	1,48	4,69	152	401	21,3	9000	4,89	73	tang.	Klebfuge
163	1,73	5,45	132	397	31,5	9500	4,13	44	tang.	im Holz
164	1,78	5,58	122	398	31,5	9500	4,68	42	tang.	im Holz
165	1,51	4,74	143	417	27,6	9800	3,33	47	tang.	Klebfuge
166	1,69	5,31	132	423	27,6	9800	3,74	52	tang.	Klebfuge
167	1,82	5,72	135	376	41,7	11300	3,31	38	tang.	Klebfuge
168	1,46	4,58	108	364	30,6	10800	2,98	36	tang.	im Holz
169	1,81	5,68	100	371	30,6	10800	2,92	32	tang.	im Holz
170	1,41	4,46	128	384	40,2	10900	2,99	58	tang.	Klebfuge
171	1,84	5,78	113	380	40,2	10900	3,71	53	tang.	Klebfuge
172	1,69	5,33	115	378	40,2	10900	3,63	51	tang.	Klebfuge
173	2,05	6,40	196	520	64,2	15800	2,08	56	tang.	Klebfuge

Tabelle A1 (Fortsetzung):

Versuch	$f_{1,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$F_{max}$ [kN]	$E_{1,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Jahrring breite [mm]	Ab- stand [mm]	Orien- tierung	Stelle des Bruchs
174	2,25	7,04	187	526	64,2	15800	2,16	56	tang.	Klebfuge
175	2,20	6,91	157	412	29,1	10300	3,25	60	tang.	Klebfuge
176	2,09	6,57	161	410	29,1	10300	3,05	68	tang.	Klebfuge
177	2,27	7,15	151	491	55,5	13300	1,67	45	tang.	Klebfuge
178	2,56	8,01	146	493	55,5	13300	1,59	54	tang.	Klebfuge
179	1,63	5,10	144	390	32,1	10200	3,83	33	tang.	im Holz
180	1,47	4,61	132	393	32,1	10200	4,36	35	tang.	im Holz
181	0,81	2,53	174	435	36,3	13100	3,10	31	tang.	im Holz
182	1,46	4,56	178	453	27,6	11900	3,15	50	tang.	im Holz
183	1,72	5,40	159	452	27,6	11900	3,15	43	tang.	im Holz
184	1,67	5,25	143	397	21,3	9000	4,50	54	tang.	Klebfuge
185	1,67	5,26	131	384	21,3	9000	4,55	54	tang.	Klebfuge
186	1,61	5,06	141	395	31,5	9500	5,23	53	tang.	im Holz
187	1,79	5,64	137	387	31,5	9500	4,12	57	tang.	im Holz

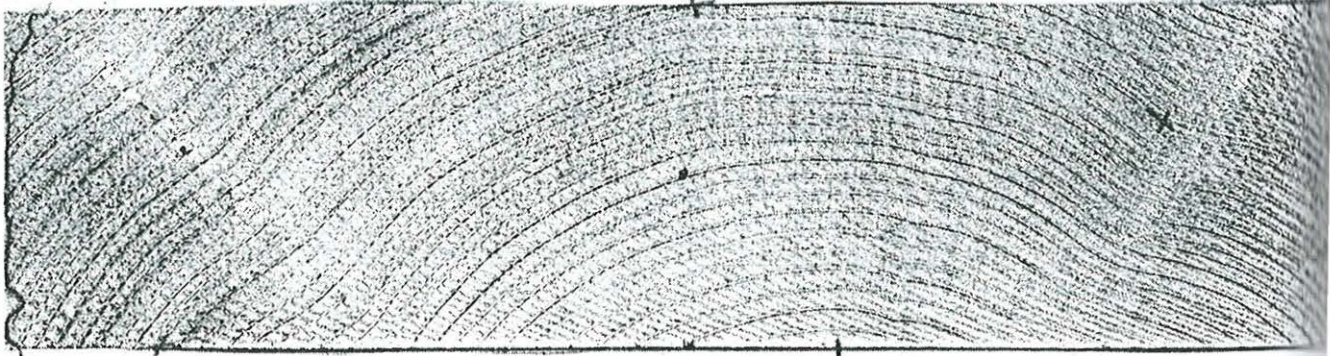




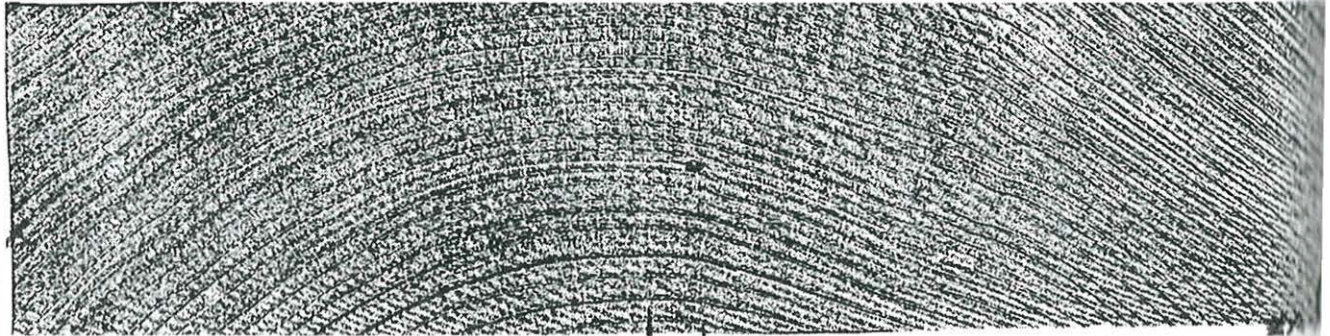
Versuch 1



Versuch 2



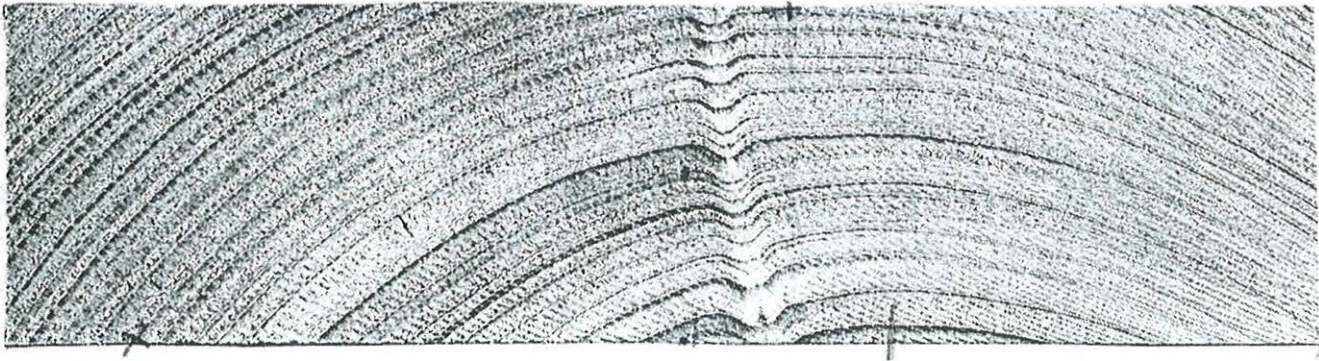
Versuch 3



Versuch 4

**Bild A8:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

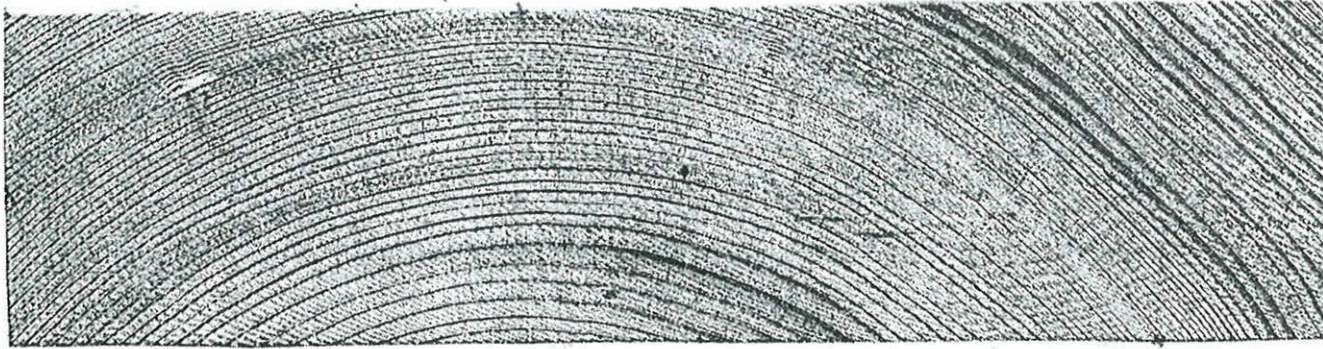




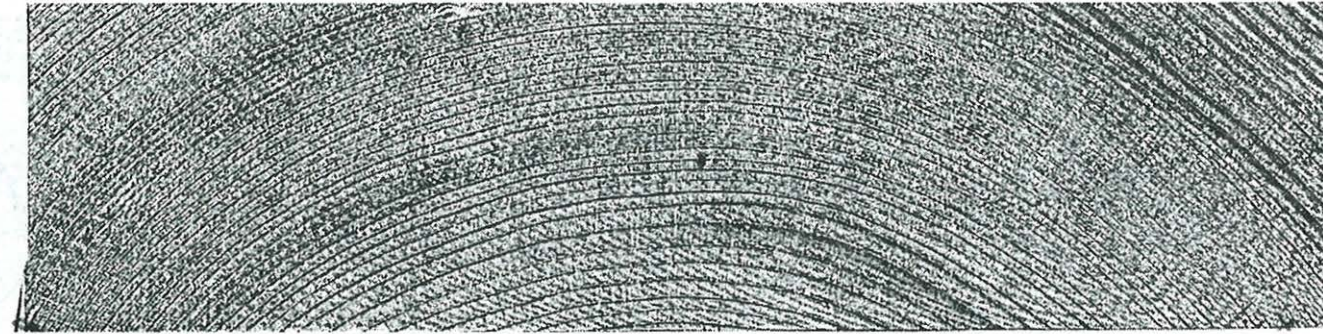
Versuch 5



Versuch 6



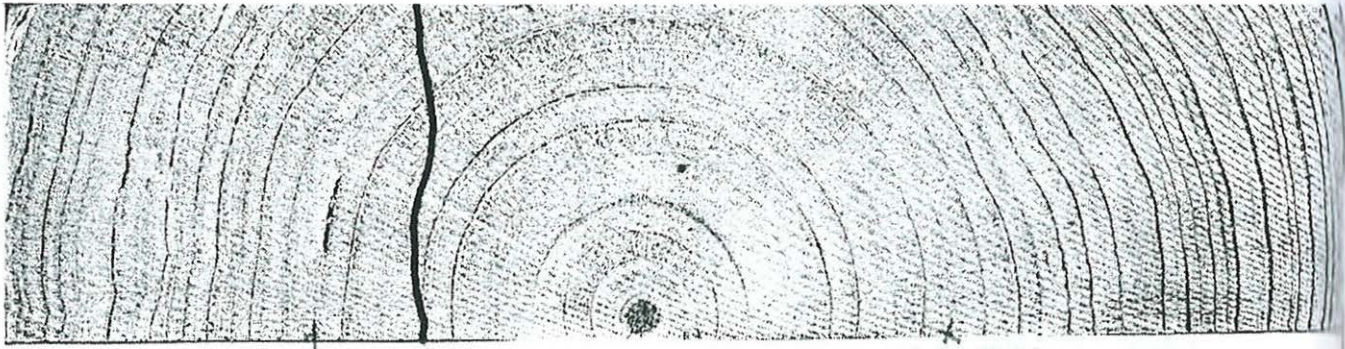
Versuch 7



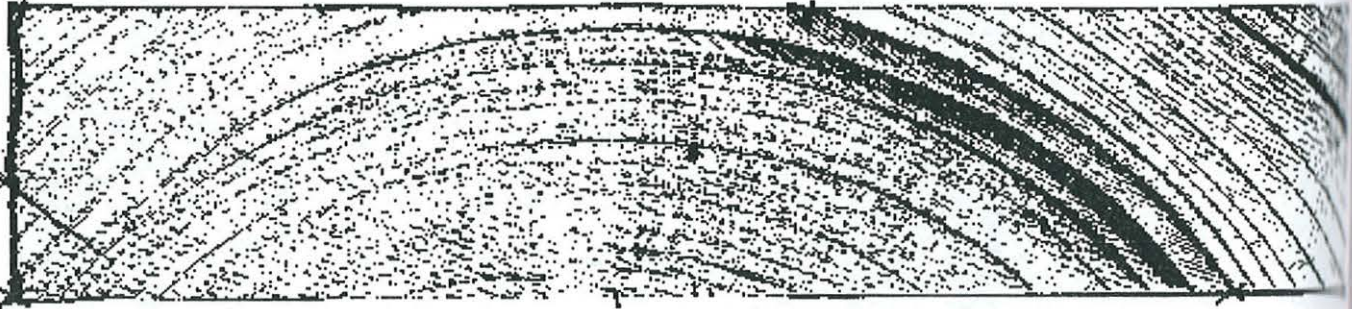
Versuch 8

**Bild A9:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

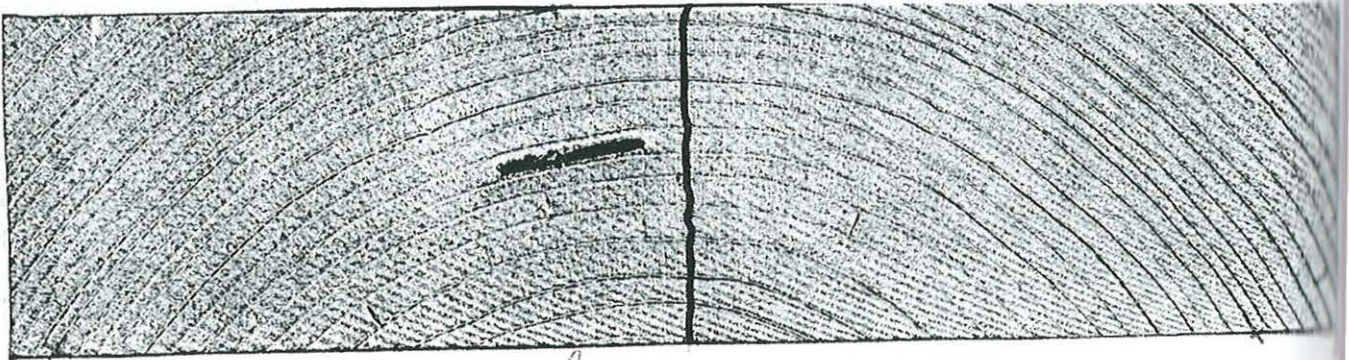




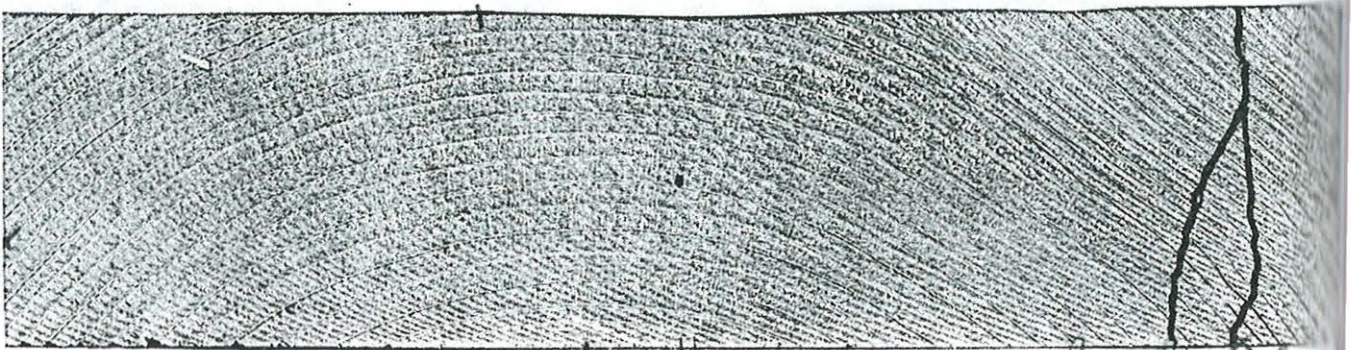
Versuch 9



Versuch 10



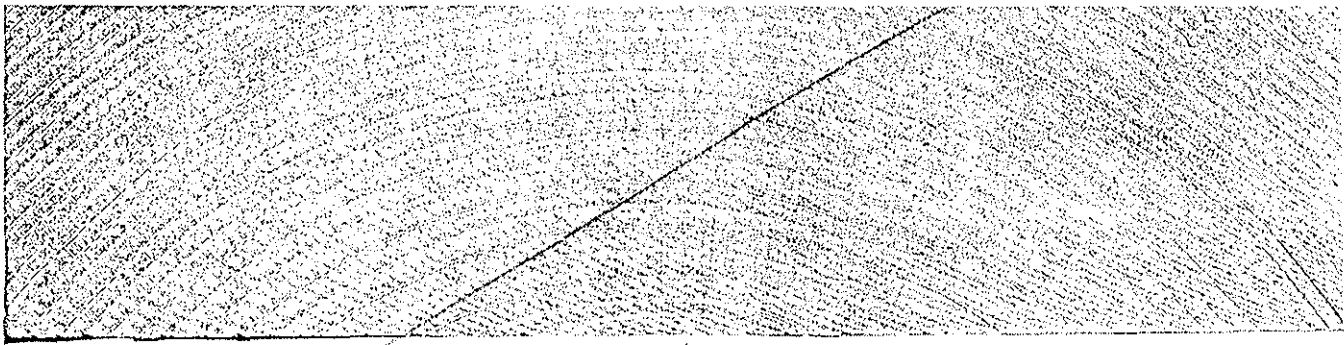
Versuch 11



Versuch 12

**Bild A10:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

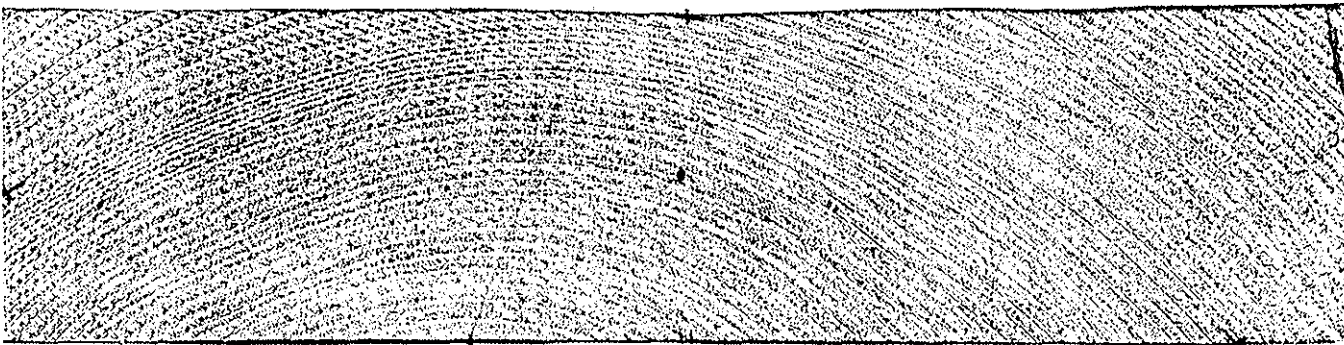




Versuch 13



Versuch 14

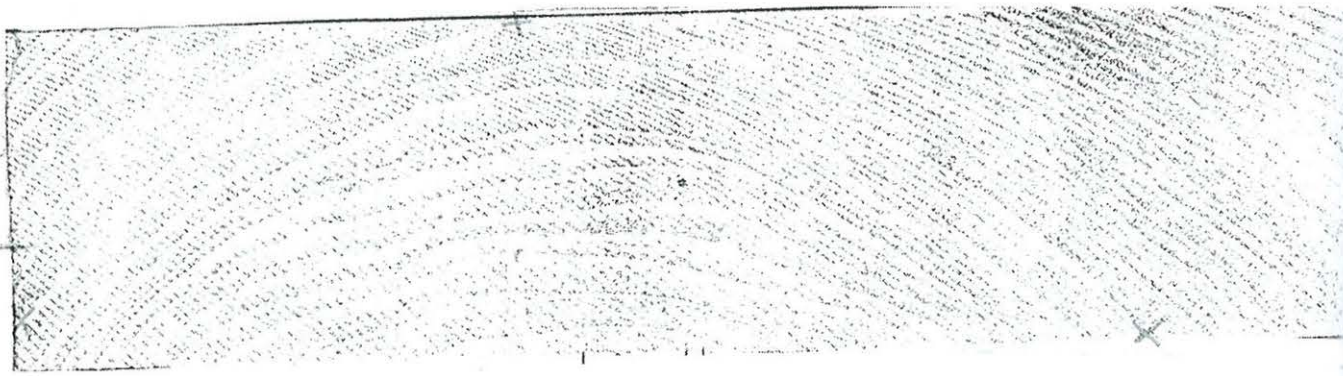


Versuch 15



Versuch 17

**Bild A11:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper



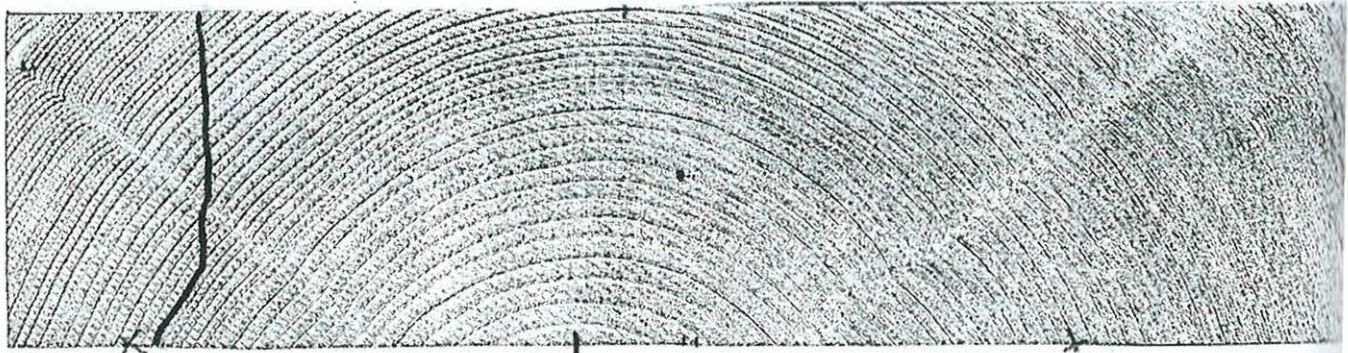
Versuch 18

Bild fehlt

Versuch 19



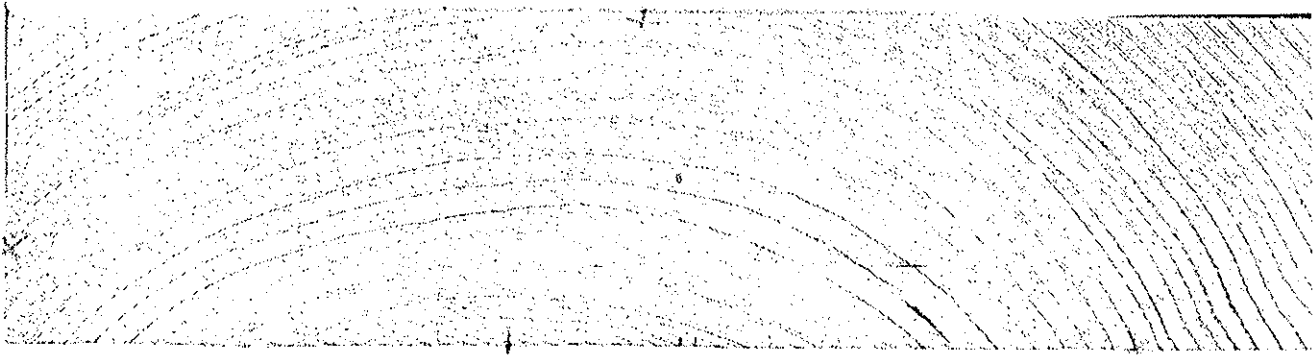
Versuch 20



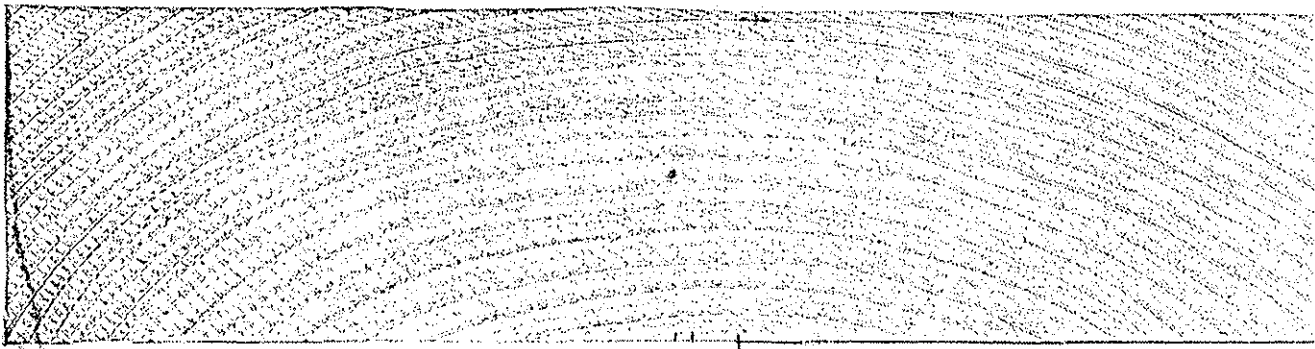
Versuch 21

**Bild A12:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

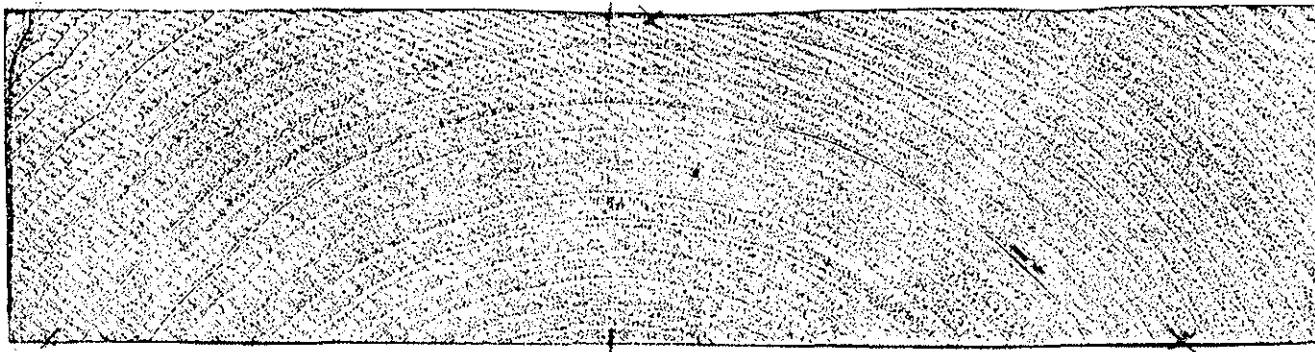




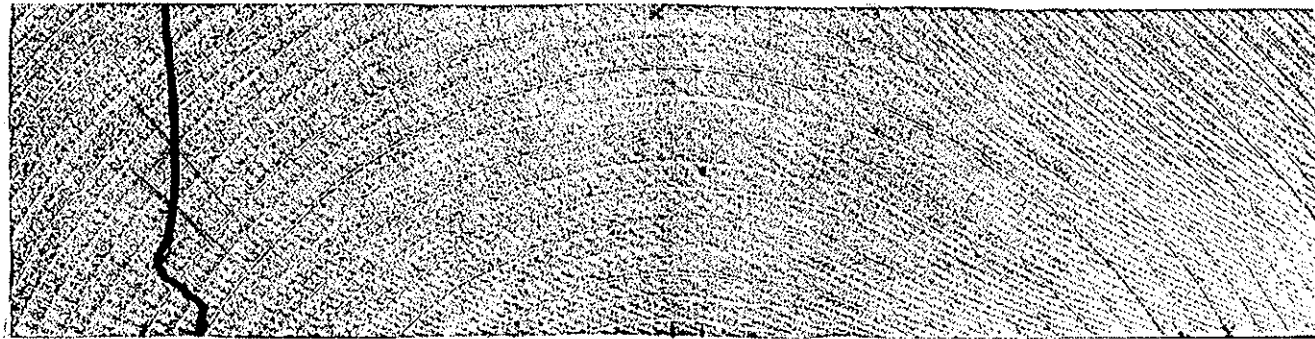
Versuch 22



Versuch 23



Versuch 24



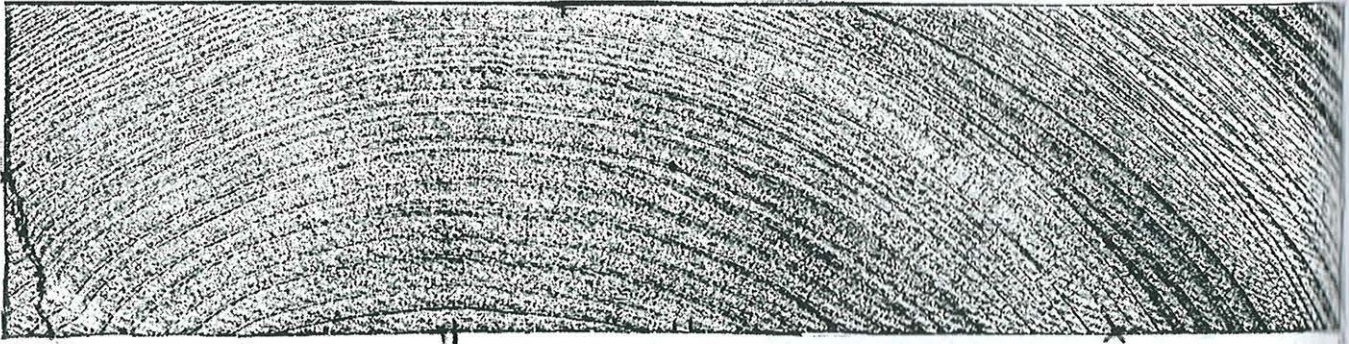
Versuch 25

**Bild A13:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

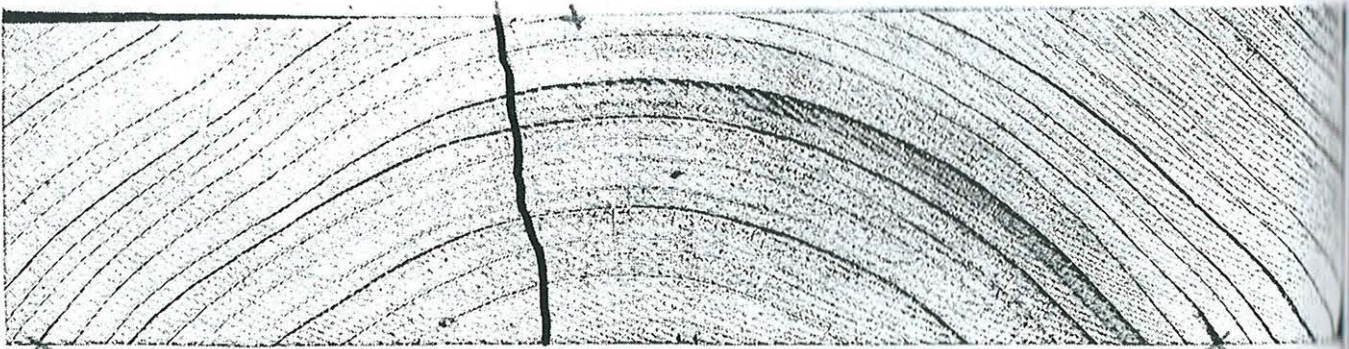




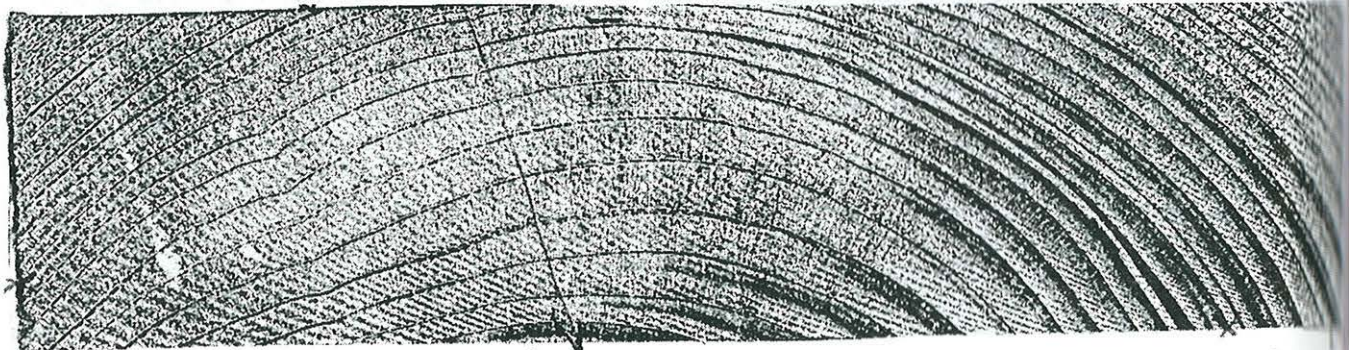
Versuch 26



Versuch 27



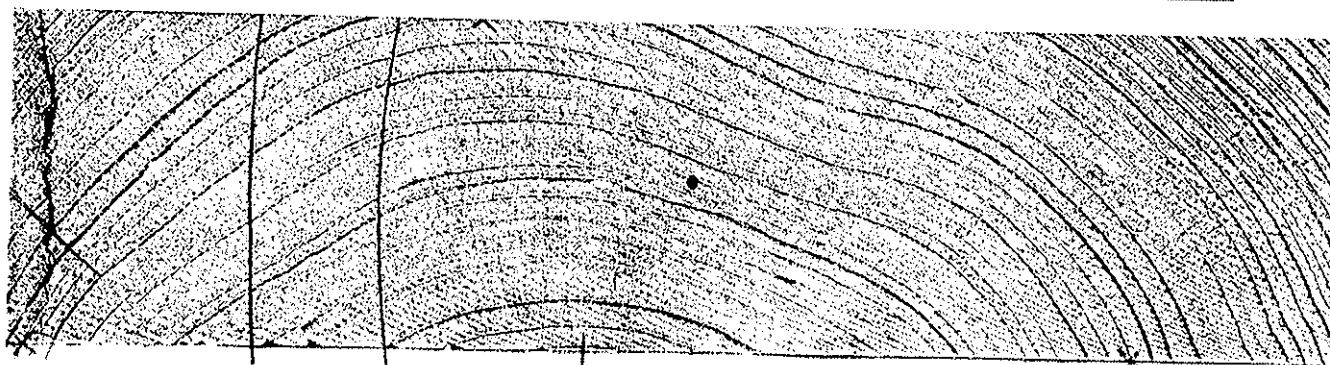
Versuch 28



Versuch 29

**Bild A14:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper





Versuch 30

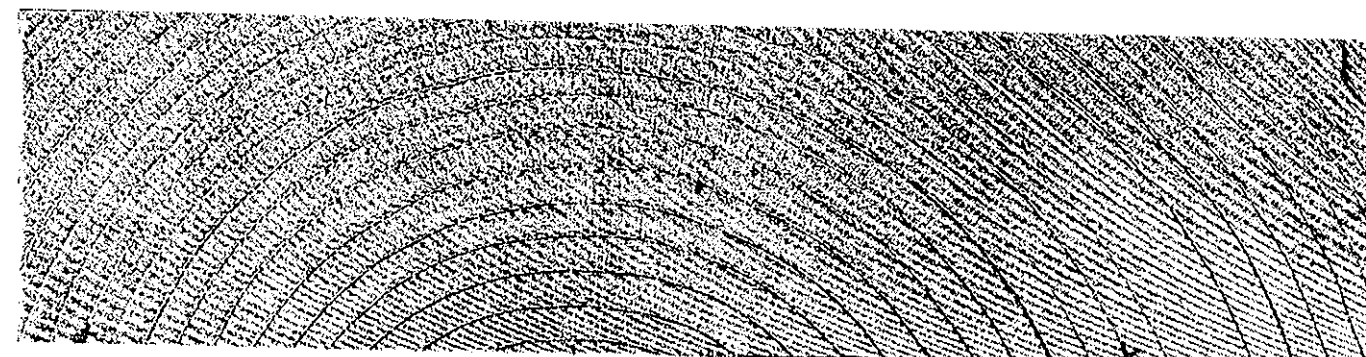


Versuch 31



Versuch 32

$F = 633 \text{ kN}$



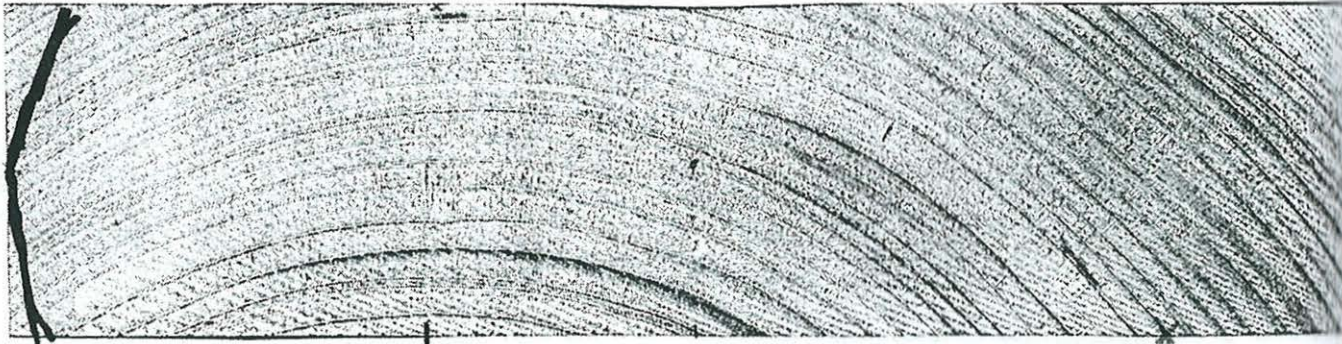
Versuch 33

**Bild A15:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

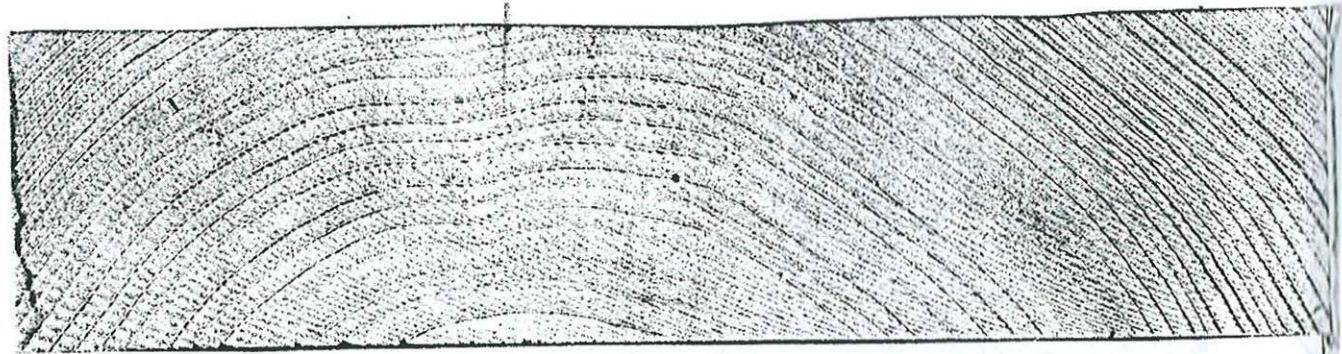




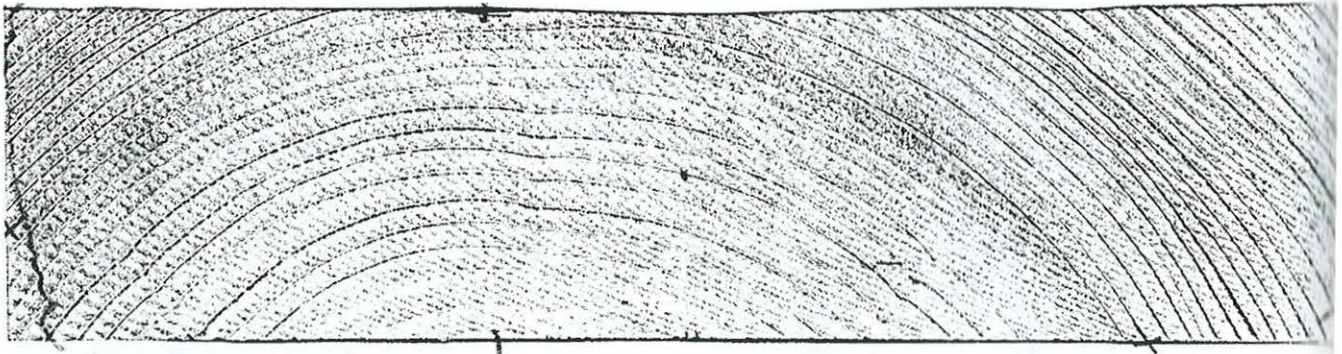
Versuch 34



Versuch 35



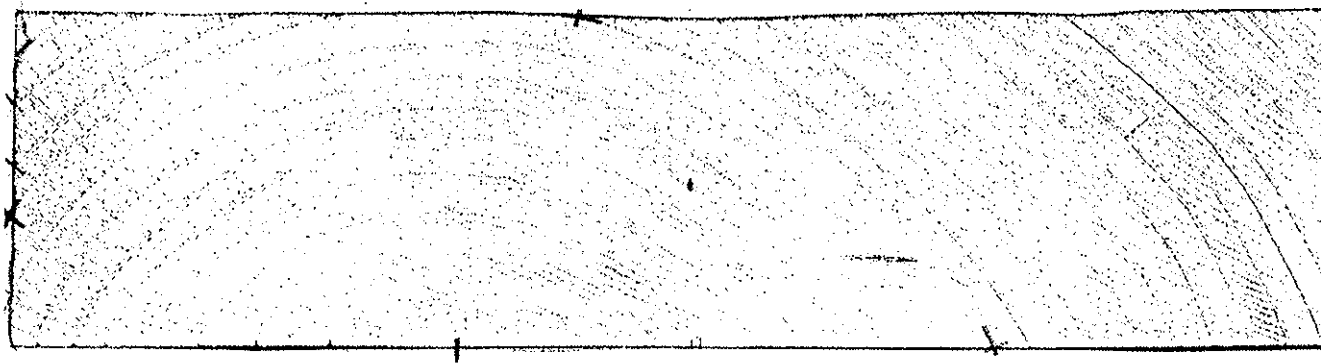
Versuch 36



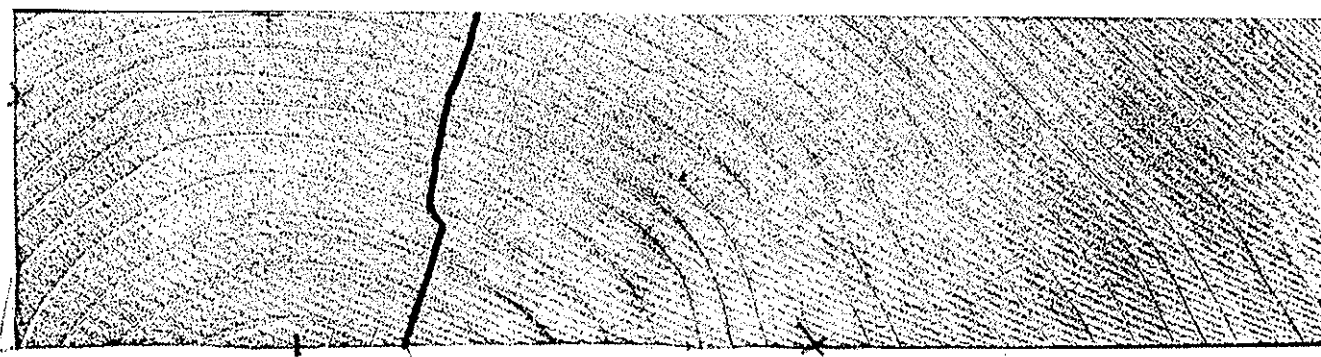
Versuch 37

**Bild A16:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

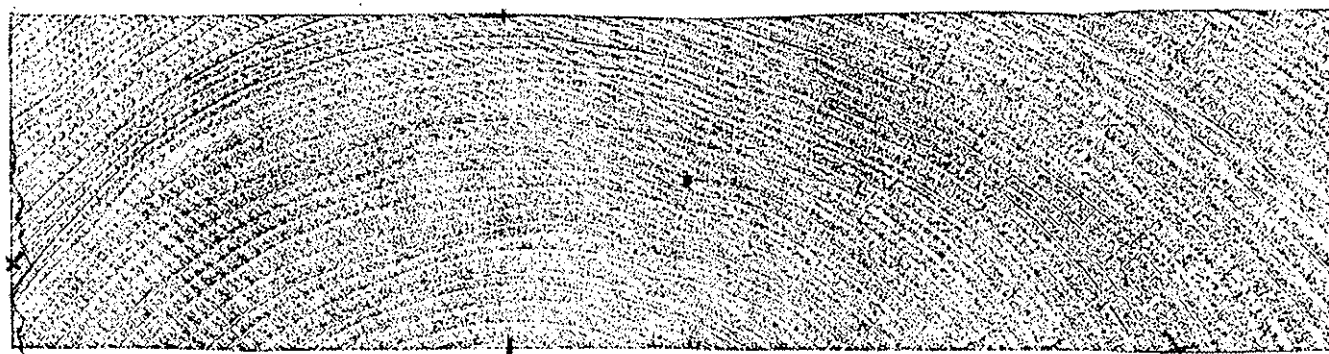




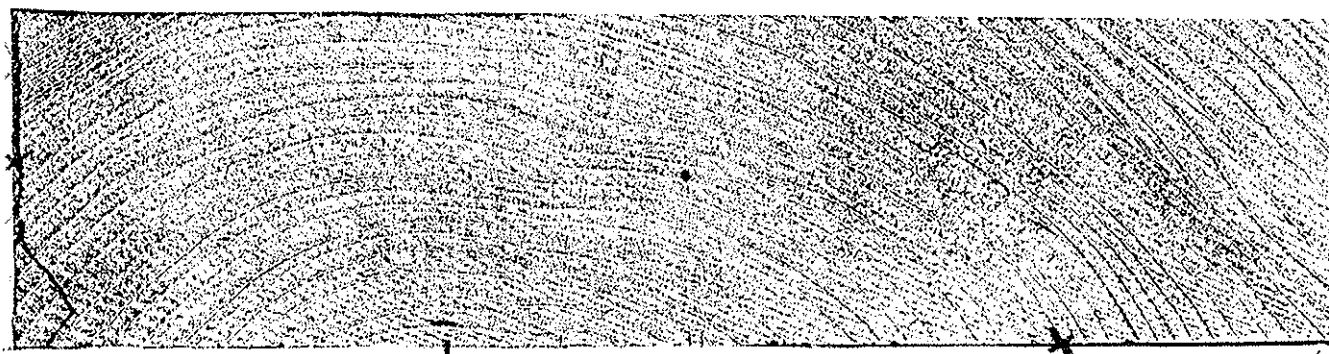
Versuch 38



Versuch 39



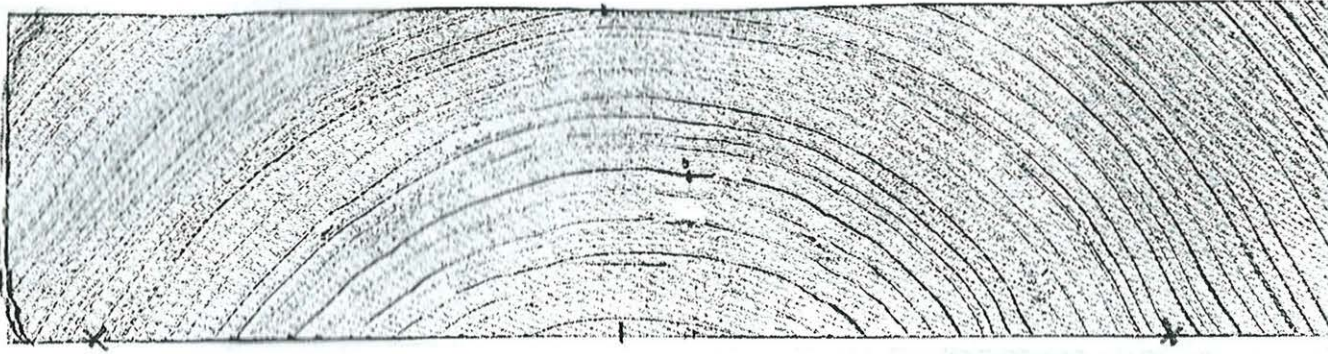
Versuch 40



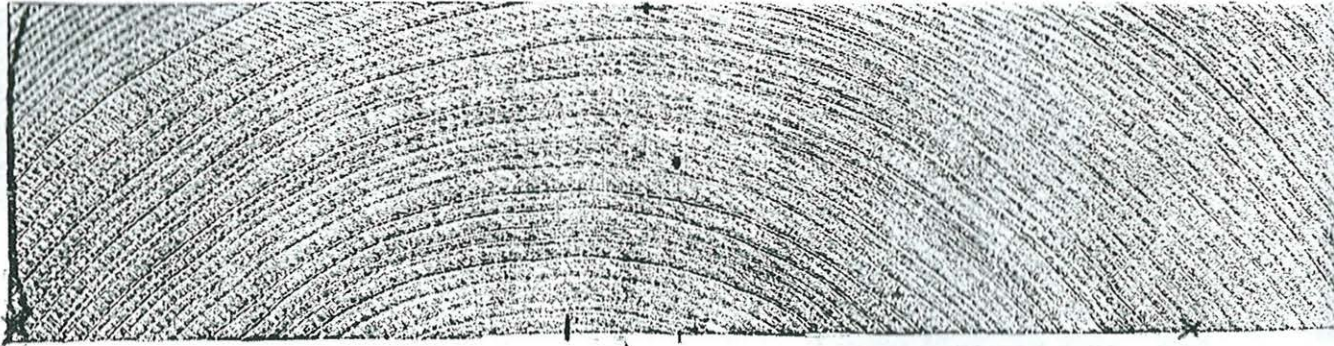
Versuch 41

**Bild A16:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

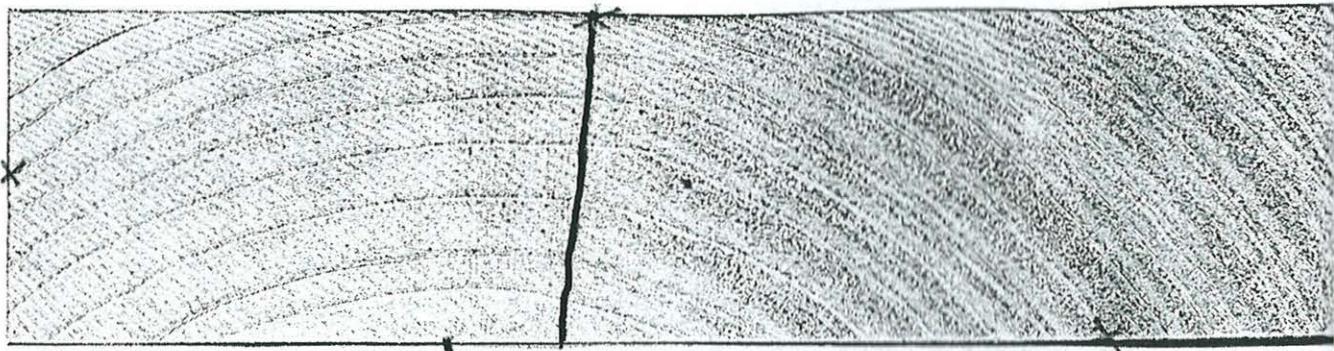




Versuch 42



Versuch 43



Versuch 44



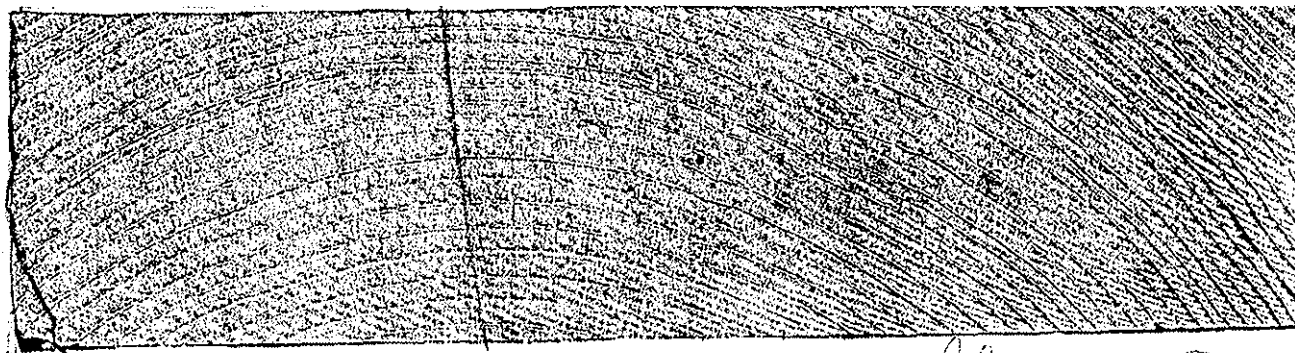
Versuch 45

**Bild A17:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

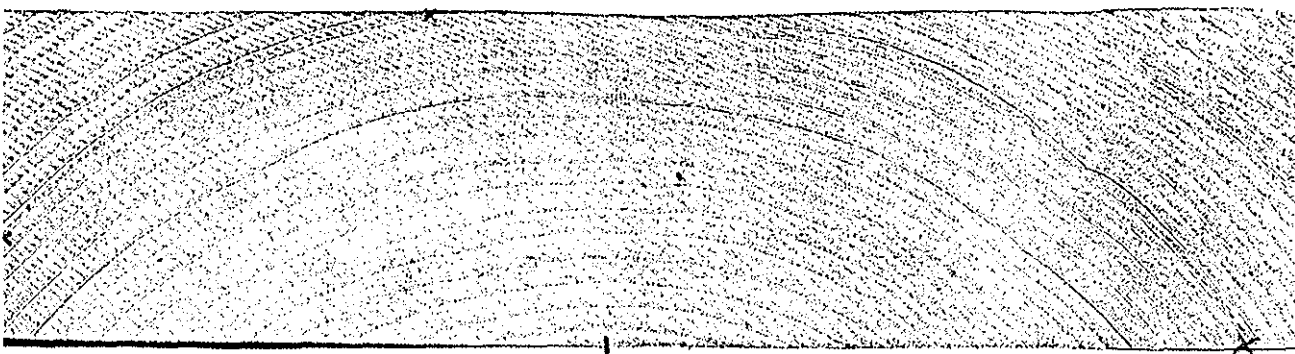




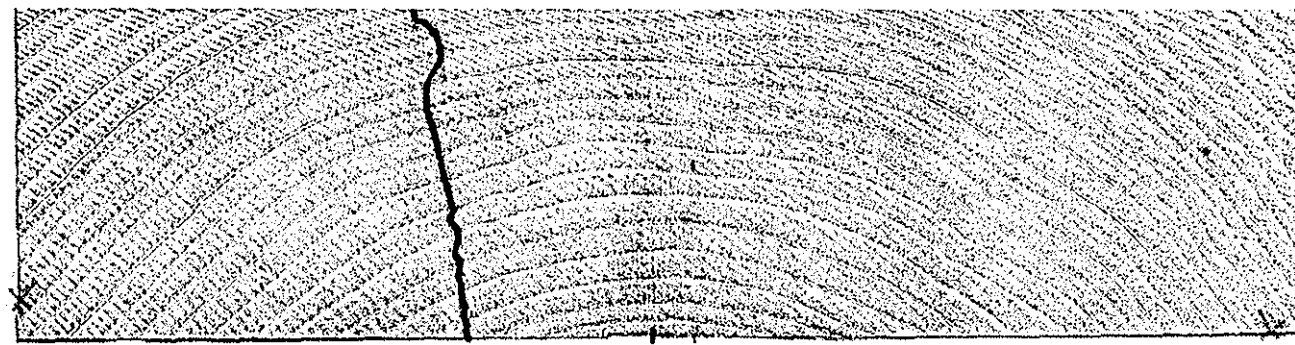
Versuch 46



Versuch 47



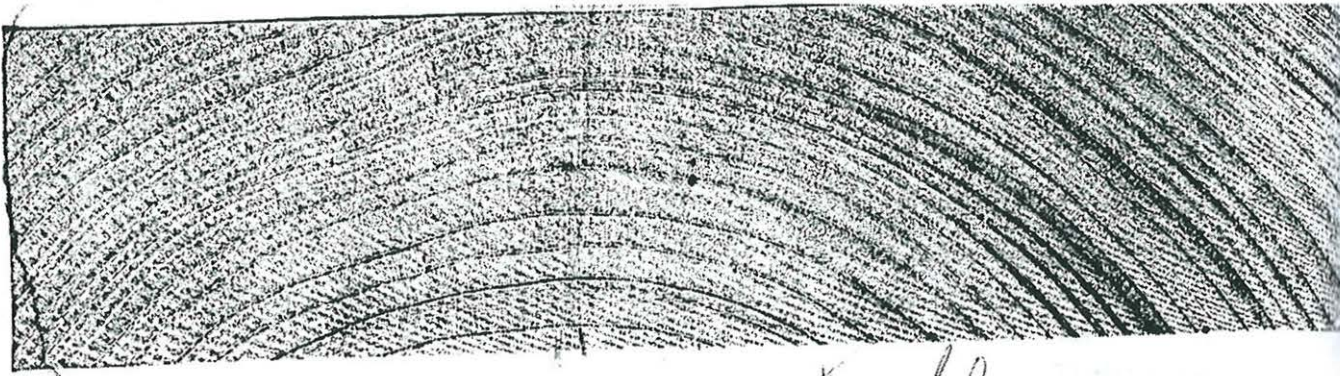
Versuch 48



Versuch 49

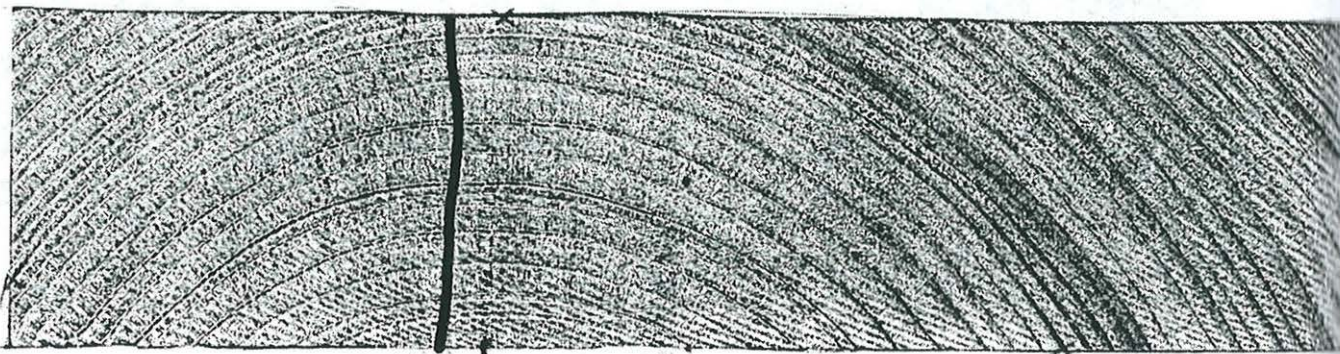
**Bild A18:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper



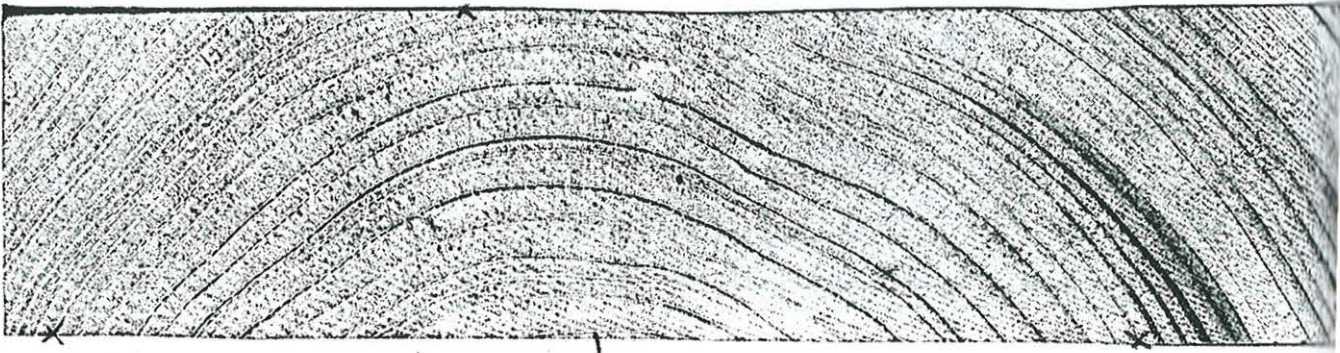


*X 1000*

Versuch 50



Versuch 51



Versuch 52



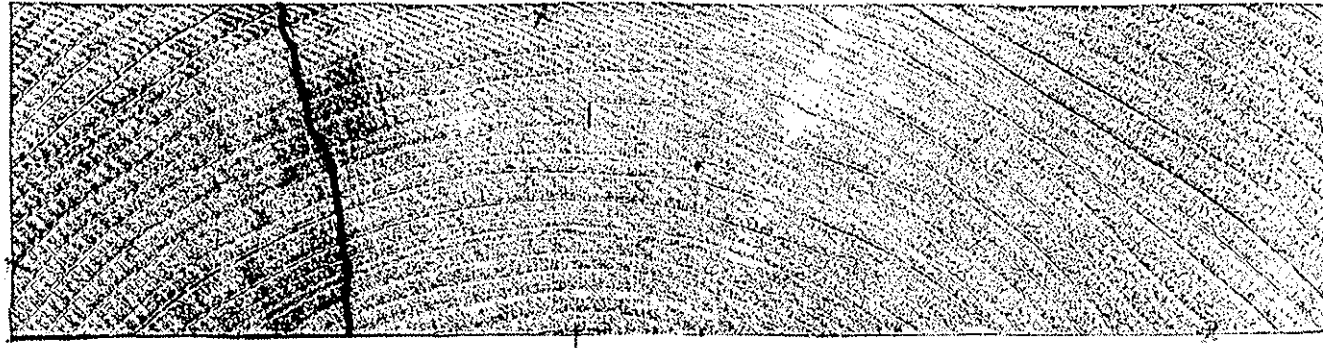
Versuch 53

**Bild A19:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

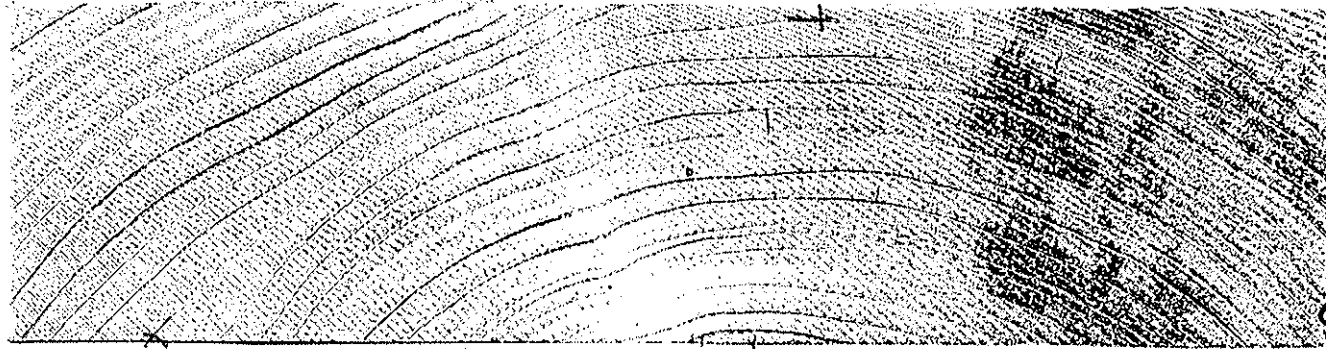




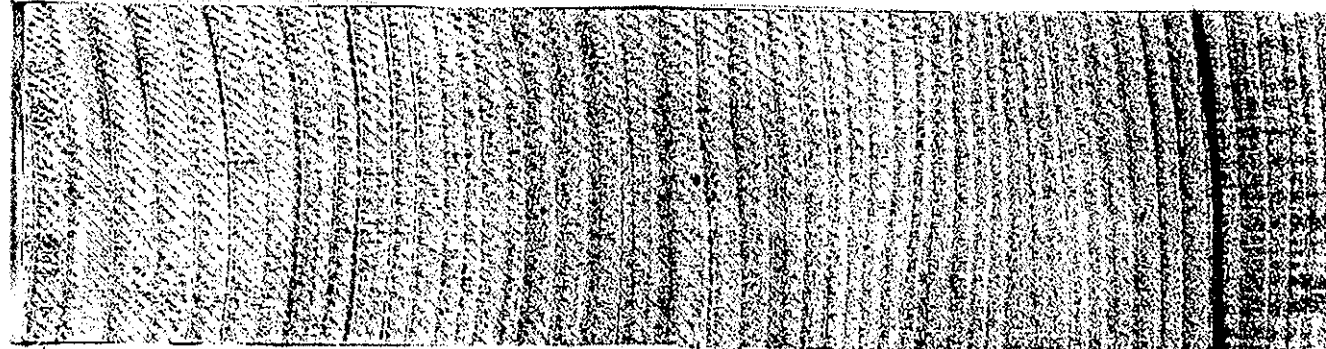
Versuch 54



Versuch 55



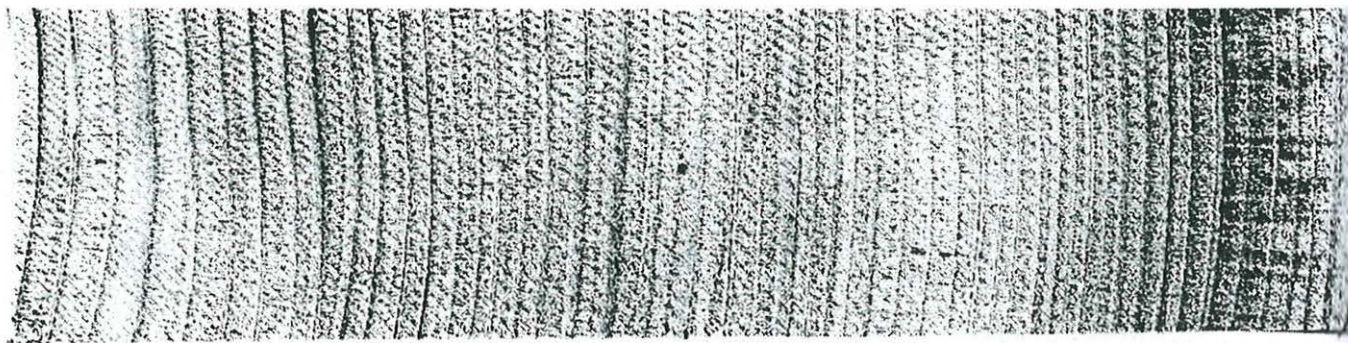
Versuch 56



Versuch 57

**Bild A20:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

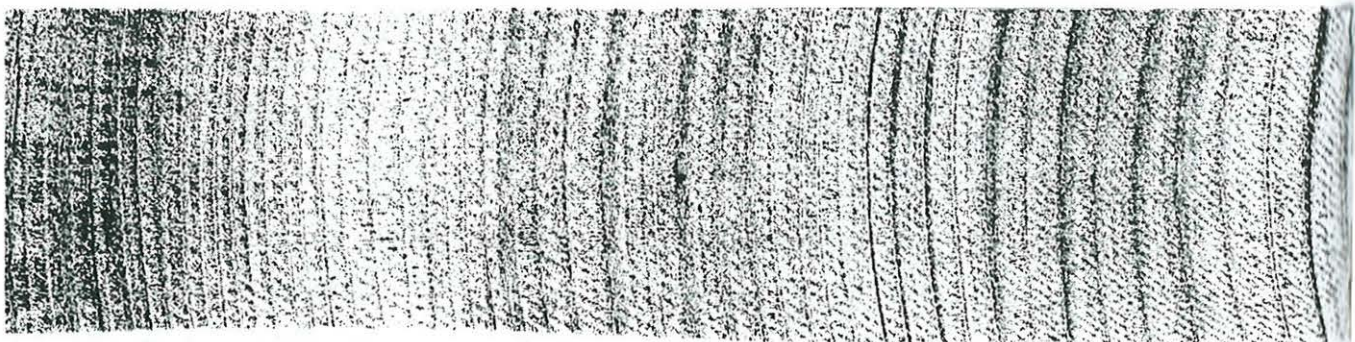




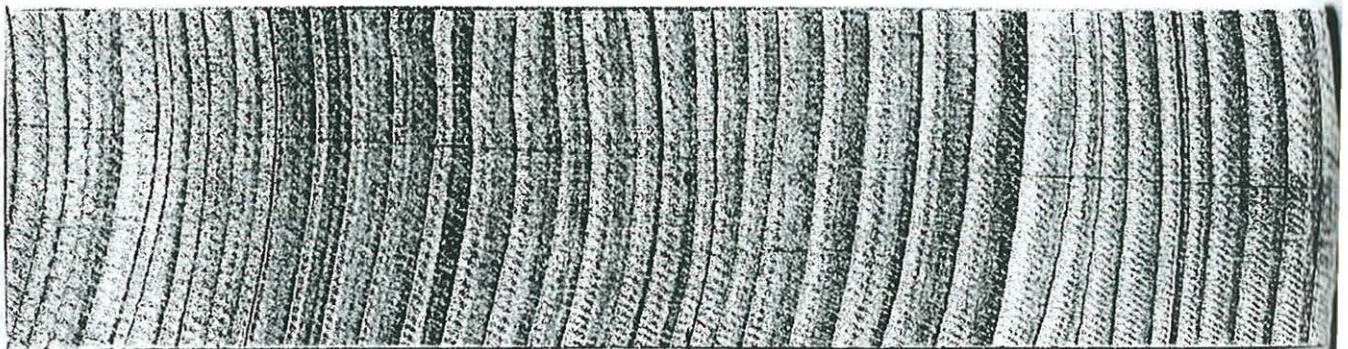
Versuch 58



Versuch 59



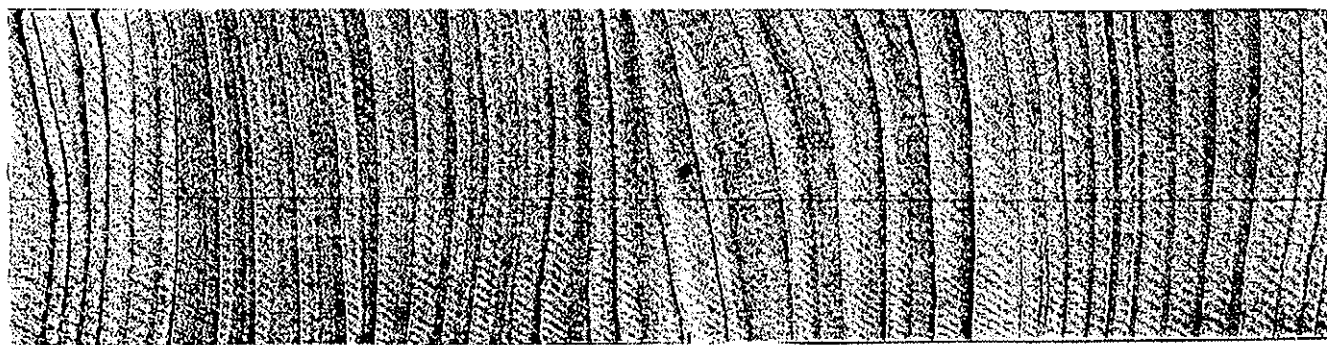
Versuch 60



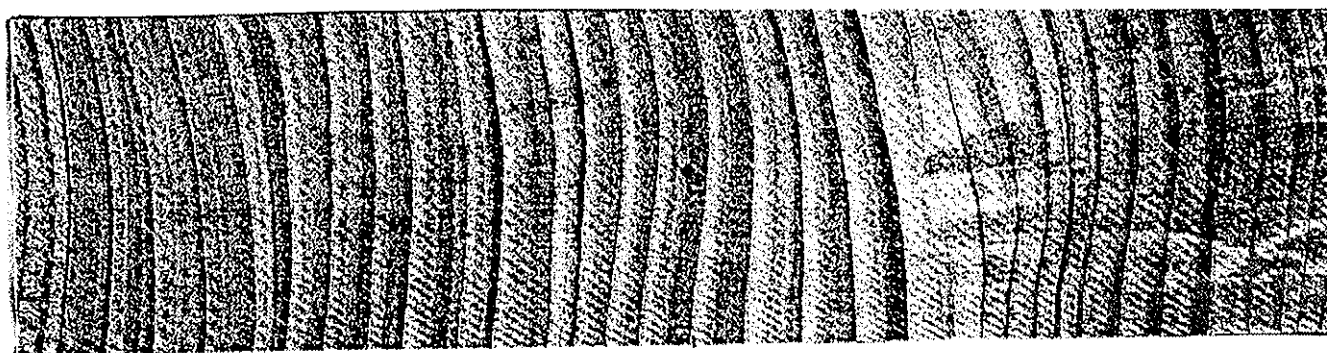
Versuch 61

**Bild A21:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper





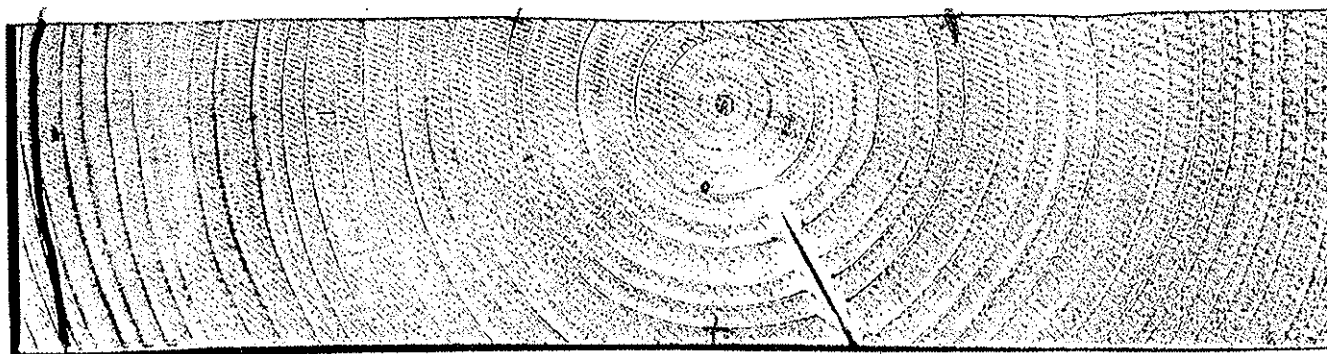
Versuch 62



Versuch 63



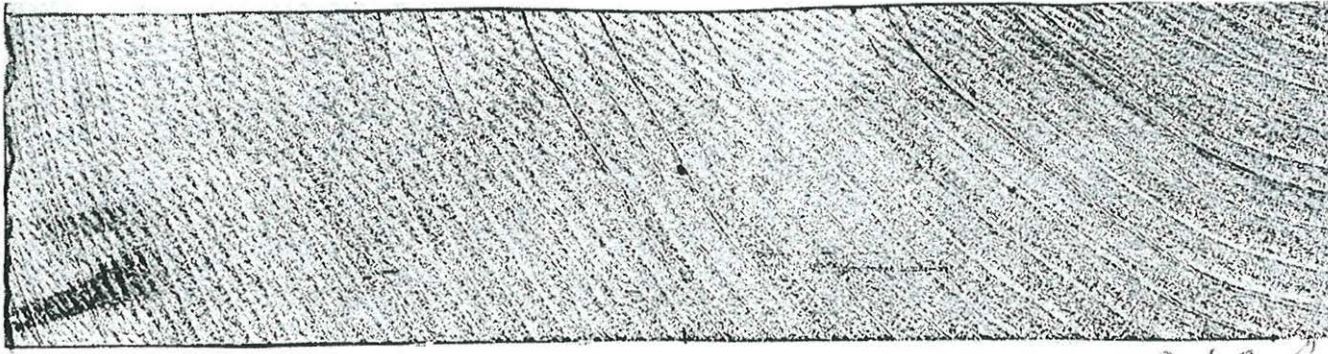
Versuch 64



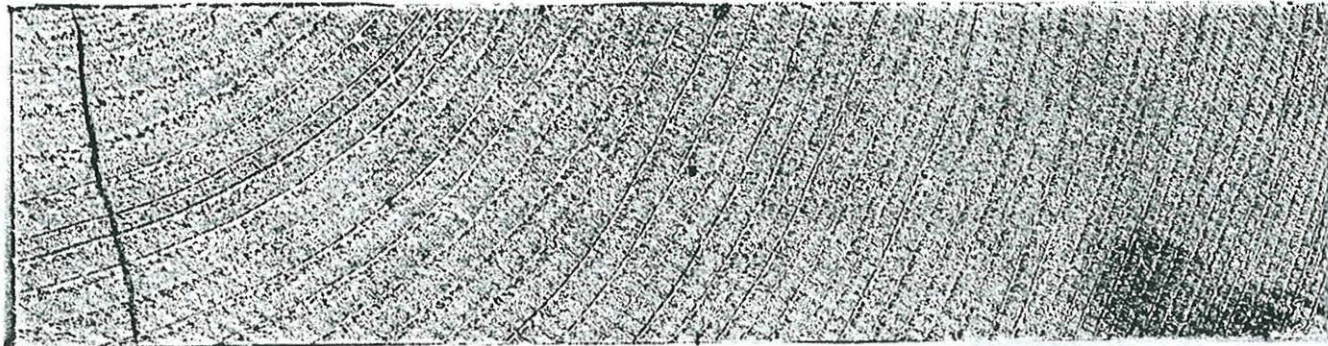
Versuch 65

**Bild A22:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper





Versuch 66



Versuch 67



Versuch 68



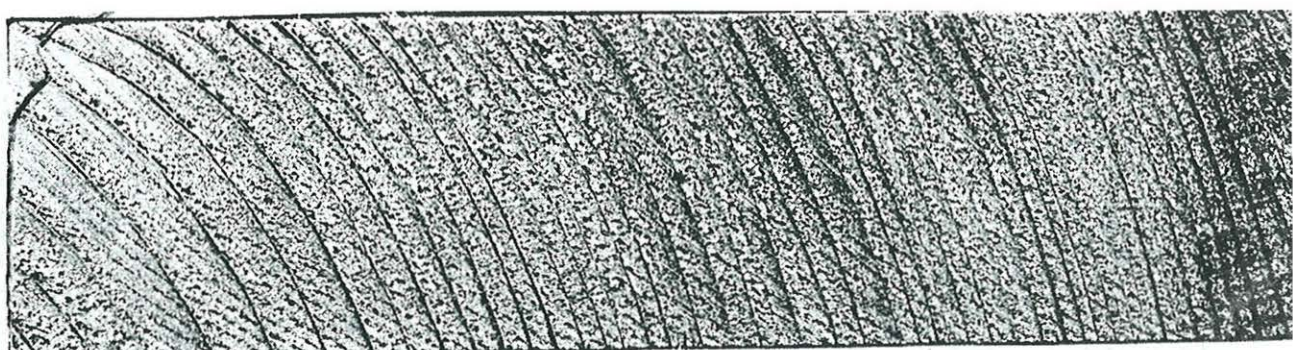
Versuch 69

**Bild A23:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper





Versuch 70



Versuch 71



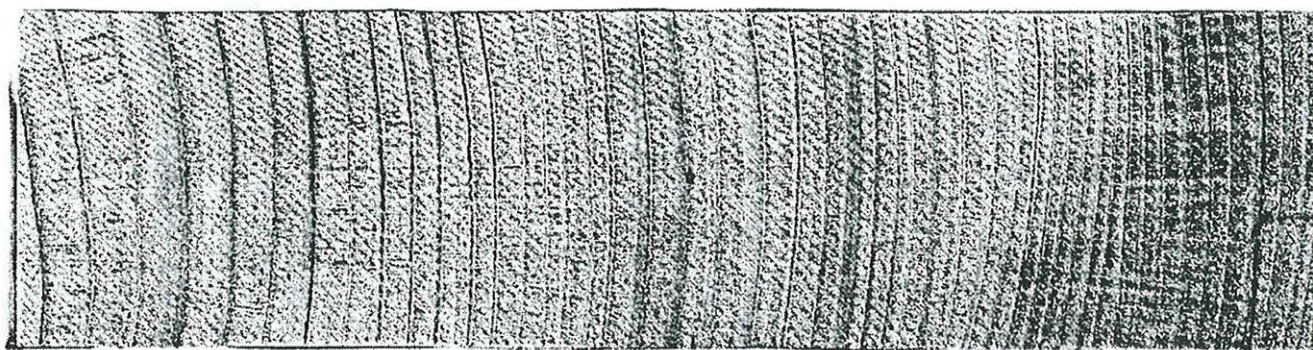
Versuch 72



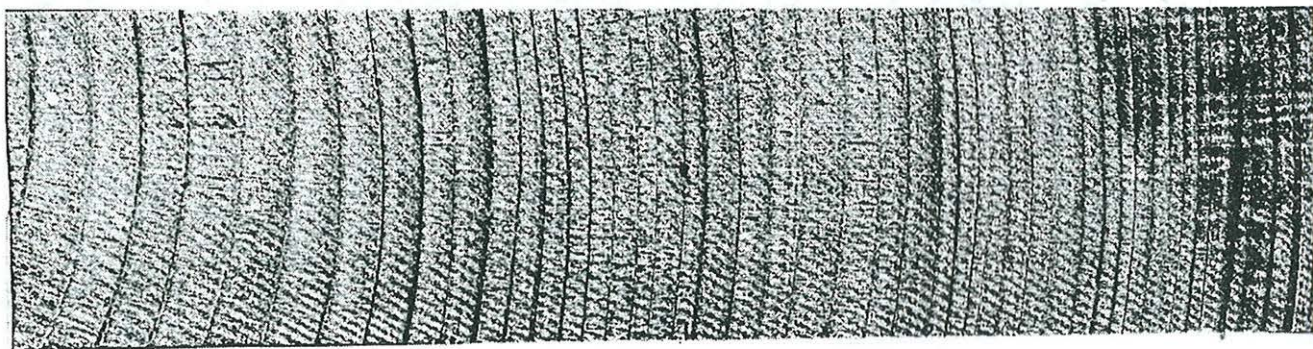
Versuch 73

**Bild A24:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

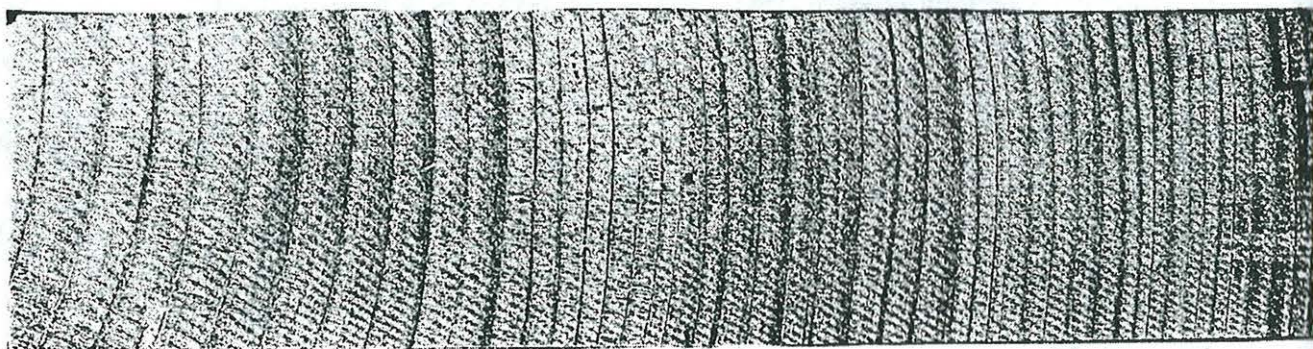




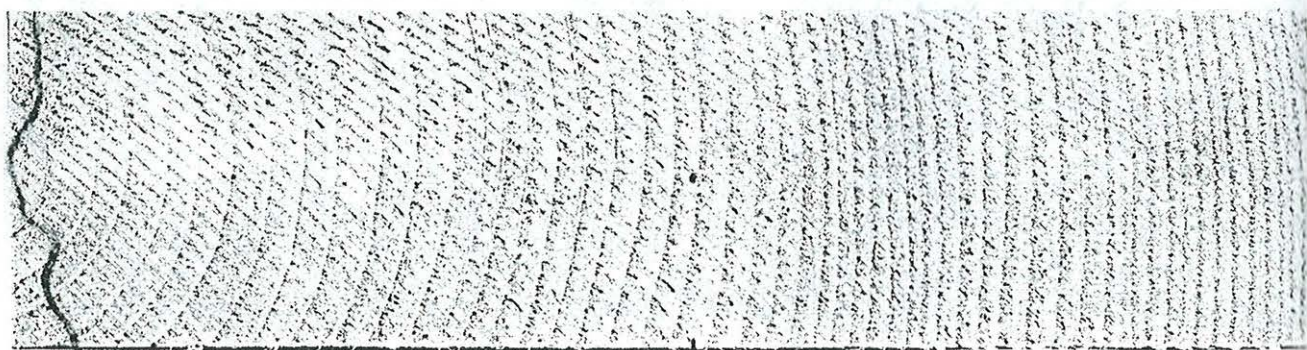
Versuch 74



Versuch 75



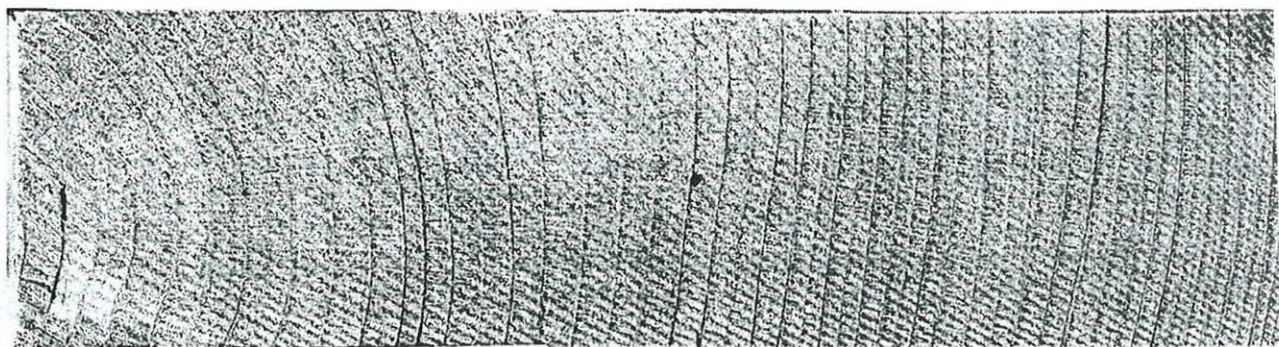
Versuch 76



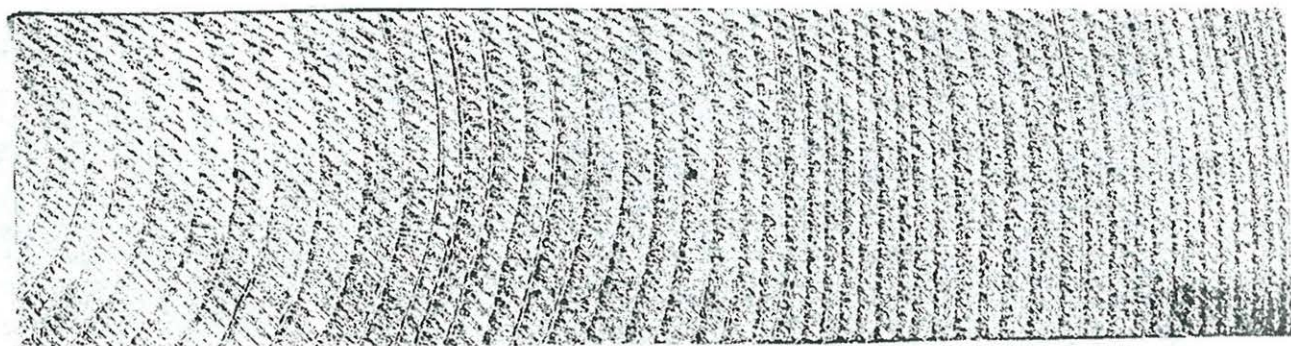
Versuch 77

**Bild A25:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper





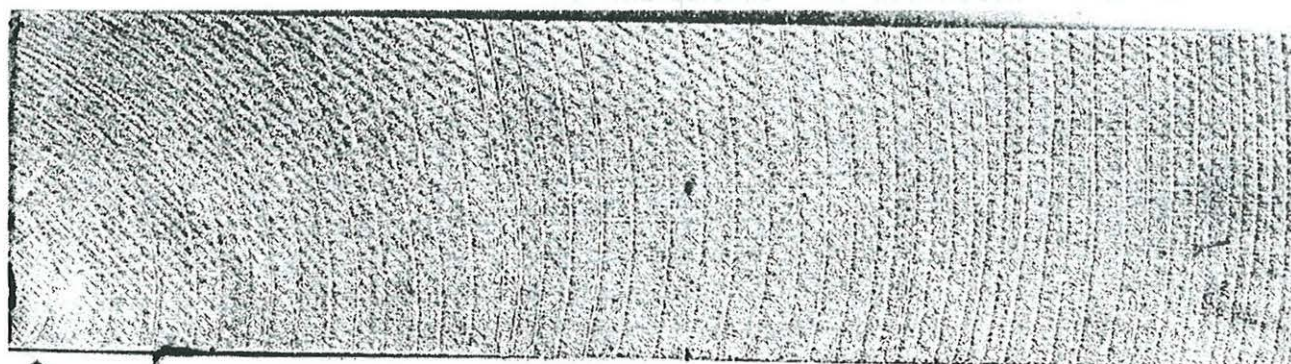
Versuch 78



Versuch 79



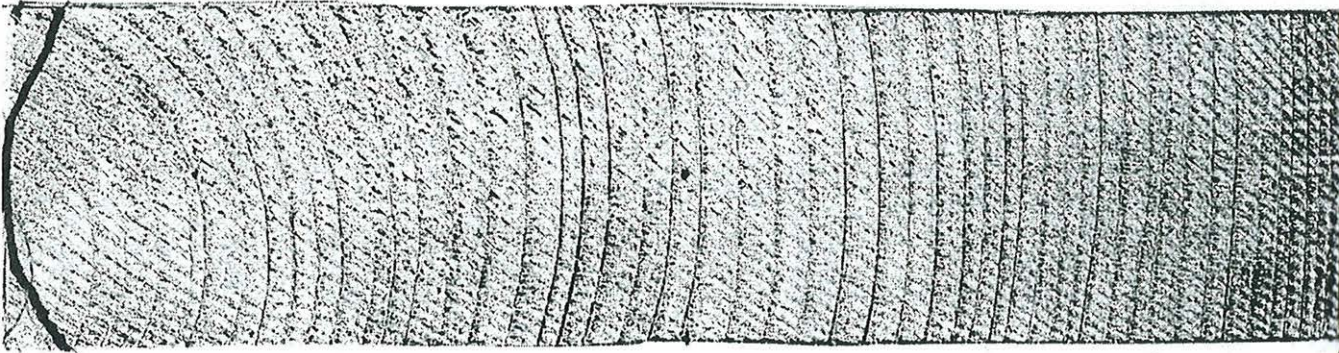
Versuch 80



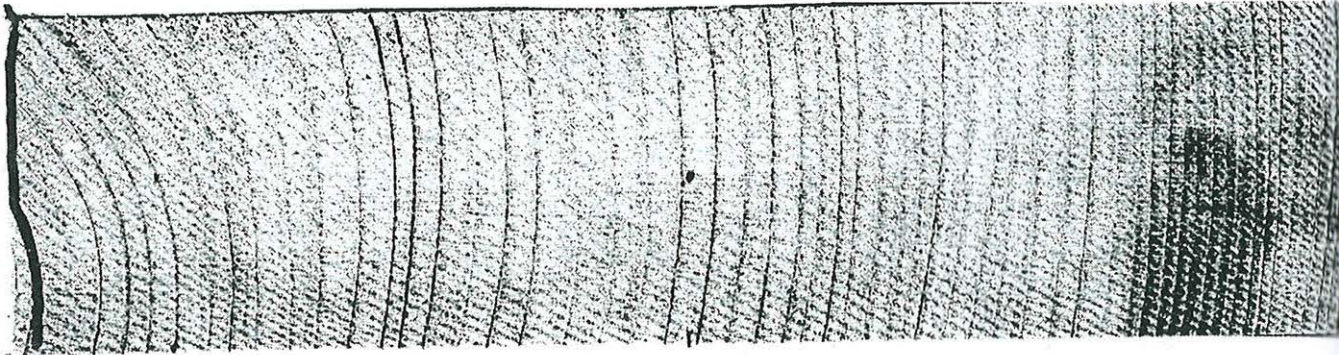
Versuch 81

**Bild A26:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper





Versuch 82



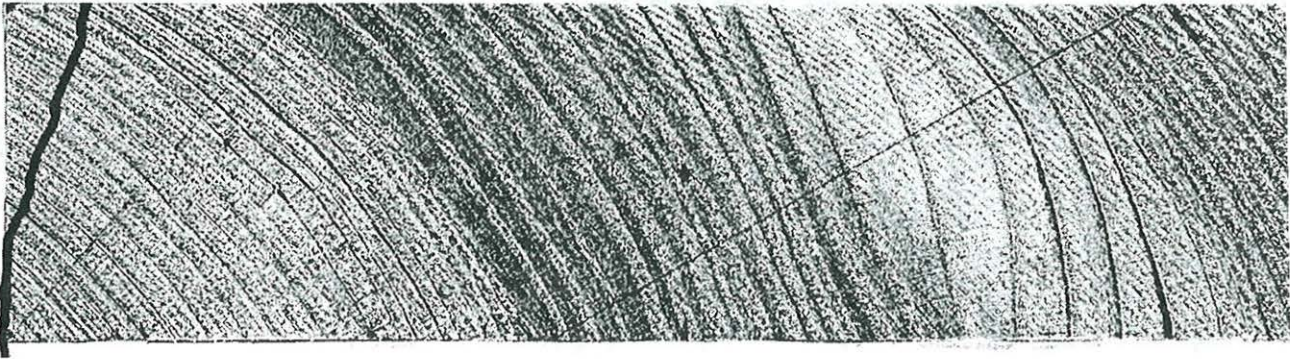
Versuch 83



Versuch 84

**Bild A27:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

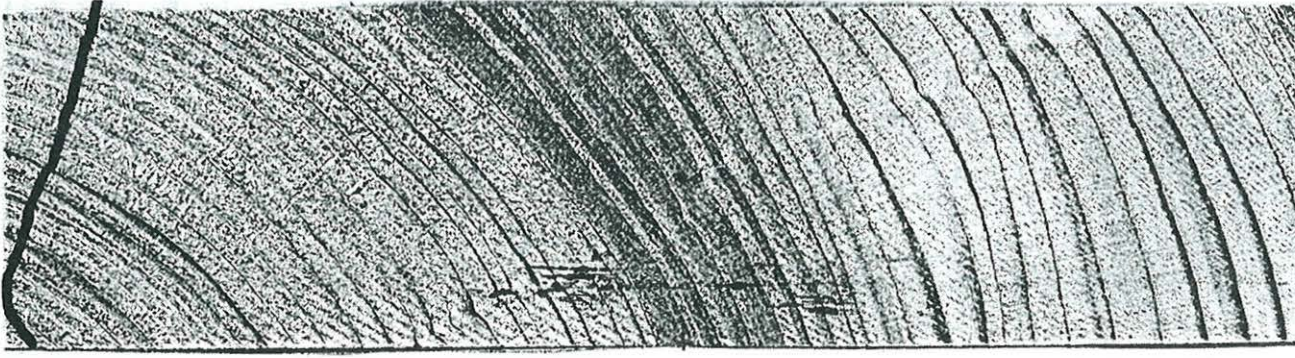




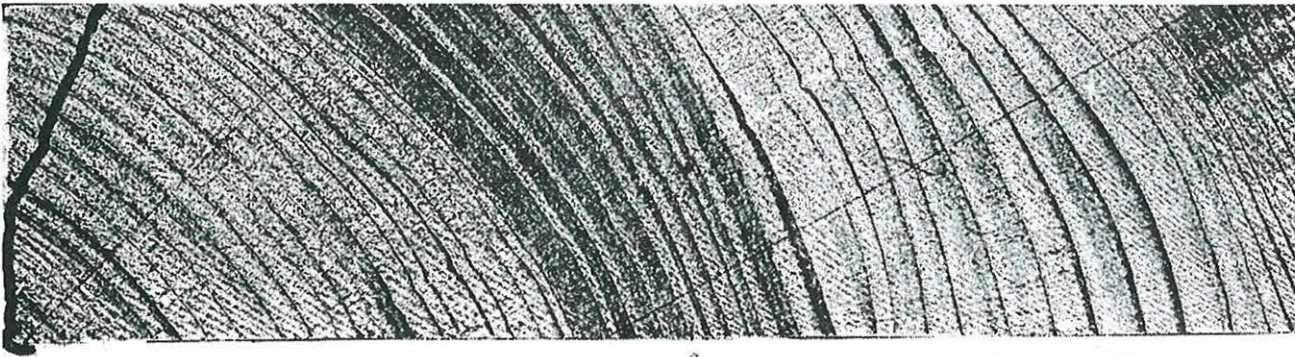
Versuch 85



Versuch 86



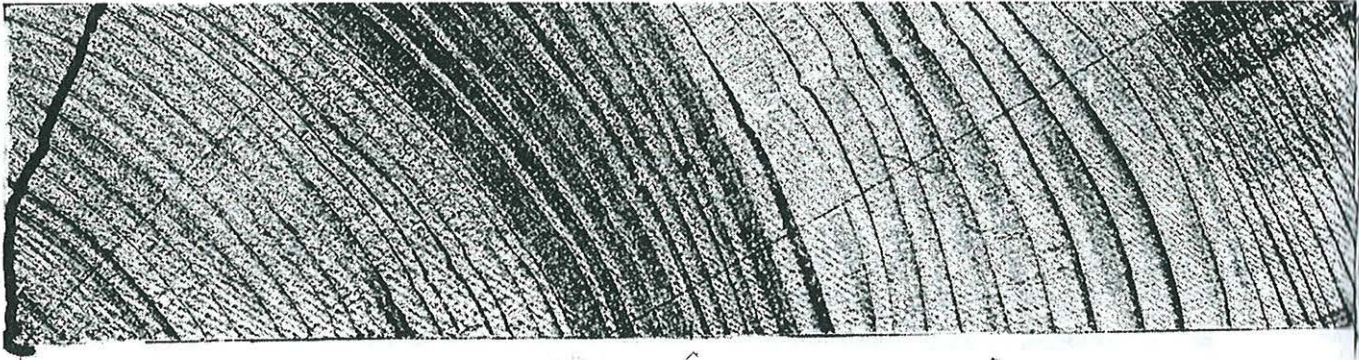
Versuch 87



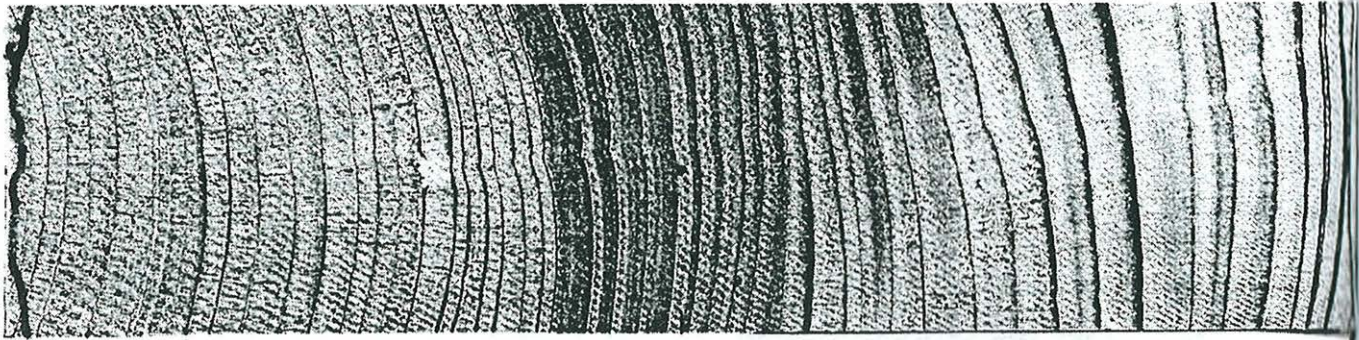
Versuch 88

**Bild A28:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

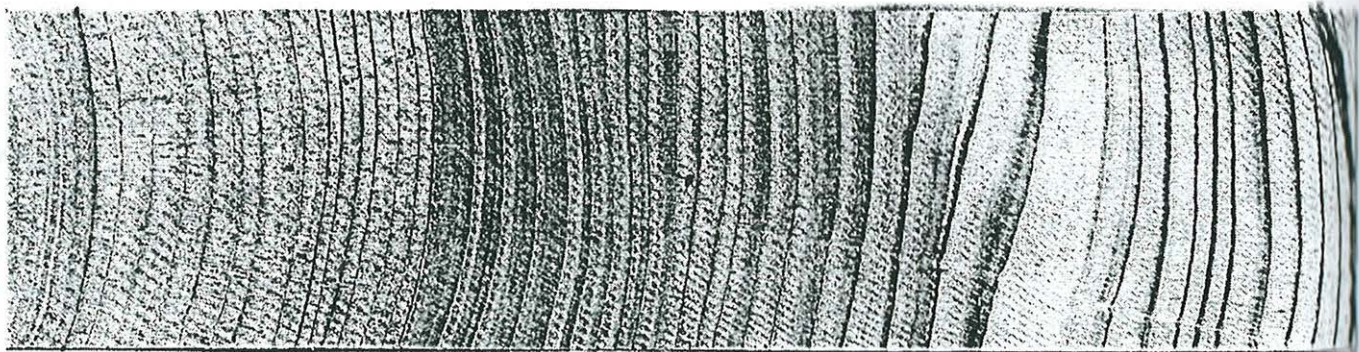




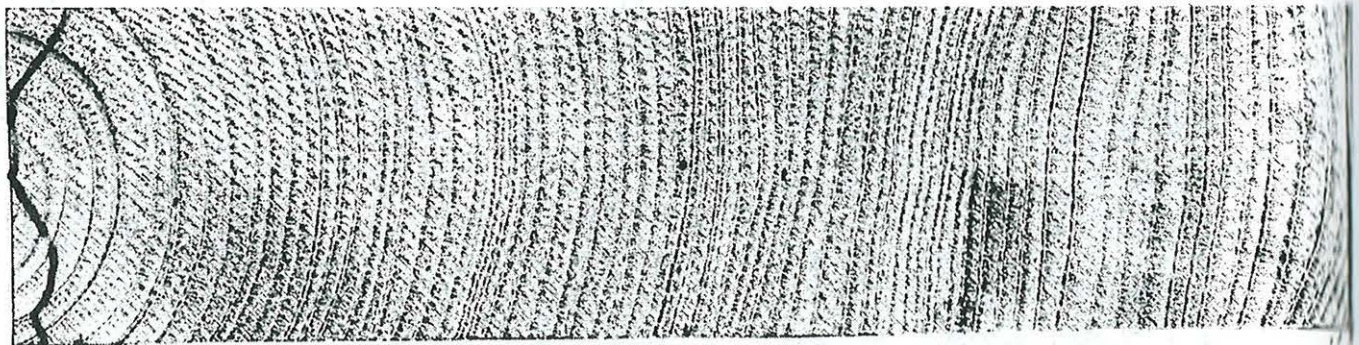
Versuch 89



Versuch 90



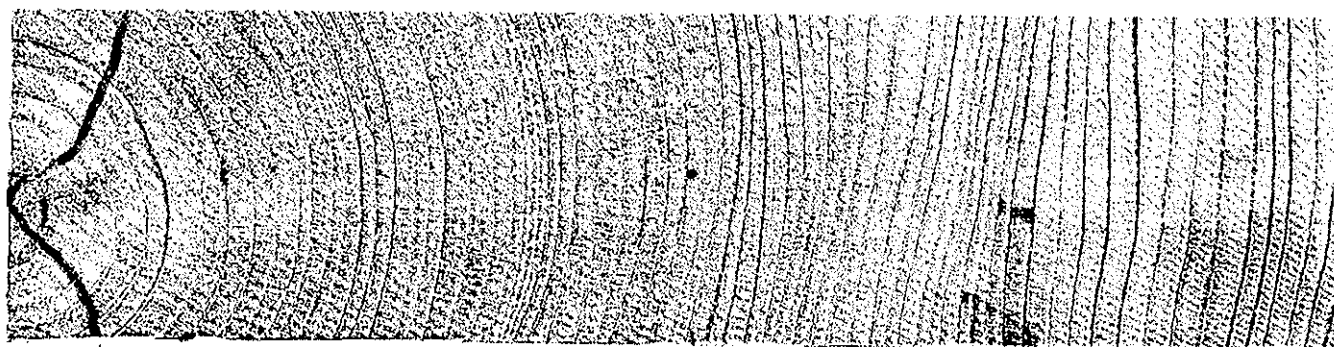
Versuch 91



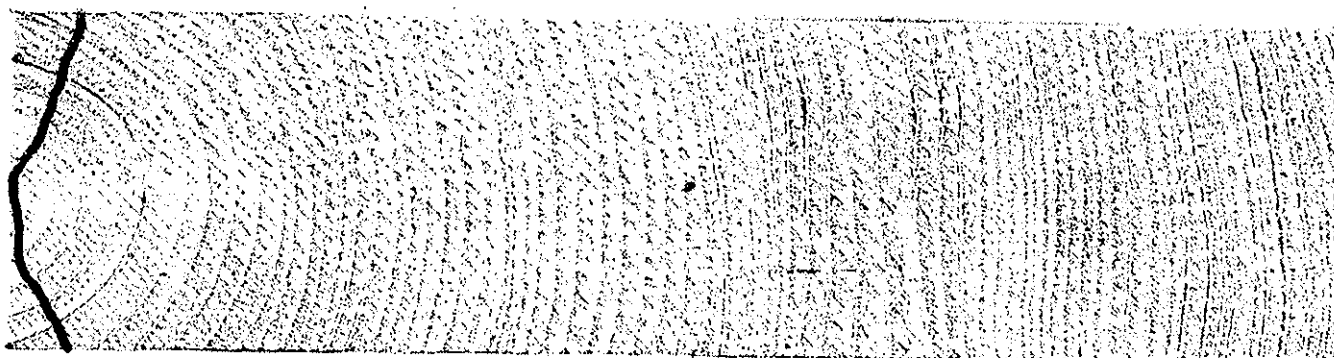
Versuch 92

**Bild A29:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

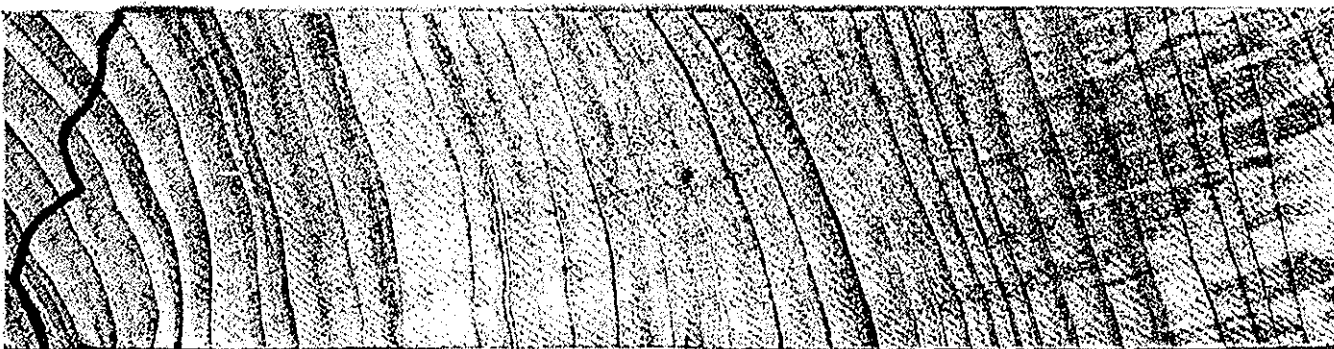




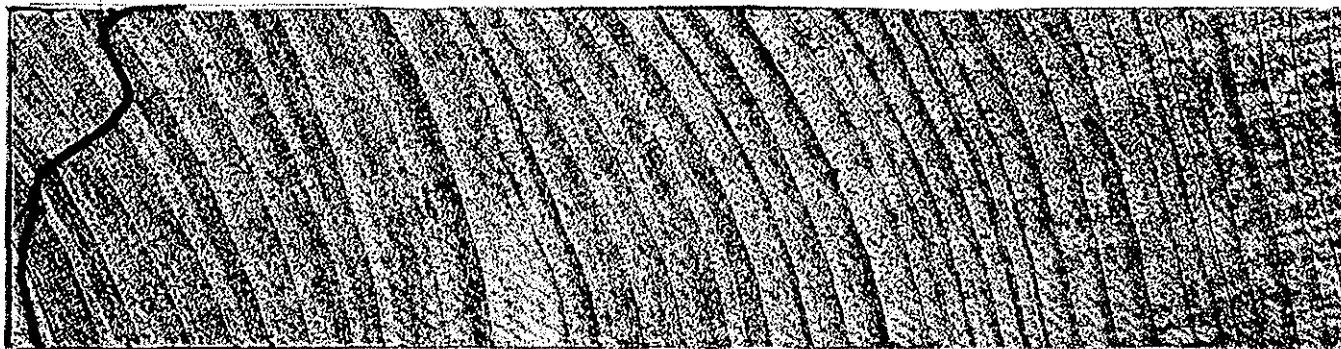
Versuch 93



Versuch 94



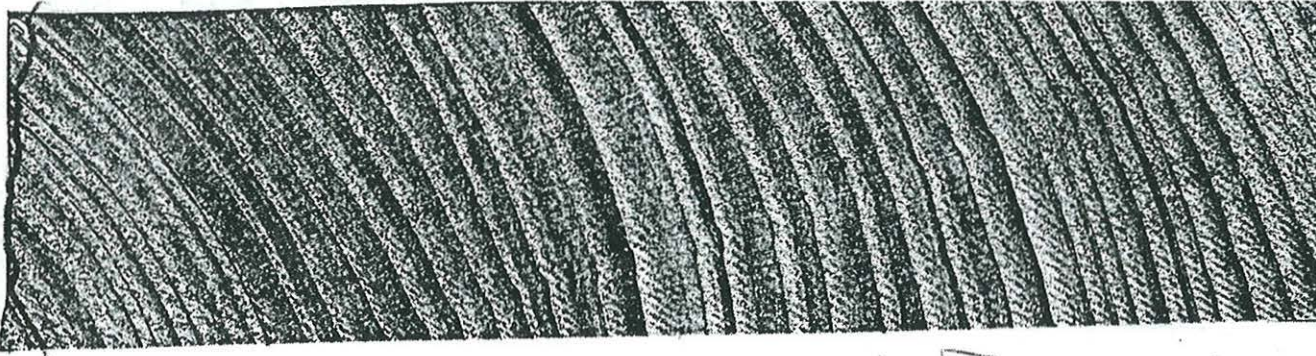
Versuch 95



Versuch 96

**Bild A30:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper





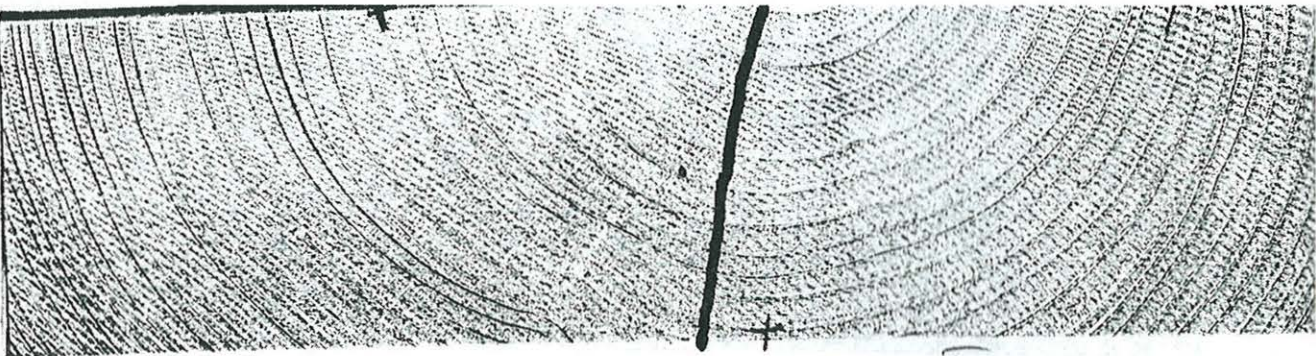
Versuch 97



Versuch 98



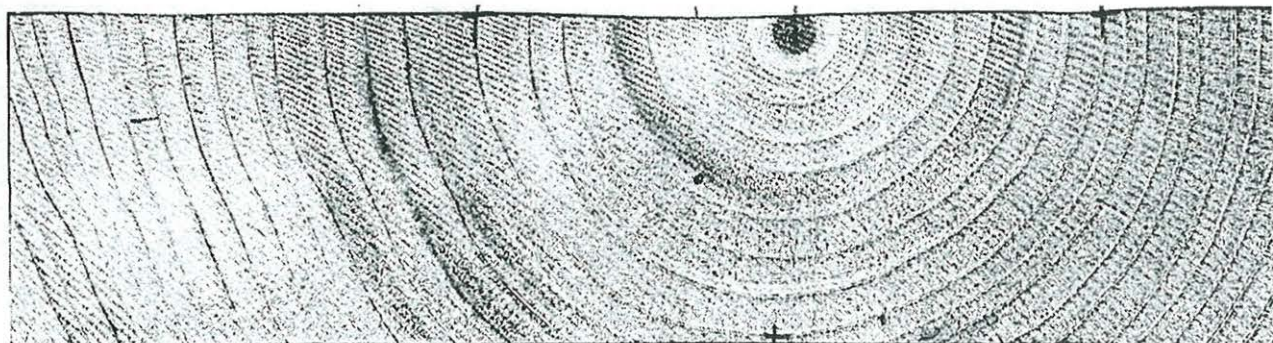
Versuch 99



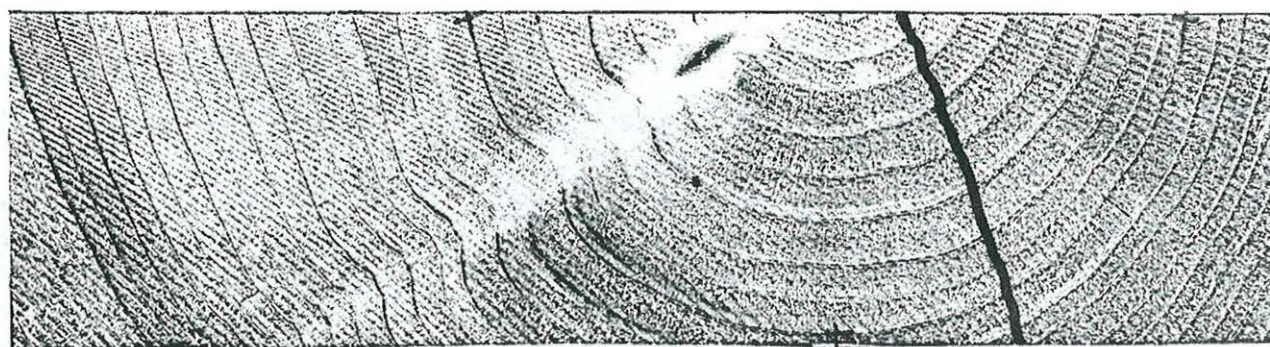
Versuch 100

**Bild A31:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

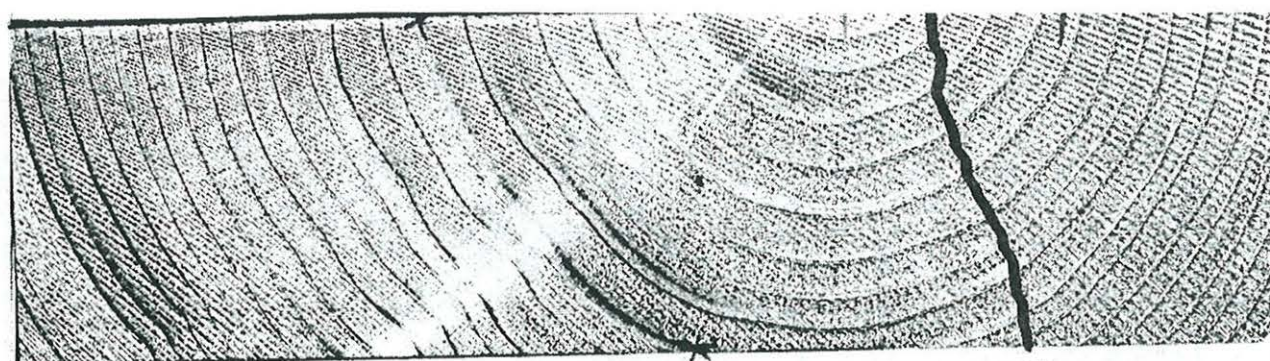




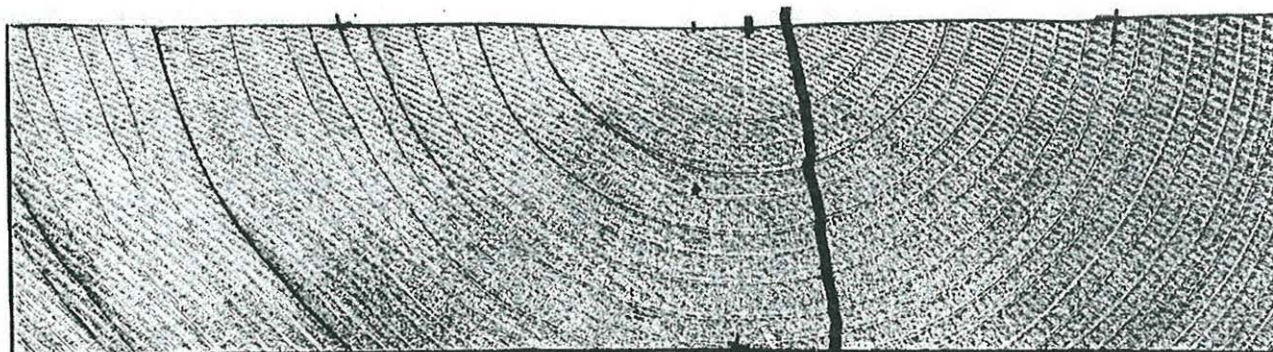
Versuch 101



Versuch 102



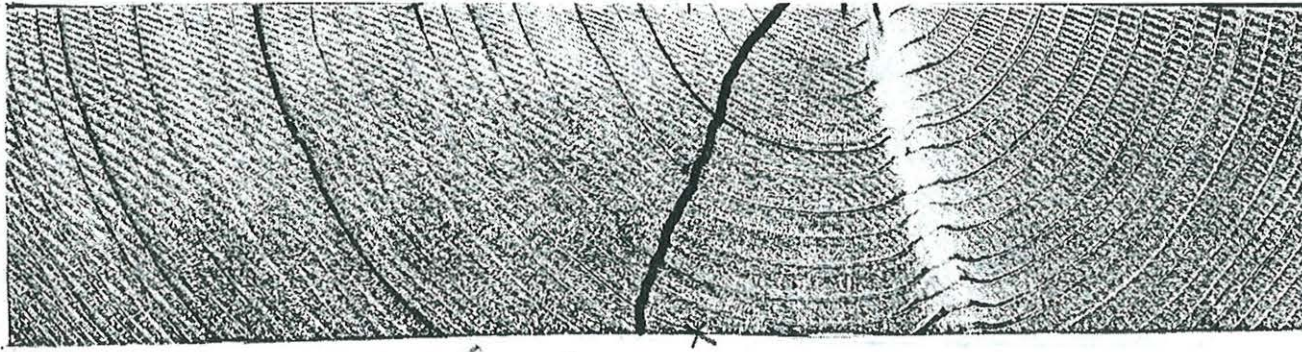
Versuch 103



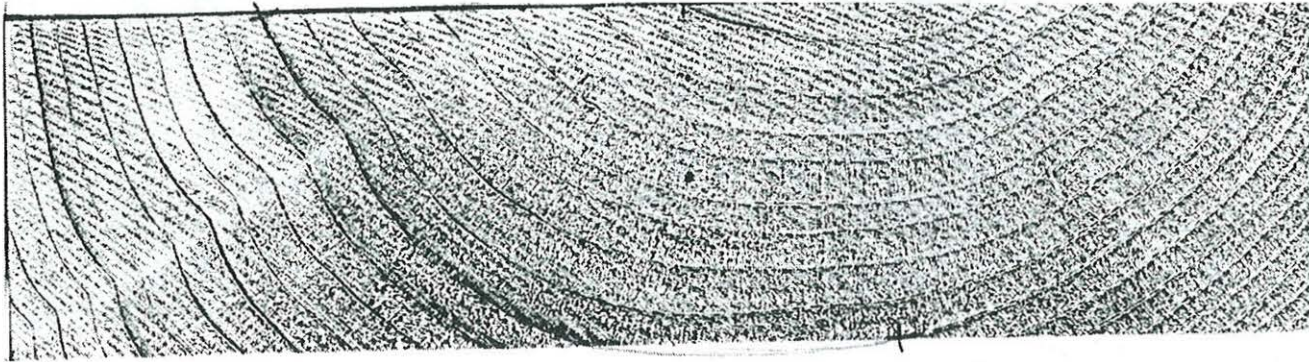
Versuch 104

**Bild A32:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

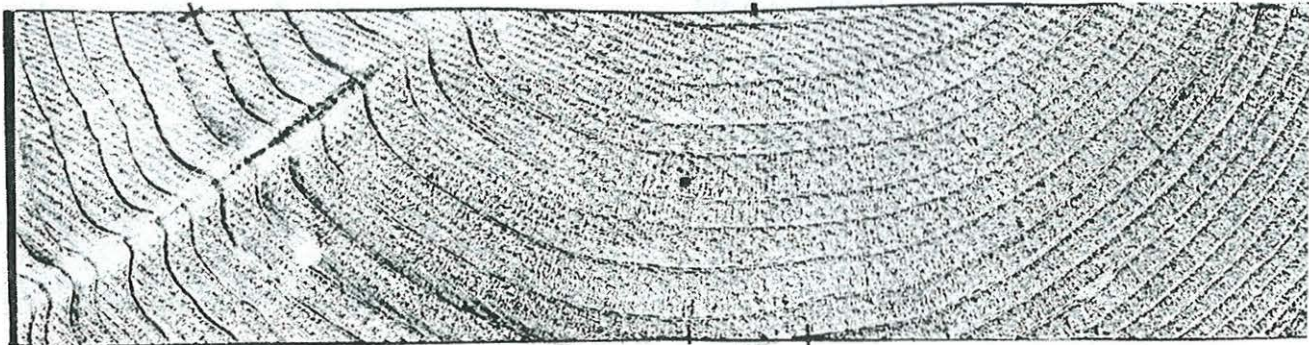




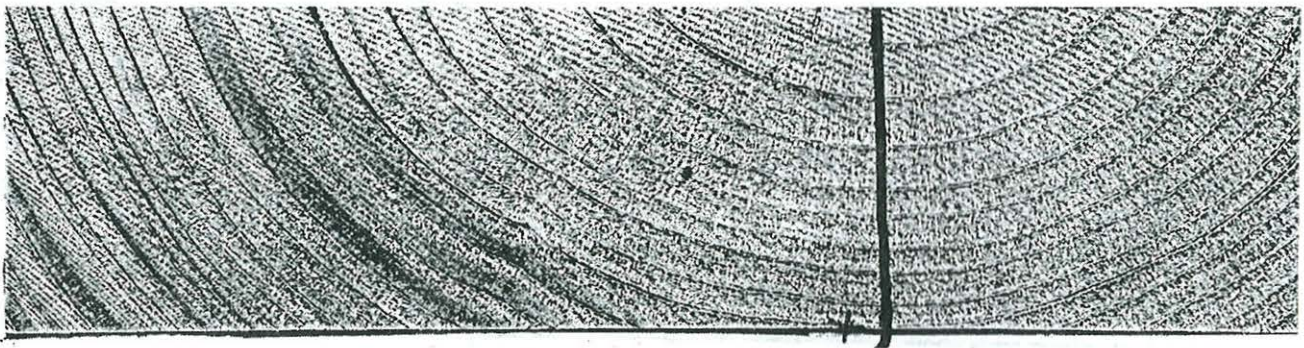
Versuch 105



Versuch 106



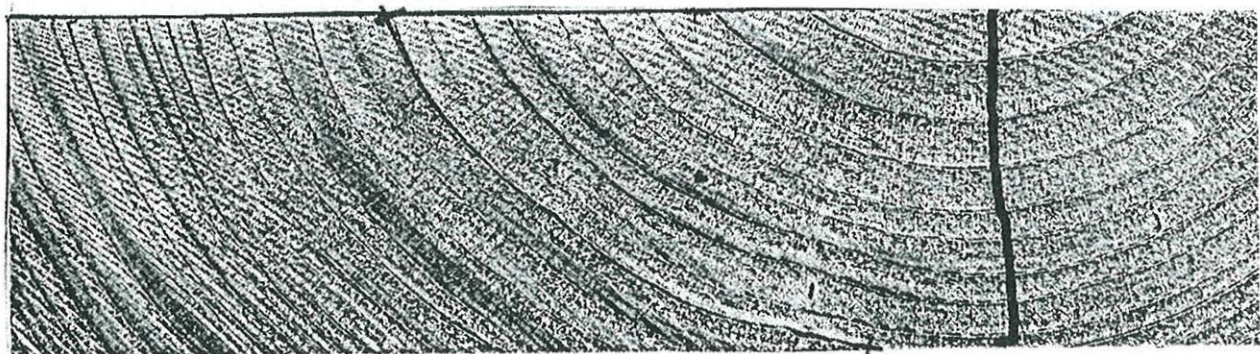
Versuch 107



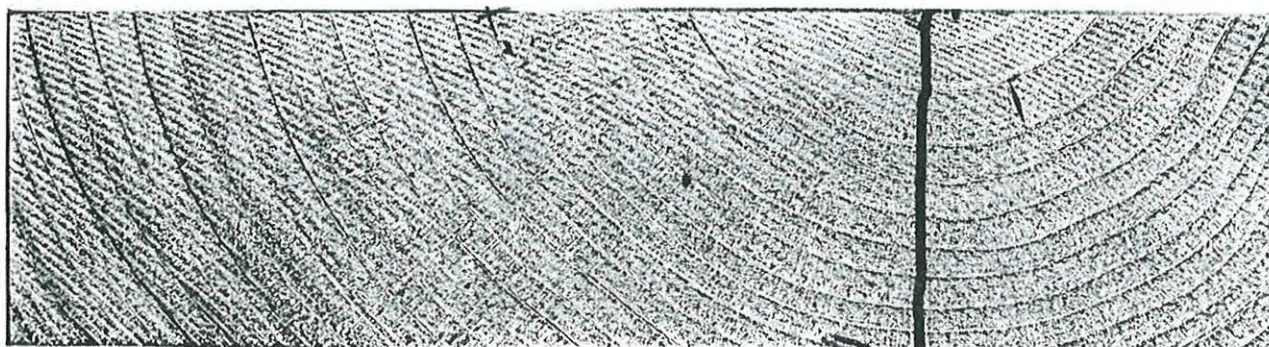
Versuch 108

**Bild A32:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

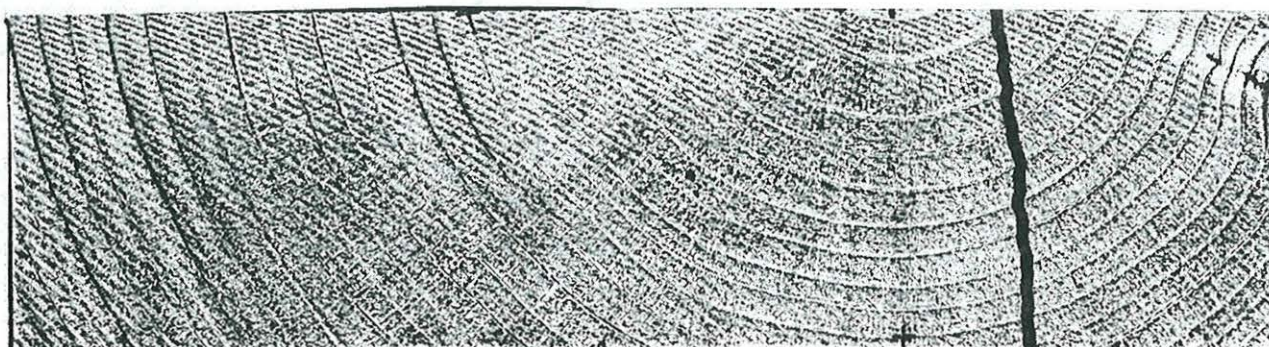




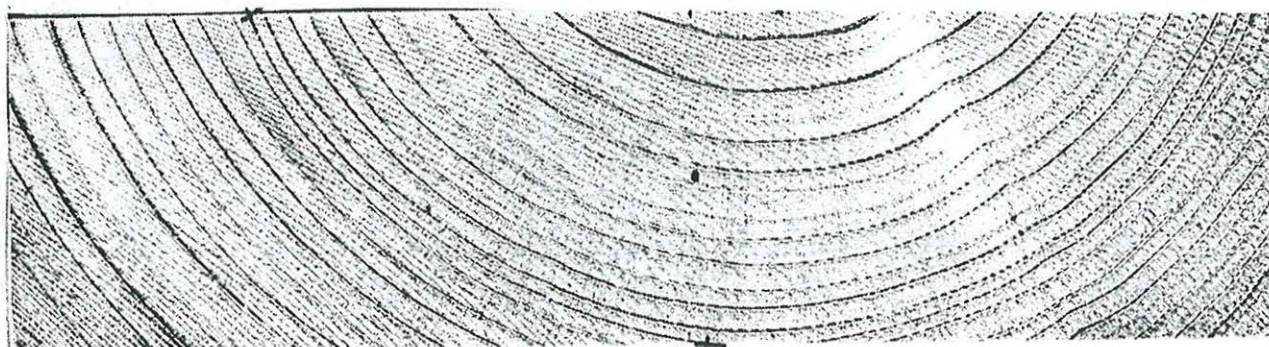
Versuch 109



Versuch 110



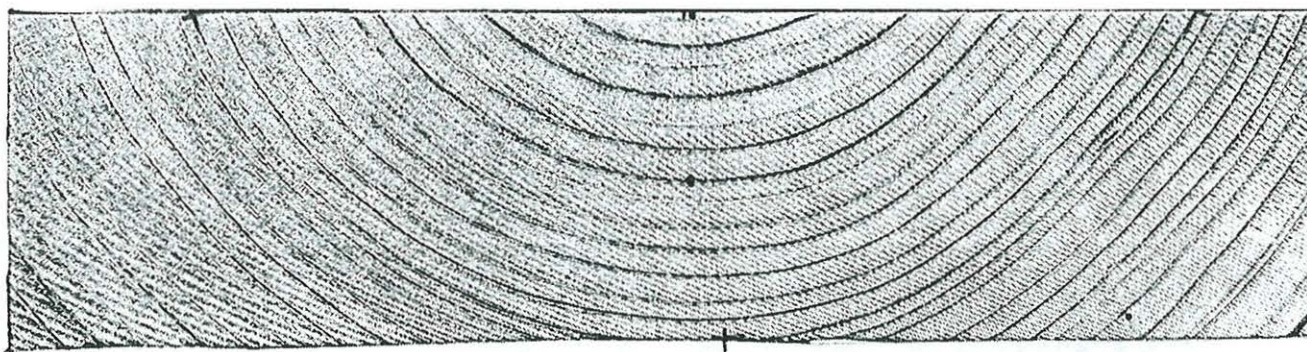
Versuch 111



Versuch 112

**Bild A33:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

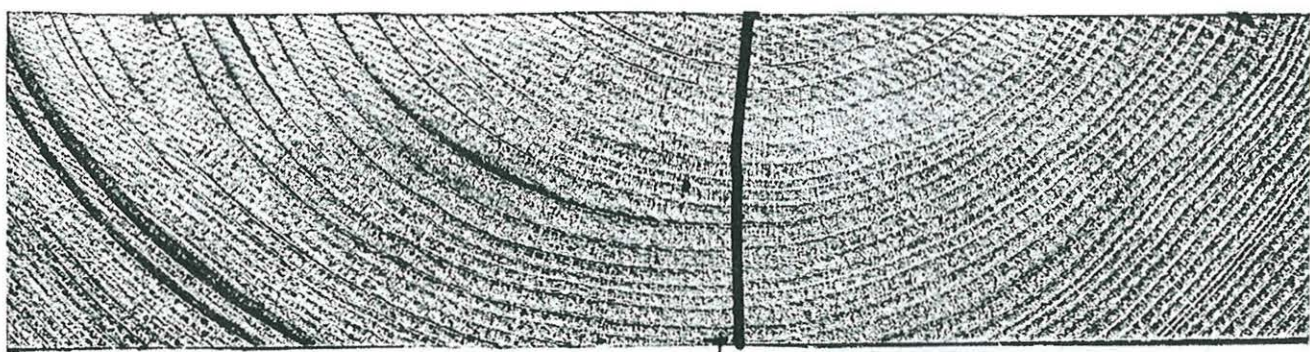




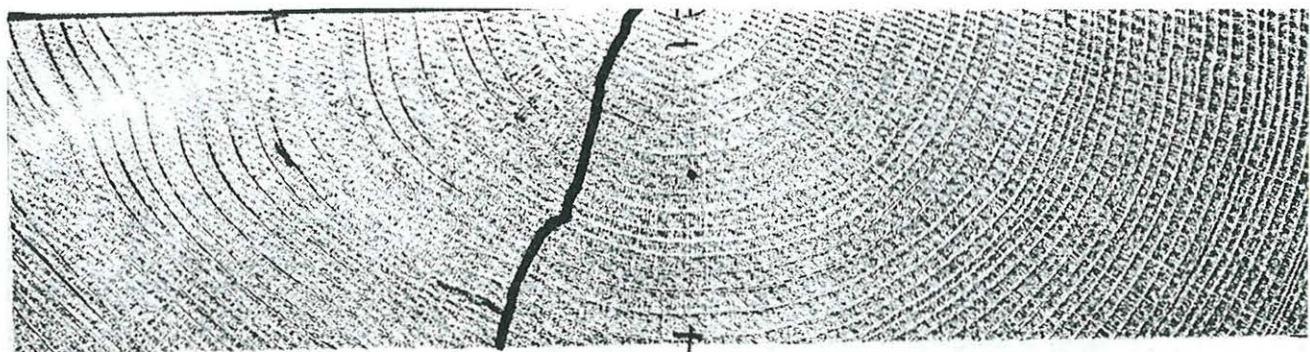
Versuch 113



Versuch 114



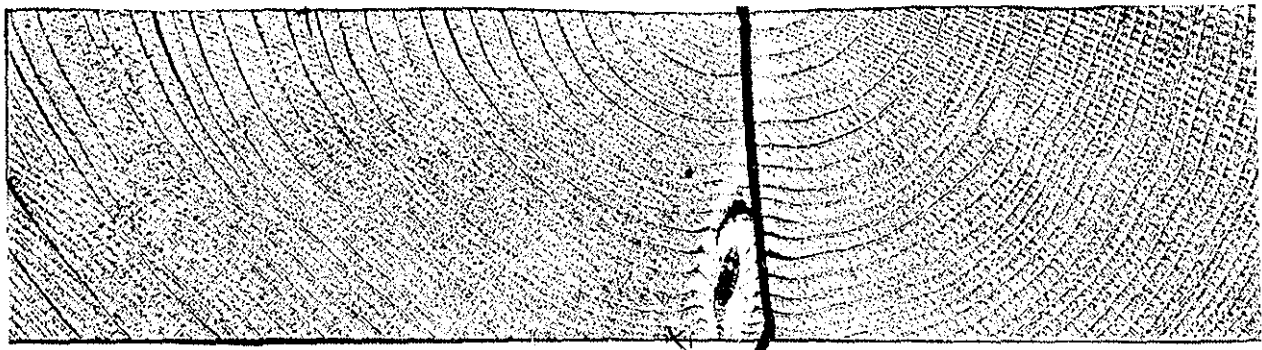
Versuch 115



Versuch 116

**Bild A34:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper





Versuch 117



Versuch 118



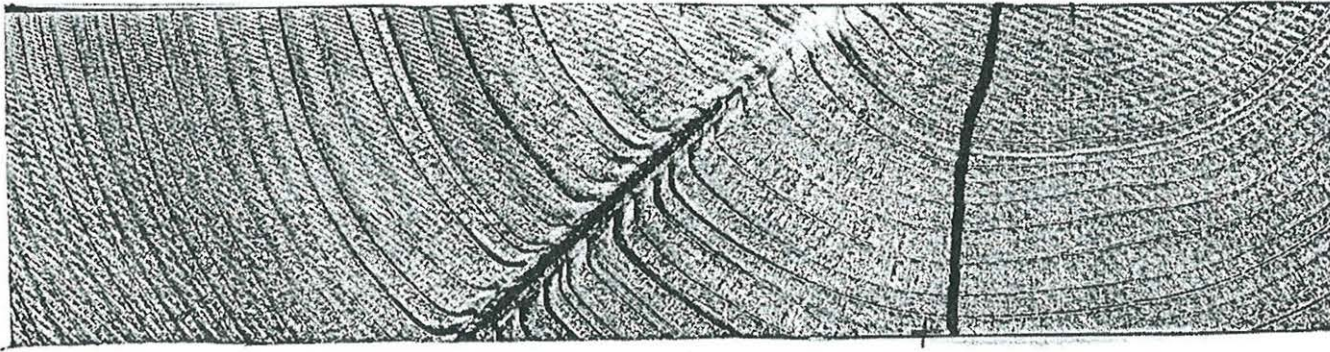
Versuch 119



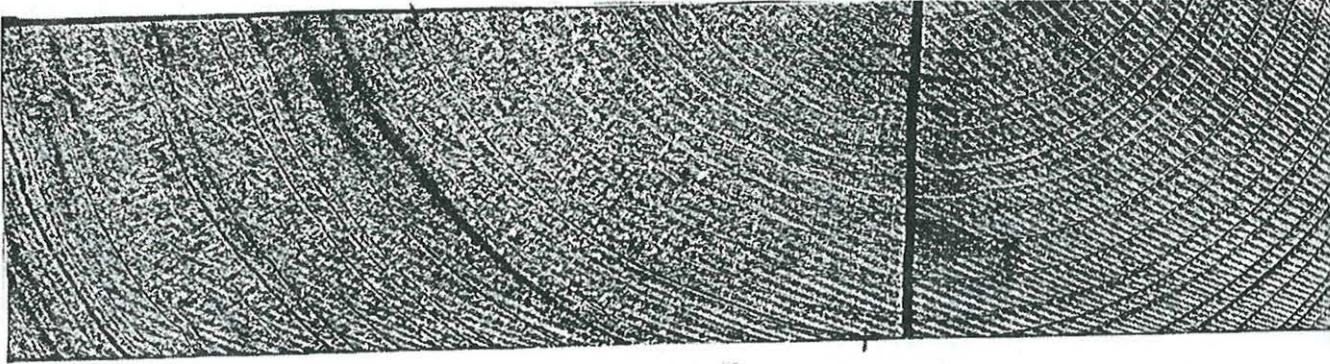
Versuch 120

**Bild A35:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

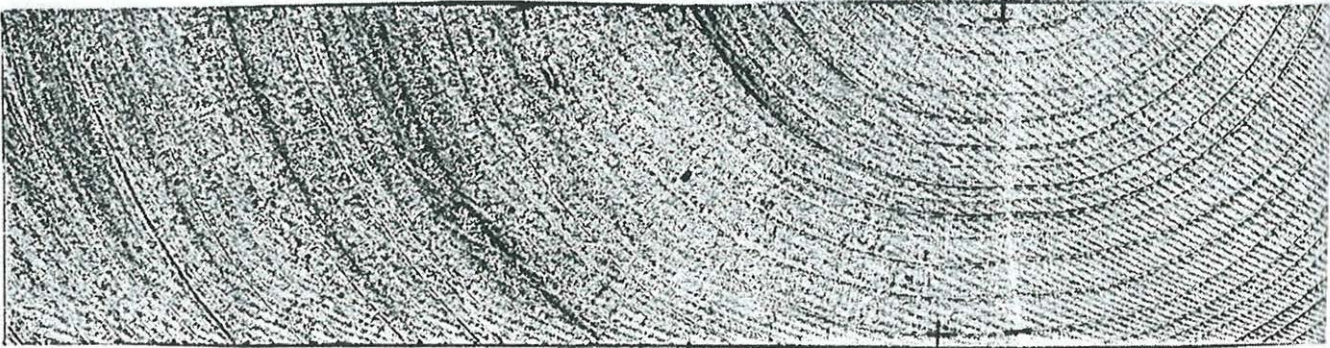




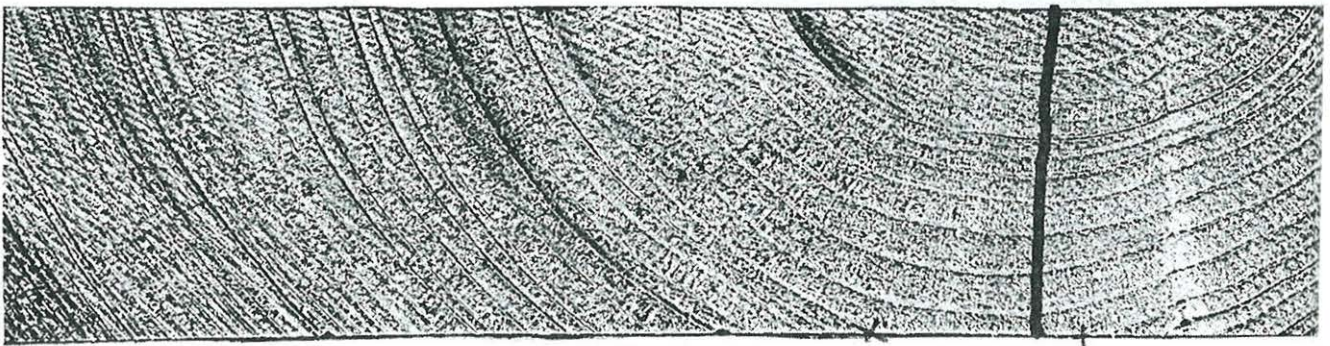
Versuch 121



Versuch 122



Versuch 123



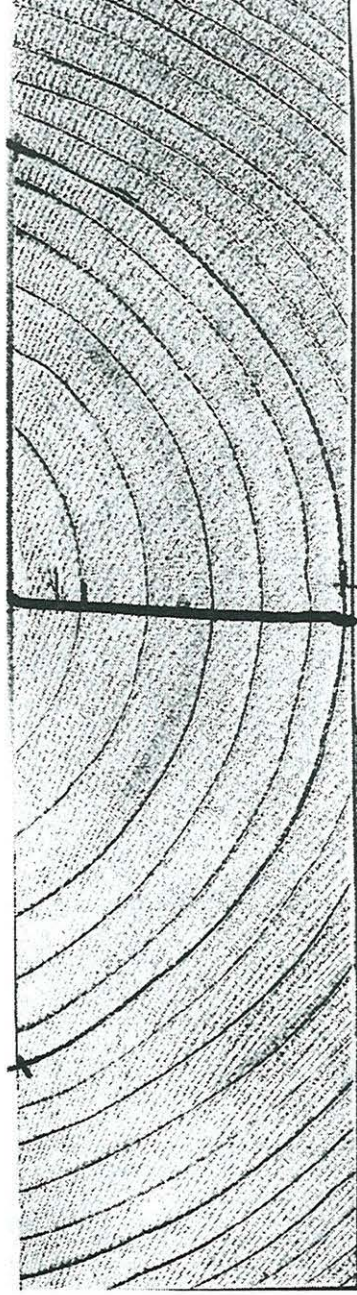
Versuch 124

**Bild A36:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

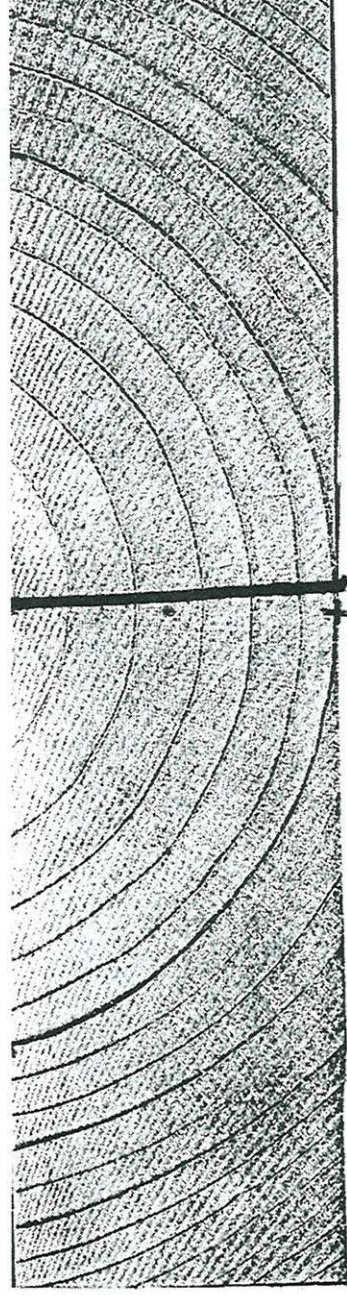




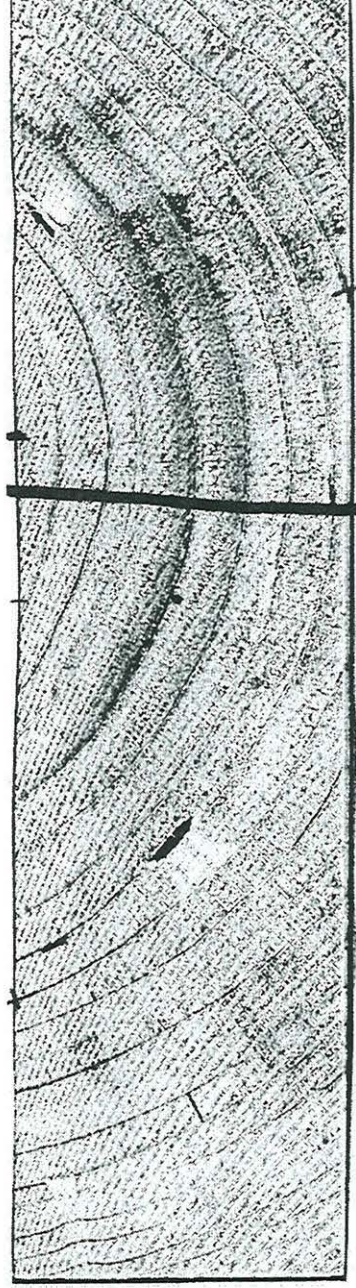
Versuch 125



Versuch 126



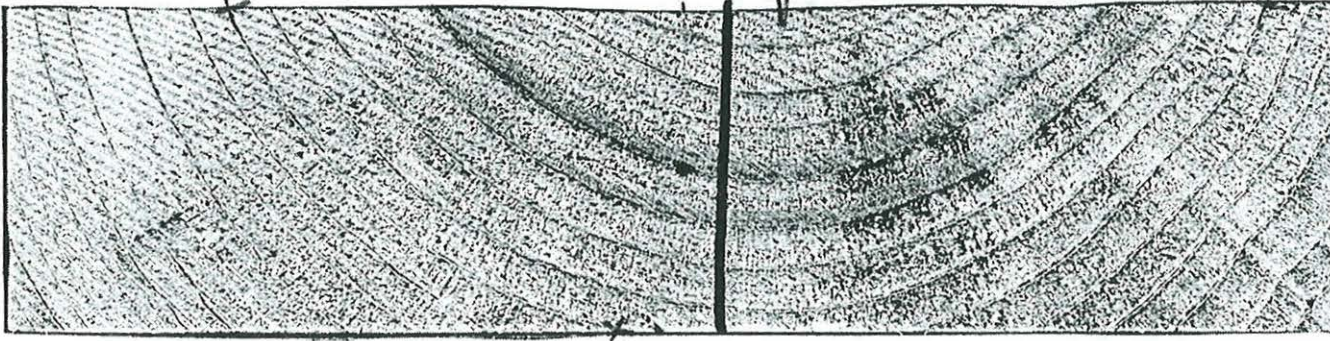
Versuch 127



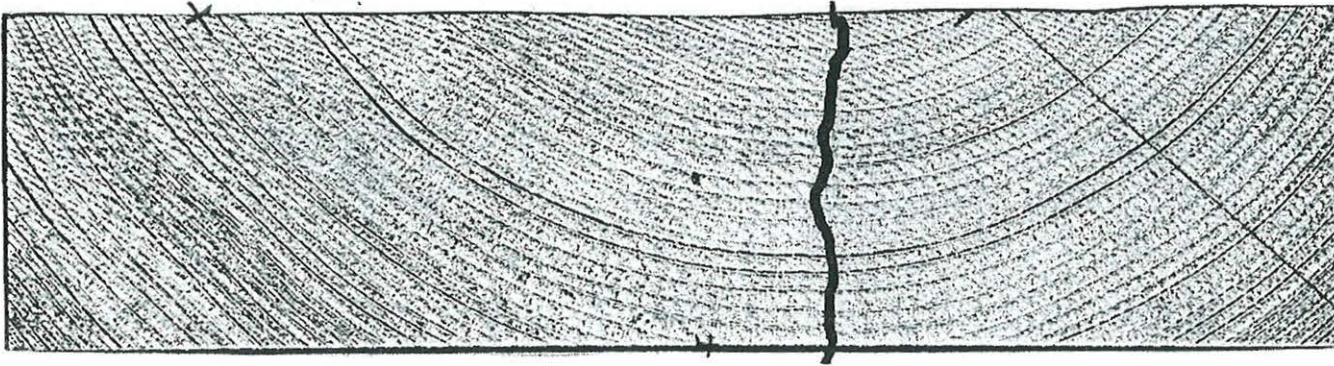
Versuch 128

**Bild A37:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper





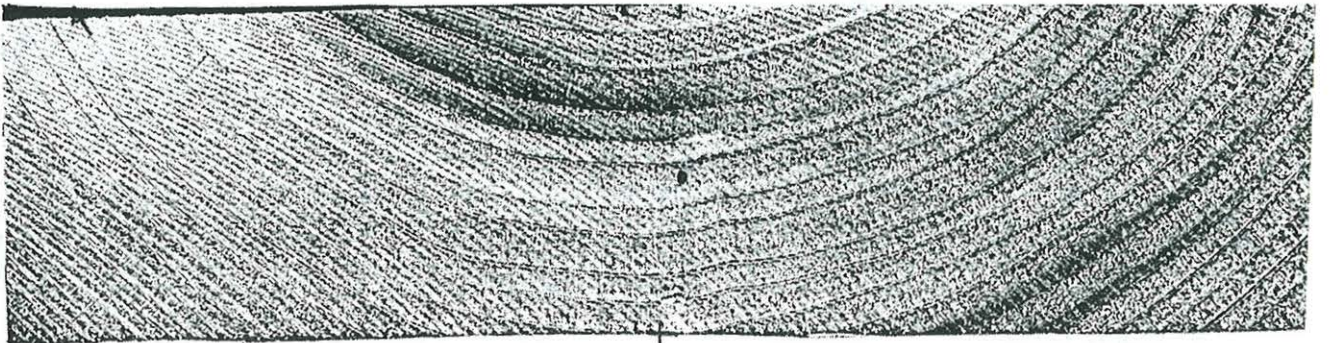
Versuch 129



Versuch 130



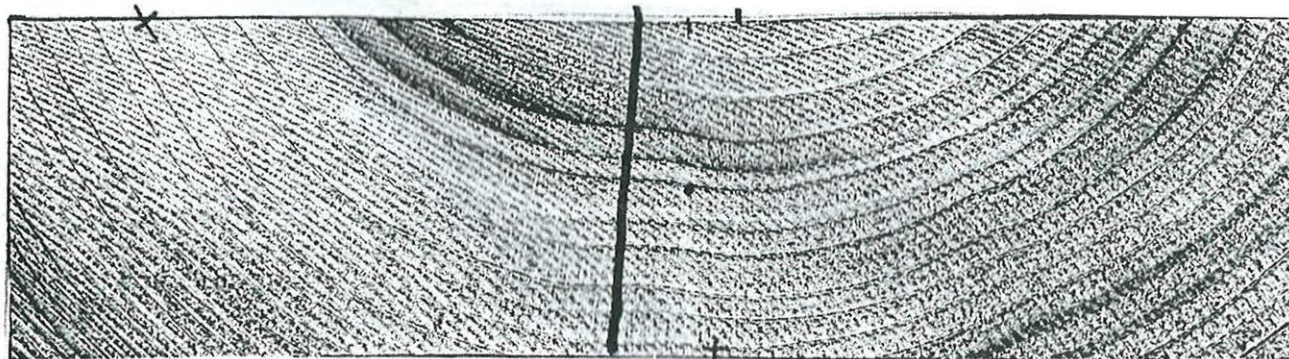
Versuch 131



Versuch 132

**Bild A38:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper





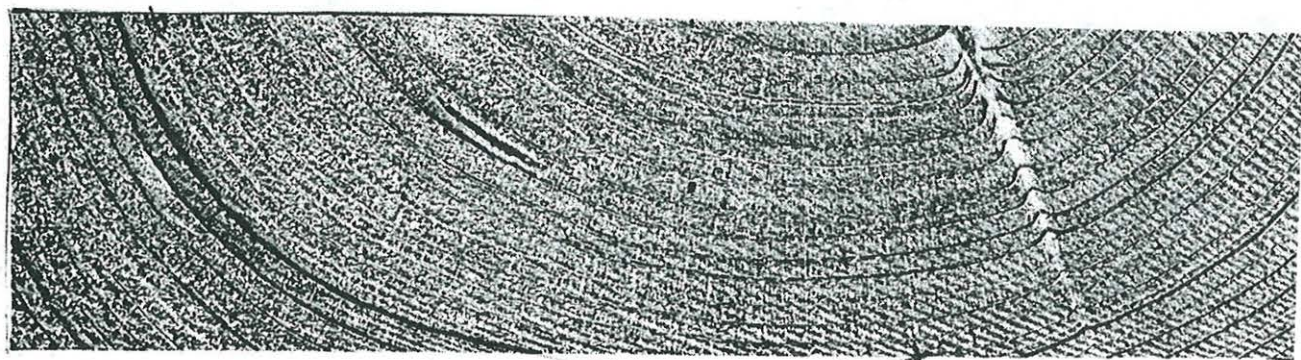
Versuch 133



Versuch 134



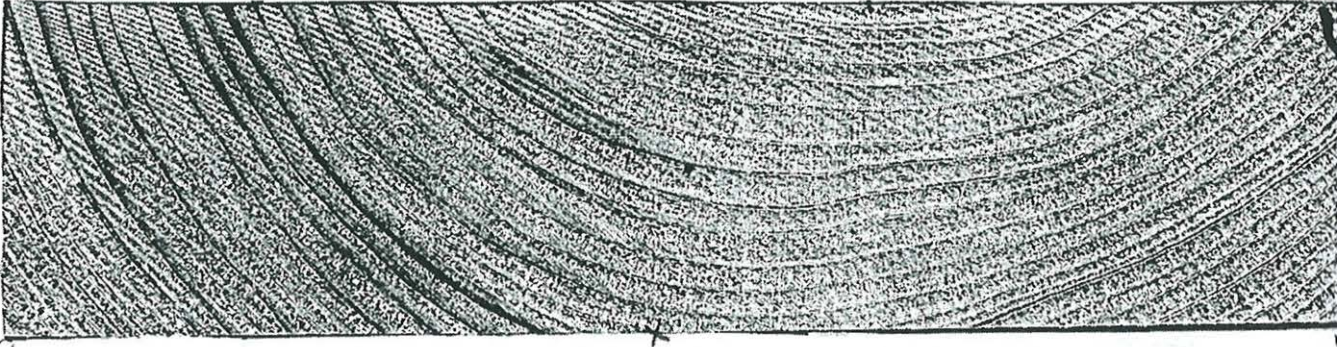
Versuch 135



Versuch 136

**Bild A39:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

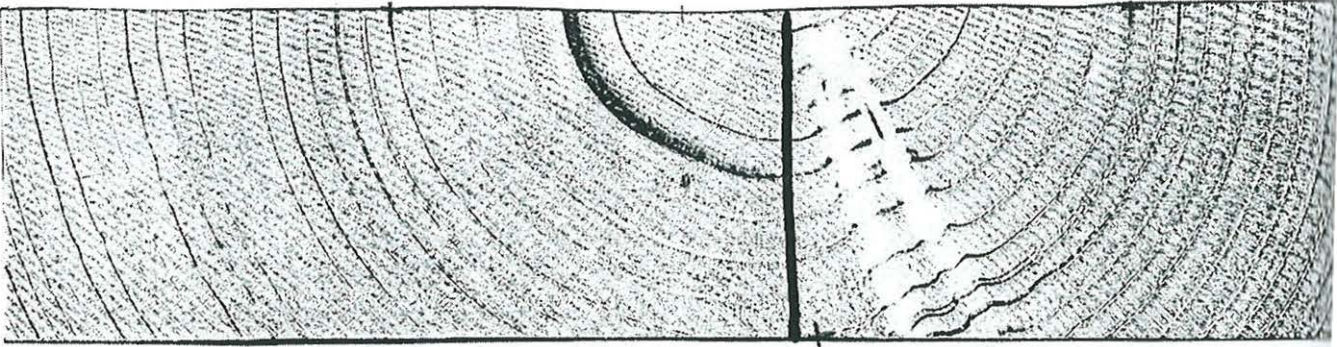




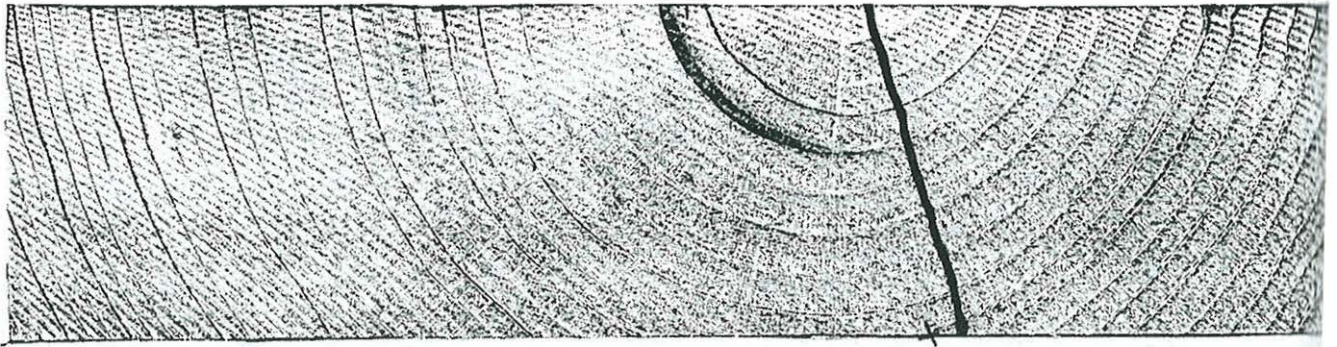
Versuch 137



Versuch 138



Versuch 139



Versuch 140

**Bild A40:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

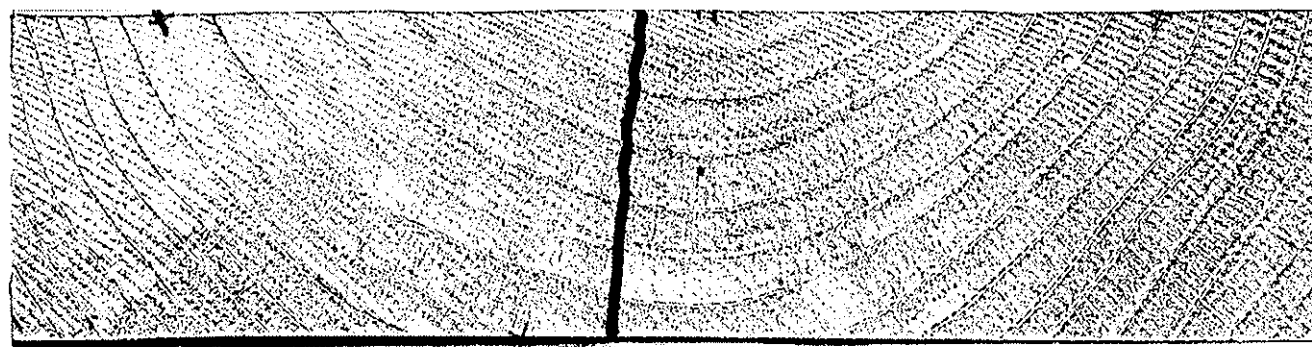




Versuch 141



Versuch 142



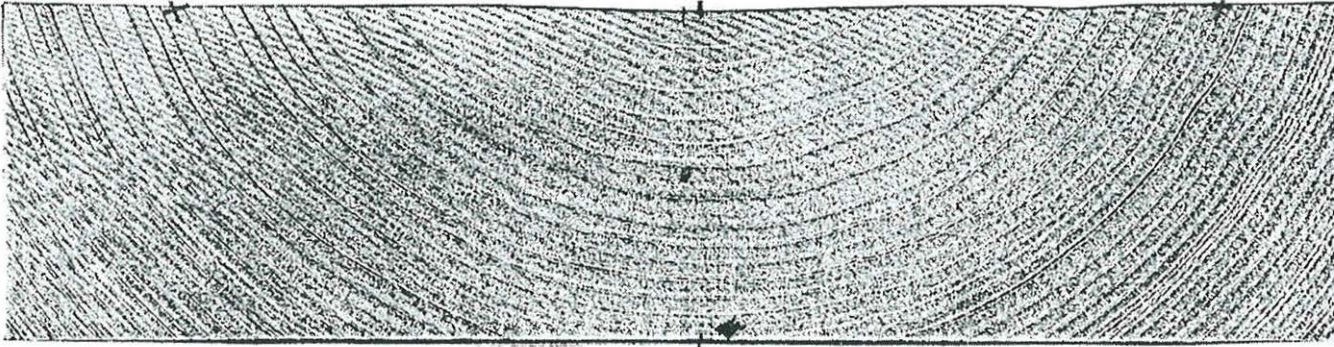
Versuch 143



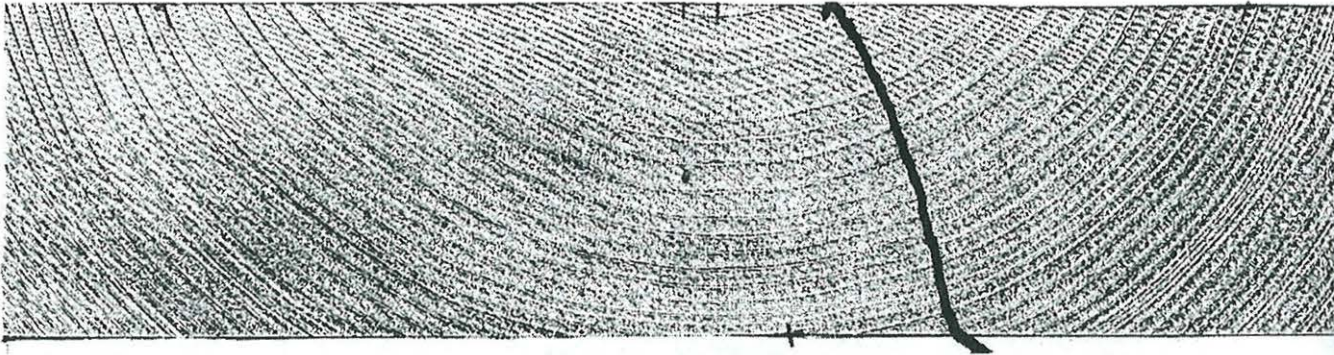
Versuch 144

**Bild A42:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

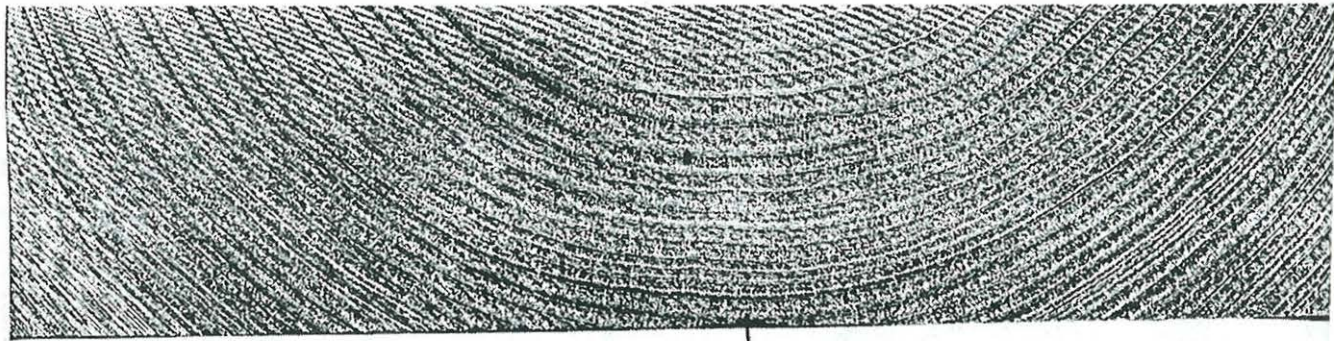




Versuch 145



Versuch 146



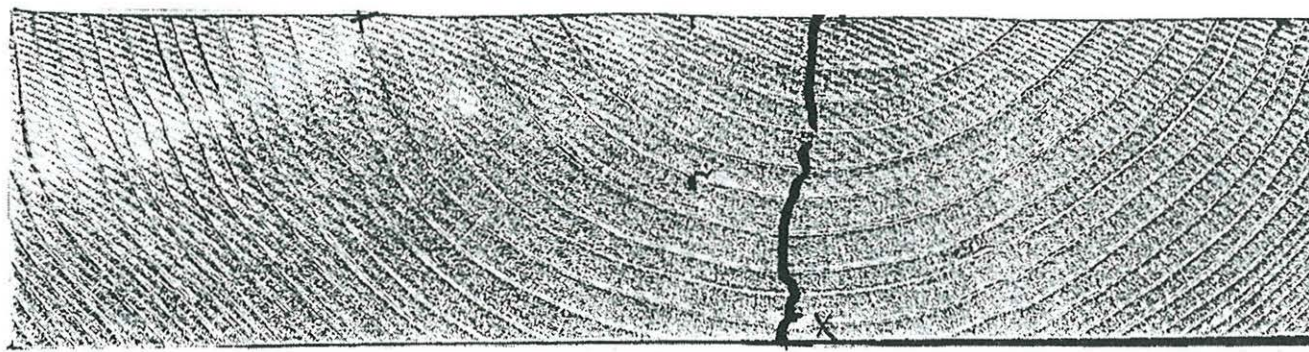
Versuch 147



Versuch 148

**Bild A43:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper





Versuch 149



Versuch 150



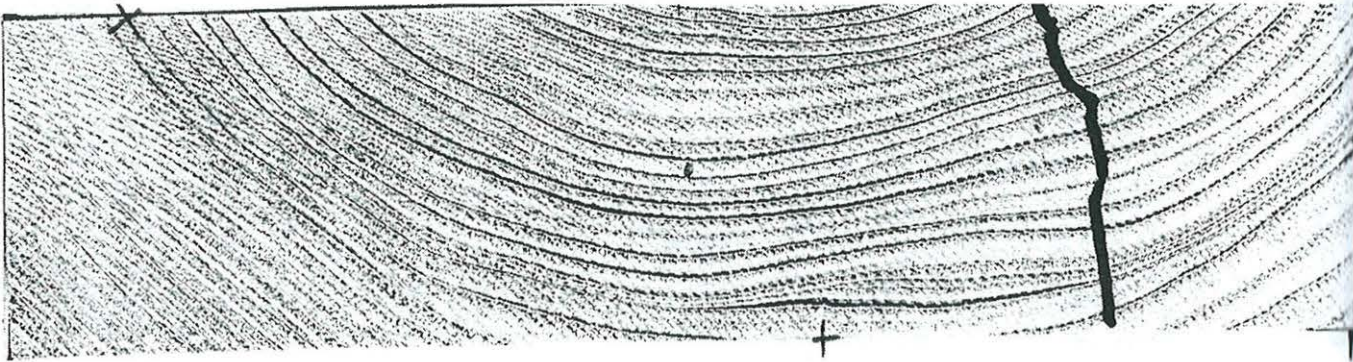
Versuch 151



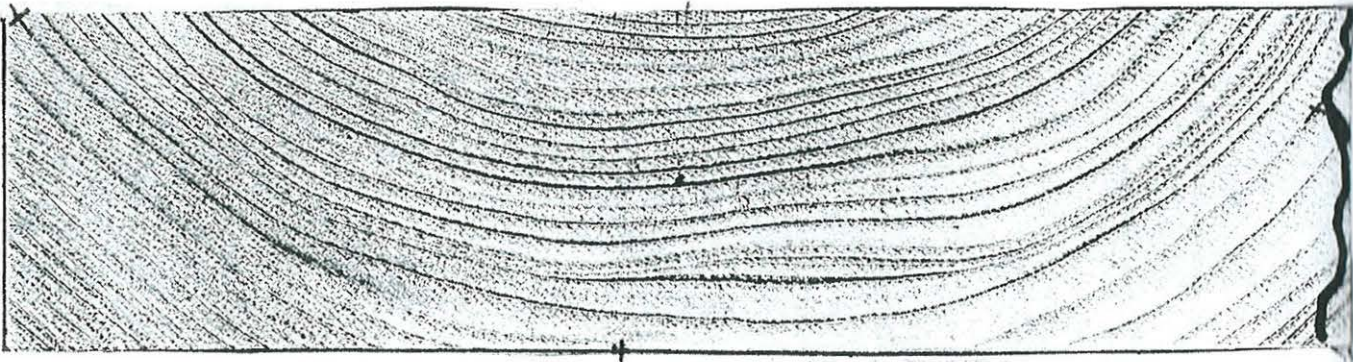
Versuch 152

**Bild A44:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper





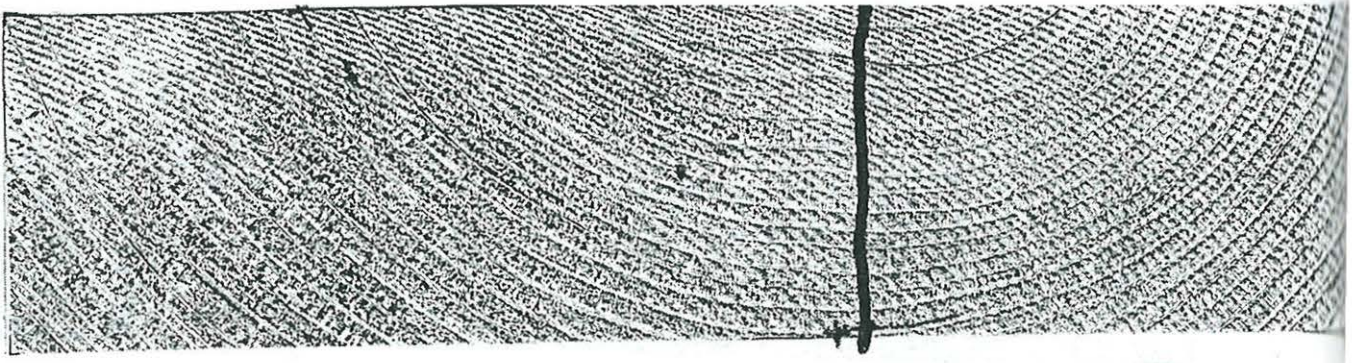
Versuch 153



Versuch 154



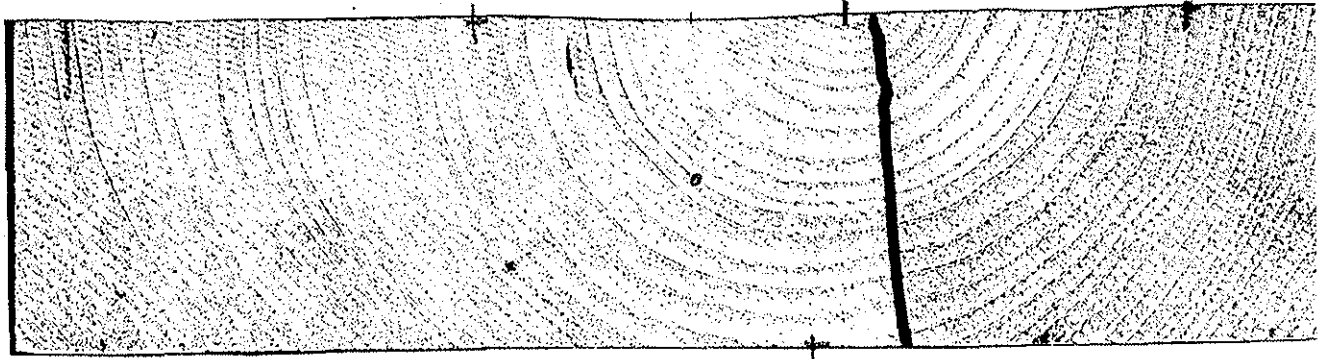
Versuch 155



Versuch 156

**Bild A45:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper





Versuch 157



Versuch 158



Versuch 159



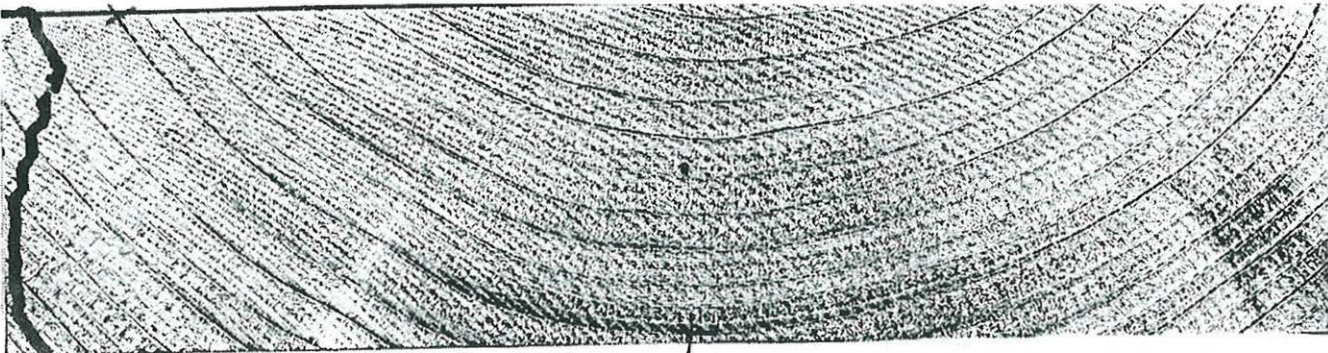
Versuch 160

**Bild A46:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper





Versuch 161



Versuch 162



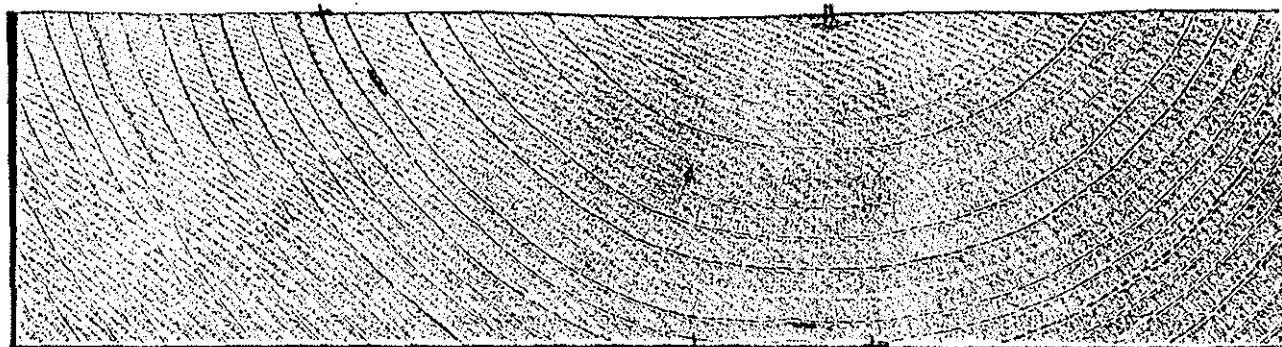
Versuch 163



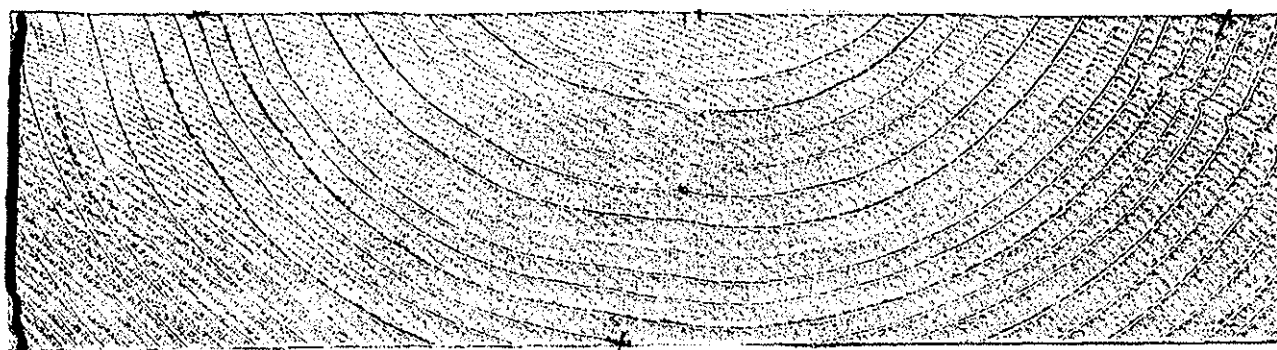
Versuch 164

**Bild A47:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

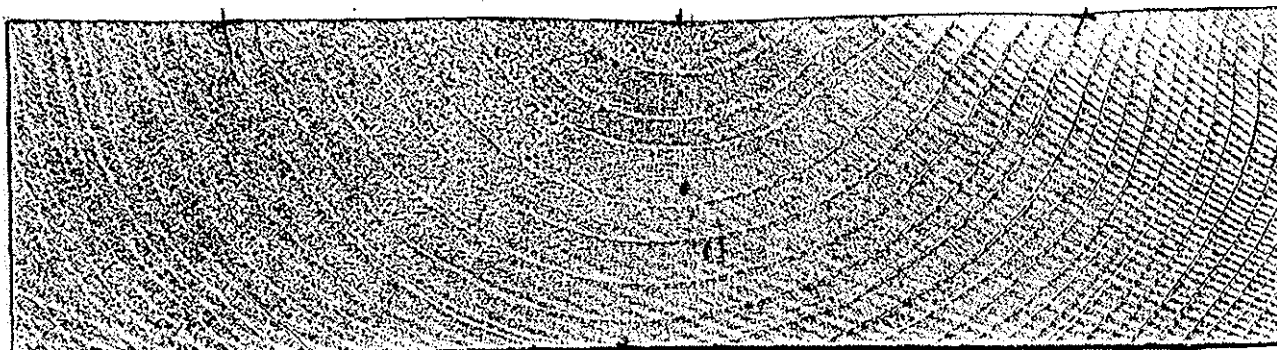




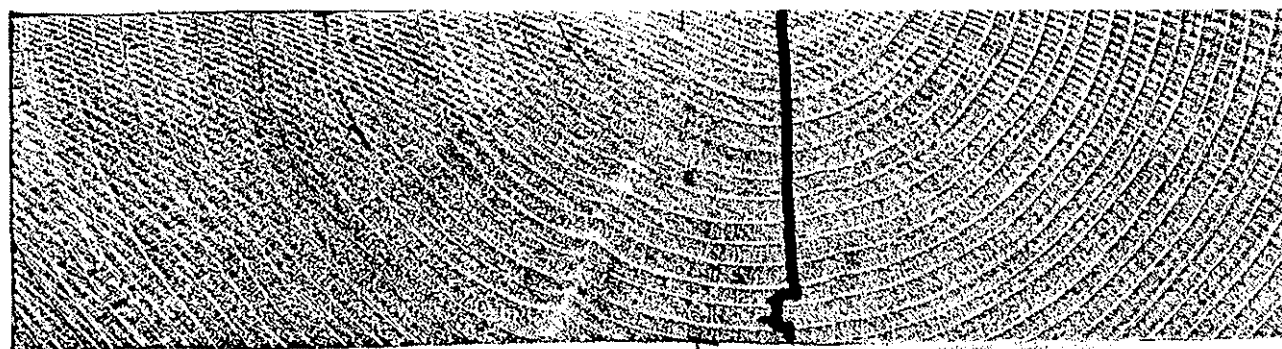
Versuch 165



Versuch 166



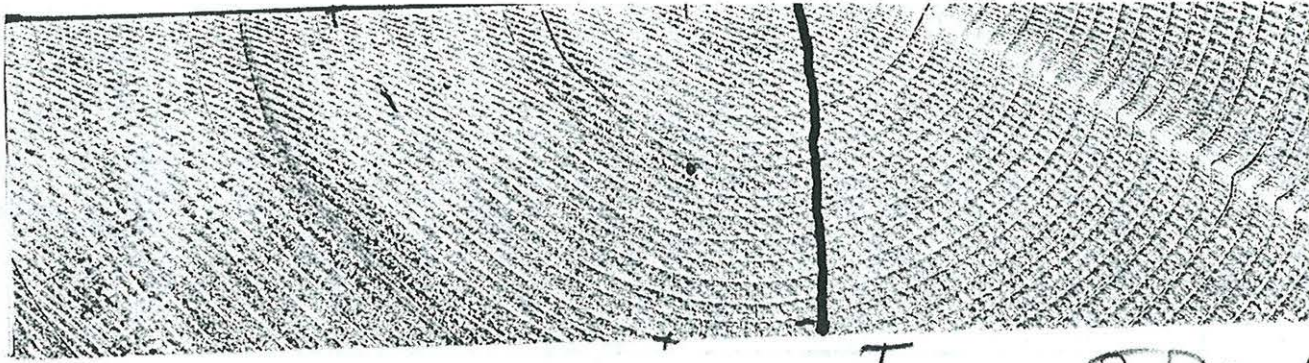
Versuch 167



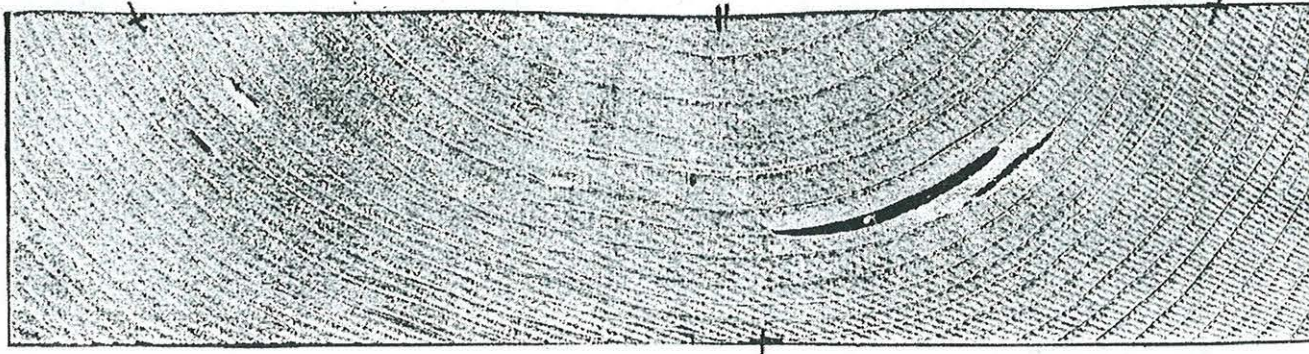
Versuch 168

**Bild A48:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper





Versuch 169



Versuch 170



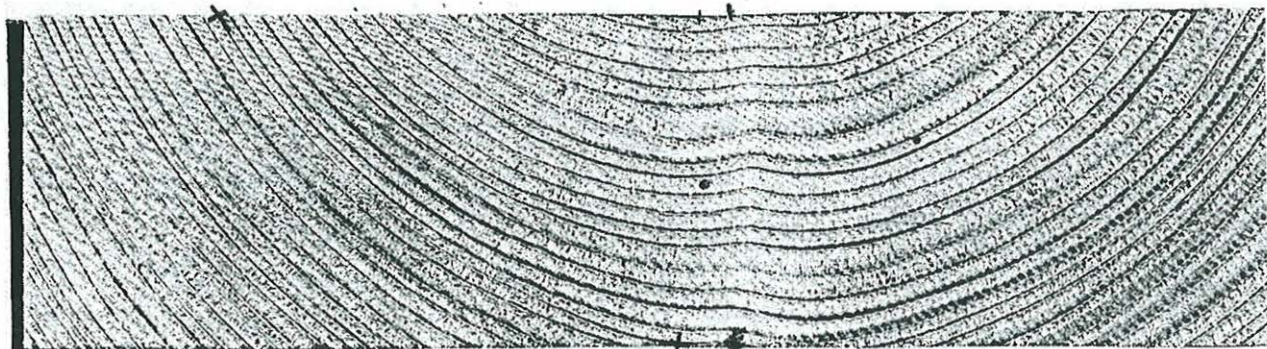
Versuch 171



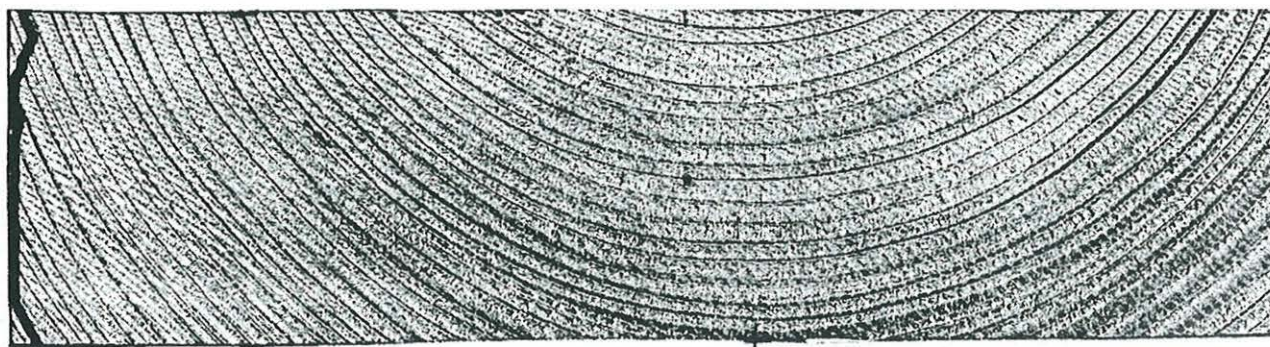
Versuch 172

**Bild A49:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper





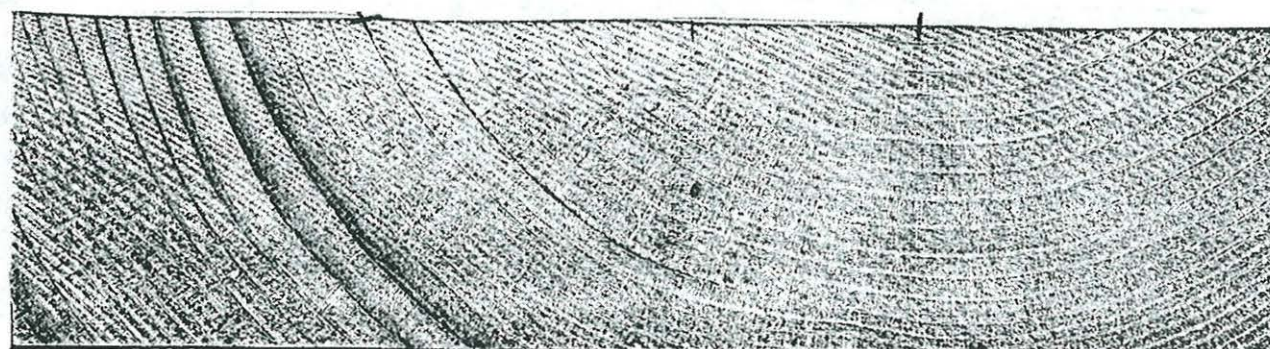
Versuch 173



Versuch 174



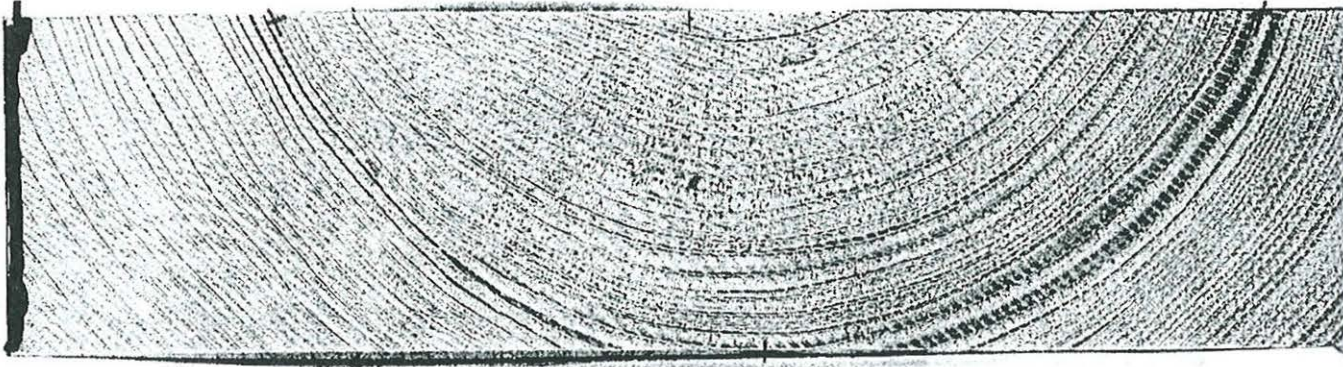
Versuch 175



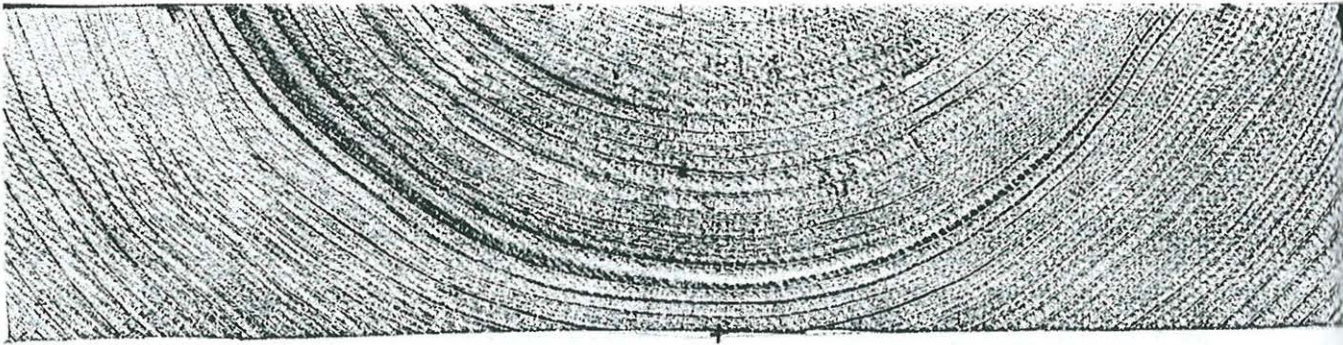
Versuch 176

**Bild A50:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

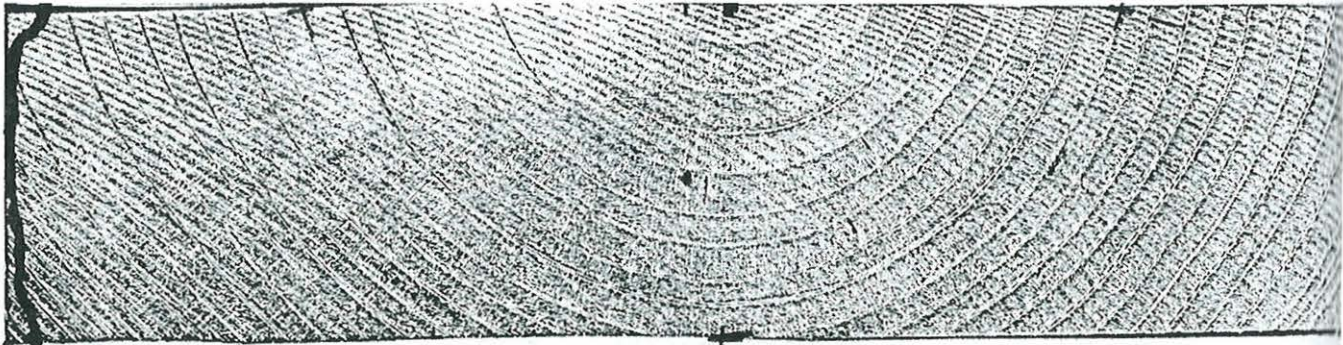




Versuch 177



Versuch 178



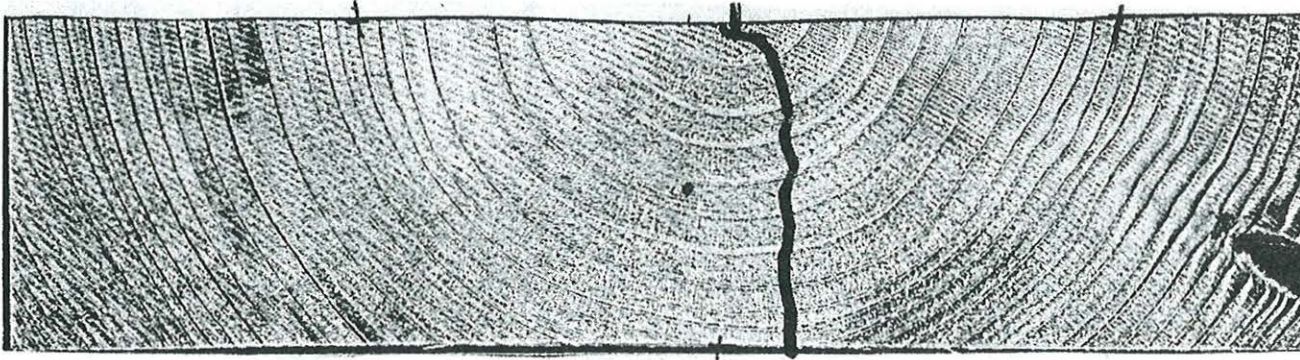
Versuch 179



Versuch 180

**Bild A51:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

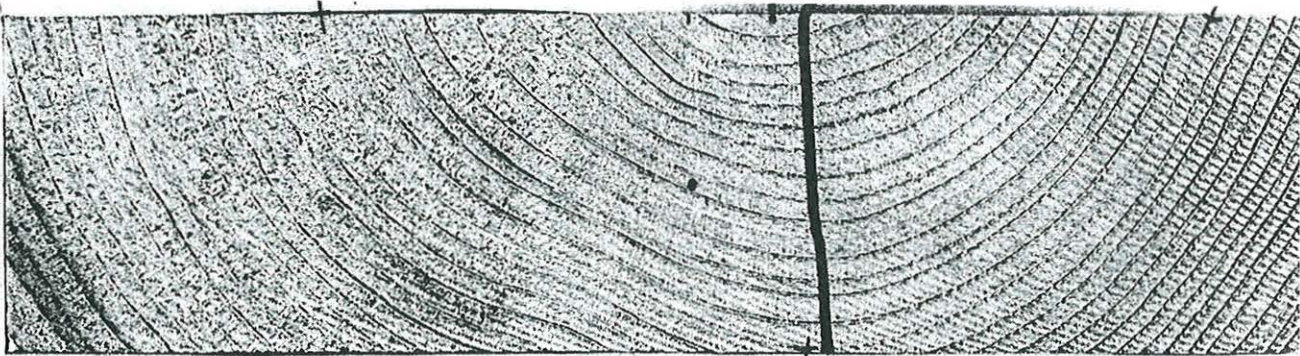




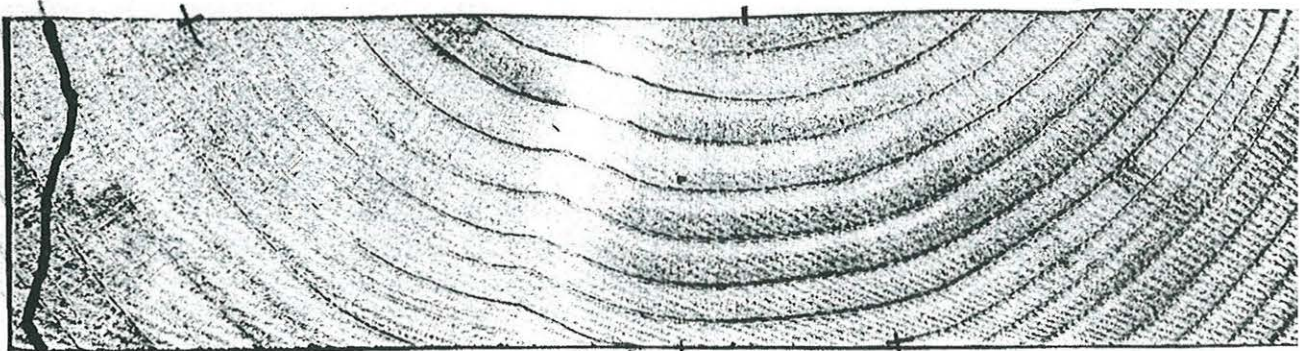
Versuch 181



Versuch 182



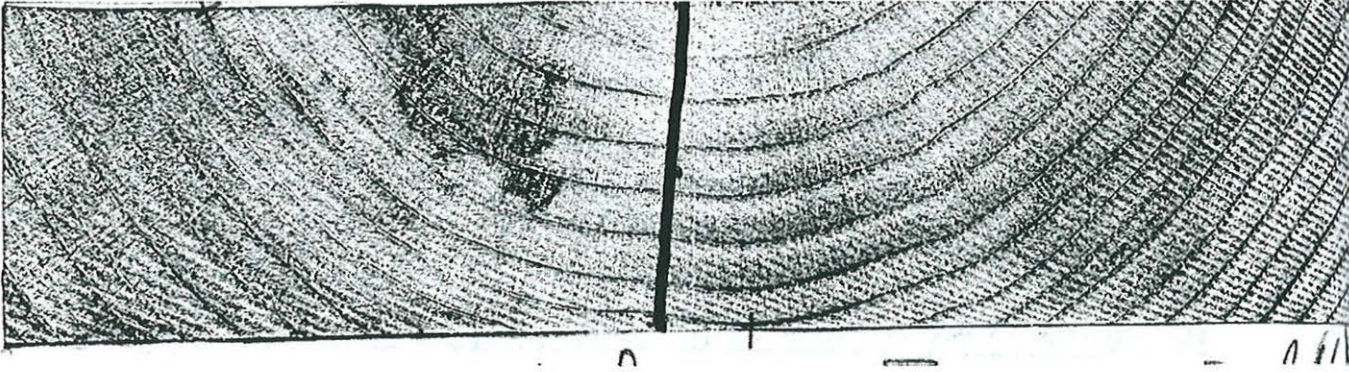
Versuch 183



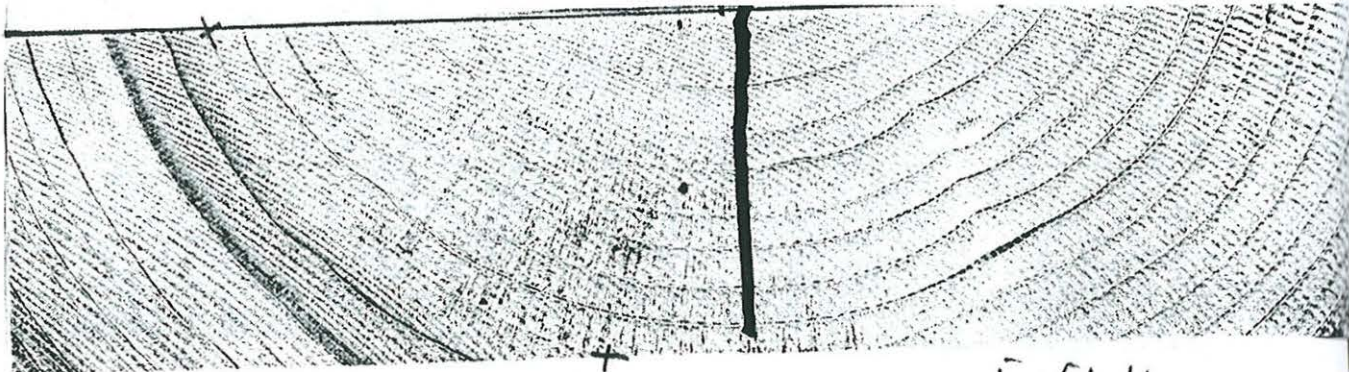
Versuch 184

**Bild A52:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper

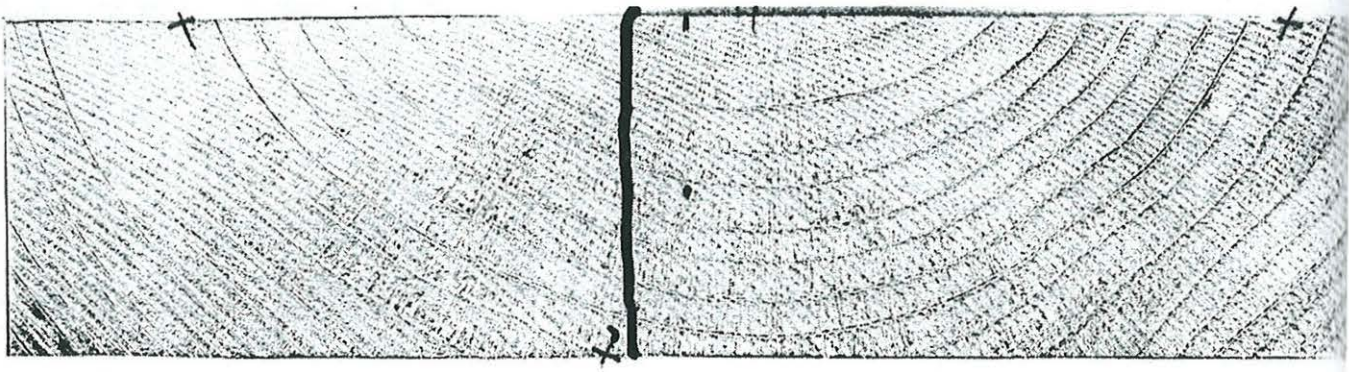




Versuch 185



Versuch 186



Versuch 187

**Bild A53:** Bruchbilder der Vollholzprüfkörper



**Tabelle A2:** Zusammenstellung der Ergebnisse aller Versuche mit Brett-schichtholzprüfkörpern des Bezugsvolumens  $V_0 = 0,01 \text{ m}^3$

Versuch	Festigkeits- klasse	Lamellen- breite [mm]	Lamellen- dicke [mm]	$f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	max. Verformung [mm]
1	BS11BS14	198	33	0,90	286	407	2,19
2	BS11BS14	200	41	0,68	309	359	1,53
3	BS11BS14	160	41	0,81	312	401	2,10
4	BS11BS14	160	41	0,76	376	388	1,35
5	BS11BS14	160	41	0,67	316	438	1,44
6	BS11BS14	199	32	0,76	290	410	1,85
7	BS11BS14	198	40	0,73	358	412	1,45
8	BS11BS14	161	41	0,68	399	418	1,25
9	BS11BS14	198	32	0,81	282	445	2,06
10	BS11BS14	198	40	0,69	336	473	1,35
11	BS11BS14	120	32	0,70	311	380	2,09
12	BS11BS14	120	32	0,77	308	379	2,22
13	BS11BS14	120	32	0,69	314	429	1,61
14	BS11BS14	119	25	0,96	479	383	1,34
15	BS11BS14	200	41	0,52	288	494	1,83
16	BS11BS14	200	32	0,63	318	515	2,13
17	BS11BS14	160	40	0,79	322	328	1,75
18	BS11BS14	120	25	0,97	397	380	1,61
19	BS11BS14	120	25	1,03	444	348	1,67
20	BS11BS14	120	25	0,76	463	368	1,08
21	BS11BS14	200	41	0,49	296	493	1,65
22	BS11BS14	160	41	0,59	347	387	1,14
23	BS11BS14	200	31	0,82	313	434	1,76
24	BS11BS14	120	25	0,48	436	429	0,86

Tabelle A2 (Fortsetzung):

Versuch	Festigkeits- klasse	Lamellen- breite [mm]	Lamellen- dicke [mm]	$f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	max. Verformung [mm]
25	BS11BS14	160	41	0,66	329	339	1,85
26	BS11BS14	160	41	0,77	285	414	2,25
27	BS11BS14	200	31	0,78	337	500	1,80
28	BS11BS14	198	40	0,46	301	415	1,07
29	BS11BS14	120	25	0,90	400	367	1,63
30	BS11BS14	120	25	0,55	425	416	0,84
31	BS11BS14	120	25	0,76	480	,	1,04
32	BS11BS14	200	41	0,76	304	409	2,03
33	BS11BS14	120	25	0,87	447	398	1,27
34	BS11BS14	200	41	0,50	296	422	1,16
35	BS11BS14	160	41	0,69	327	345	1,93
36	BS11BS14	200	41	0,22	211	426	0,92
37	BS11BS14	120	25	0,88	390	452	1,53
38	BS11BS14	120	25	0,77	417	410	1,35
39	BS11BS14	120	25	0,67	417	463	1,05
40	BS11BS14	120	25	0,79	460	375	1,12
41	BS11BS14	120	25	1,00	411	354	1,58
42	BS11BS14	120	20,5	0,88	442	376	1,30
43	BS11BS14	120	20	0,54	340	450	1,24
49	BS11BS14	160	31	0,62	269	519	1,78
50	BS11BS14	156	40	0,96	292	416	2,17
51	BS11BS14	162	31	0,60	311	518	1,37
52	BS11BS14	157	40	0,55	302	425	1,20
53	BS16	200	32	0,93	320	428	1,94
54	BS18	200	32	1,18	377	445	2,09



Tabelle A2 (Fortsetzung):

Versuch	Festigkeits- klasse	Lamellen- breite [mm]	Lamellen- dicke [mm]	$f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	max. Verformung [mm]
55	BS16	200	32	0,79	287	428	2,53
56	BS18	200	32	1,03	347	454	2,08
57	BS16	200	32	0,89	314	426	1,87
58	BS18	120	32	0,62	393	409	1,08
59	BS18	120	32	0,67	400	507	1,39
60	BS18	120	32	0,62	462	503	0,92
61	BS18	120	32	0,61	422	524	1,17
62	BS16	160	32,5	0,65	405	454	2,11
63	BS18	119	32	0,62	446	471	0,96
64	BS18	120	32	0,61	429	438	1,58
65	BS18	119	32	0,70	415	463	1,61
66	BS16	160	33	0,83	391	452	1,40
67	BS11BS14	198	40	0,99	334	402	1,91
68	BS18	199	32	1,09	332	435	2,55
69	BS18	120	32,5	0,72	415	486	1,15
70	BS11BS14	202	40	0,87	319	405	2,07
71	BS16	200	32	0,85	318	351	1,76
72	BS16	160	32	0,67	381	455	1,30
73	BS18	200	32	1,30	343	444	2,60
74	BS16	160	32	0,67	405	463	1,83
75	BS11BS14	200	40	1,05	309	358	2,42
76	BS11BS14	200	40	0,79	290	349	1,84
77	BS11BS14	157	40	1,18	291	424	2,65
78	BS11BS14	197	40	1,19	335	412	2,34
79	BS11BS14	196	40	0,92	342	398	1,79

Tabelle A2 (Fortsetzung):

Versuch	Festigkeits- klasse	Lamellen- breite [mm]	Lamellen- dicke [mm]	$f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	max. Verformung [mm]
80	BS11BS14	160	31	0,53	263	523	1,54
81	BS11BS14	200	40	0,72	227	450	2,30
82	BS16	160	32	0,66	387	470	1,90
83	BS11BS14	156	40	0,75	308	550	1,75
84	BS11BS14	200	40	0,55	306	454	1,51
85	BS11BS14	197	40	0,56	345	421	1,08
86	BS16	160	32,5	0,79	382	452	1,34
87	BS11BS14	200	40	0,55	192	459	2,18
88	BS11BS14	196	40	0,55	369	554	1,03
89	BS16	160	32	0,67	368	494	1,21
90	BS16	160	32	0,85	383	463	1,41
91	BS11BS14	199	40	0,77	283	,	1,91
92	BS18	138	32	0,60	391	480	1,00
93	BS18	137	32	1,00	411	507	1,61
94	BS18	138	32	0,82	471	510	1,48
95	BS18	138	32	1,42	430	481	2,22
96	BS11BS14	141	40	0,46	236	379	1,31
97	BS16	139	32	0,91	367	482	1,84
98	BS18	138	32	0,80	427	520	1,33
99	BS18	217	31	0,71	310	519	1,52
100	BS18	217	31	0,66	292	407	1,73
101	BS16	98	31	0,88	348	436	1,67
102	BS16	100	31	0,60	437	430	1,53
103	BS11BS14	98	40	0,52	261	489	1,45
104	BS11BS14	99	41	0,34	232	495	1,00



Tabelle A2 (Fortsetzung):

Versuch	Festigkeits- klasse	Lamellen- breite [mm]	Lamellen- dicke [mm]	$f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	max. Verformung [mm]
105	BS18	139	32	0,86	532	518	1,05
106	BS16	218	32	0,41	266	448	1,48
107	BS18	139	32	0,66	365	438	1,22
108	BS16	219	32	0,50	255	437	1,73
109	BS16	139	32	0,70	377	474	1,22
110	BS18	140	32	0,67	324	526	1,41
111	BS16	99	32	0,93	361	466	1,76
112	BS18	99	32	0,92	354	474	1,69
113	BS16	99	32	0,68	337	440	1,38
114	BS18	138	32	1,14	333	421	2,25
115	BS18	139	32	0,80	312	408	1,78
116	BS16	137	31	0,86	395	476	1,43
117	BS16	99	32	1,01	360	384	1,80
118	BS11BS14	141	39	0,43	211	345	1,41
119	BS16	139	31	0,76	370	456	1,49
120	BS18	138	31	0,76	323	506	1,58
121	BS11BS14	141	39	0,64	184	338	2,33
122	BS11BS14	141	39	0,33	198	482	1,11
123	BS18	138	32	0,71	496	519	0,98
124	BS18	137	32	0,62	385	519	1,27
125	BS16	98	32	0,75	354	443	1,47
126	BS18	98	31	0,89	362	470	1,76
127	BS18	217	31	0,86	288	491	2,61
128	BS18	217	31	0,33	335	516	1,35
129	BS18	99	31	0,05	24	438	1,61

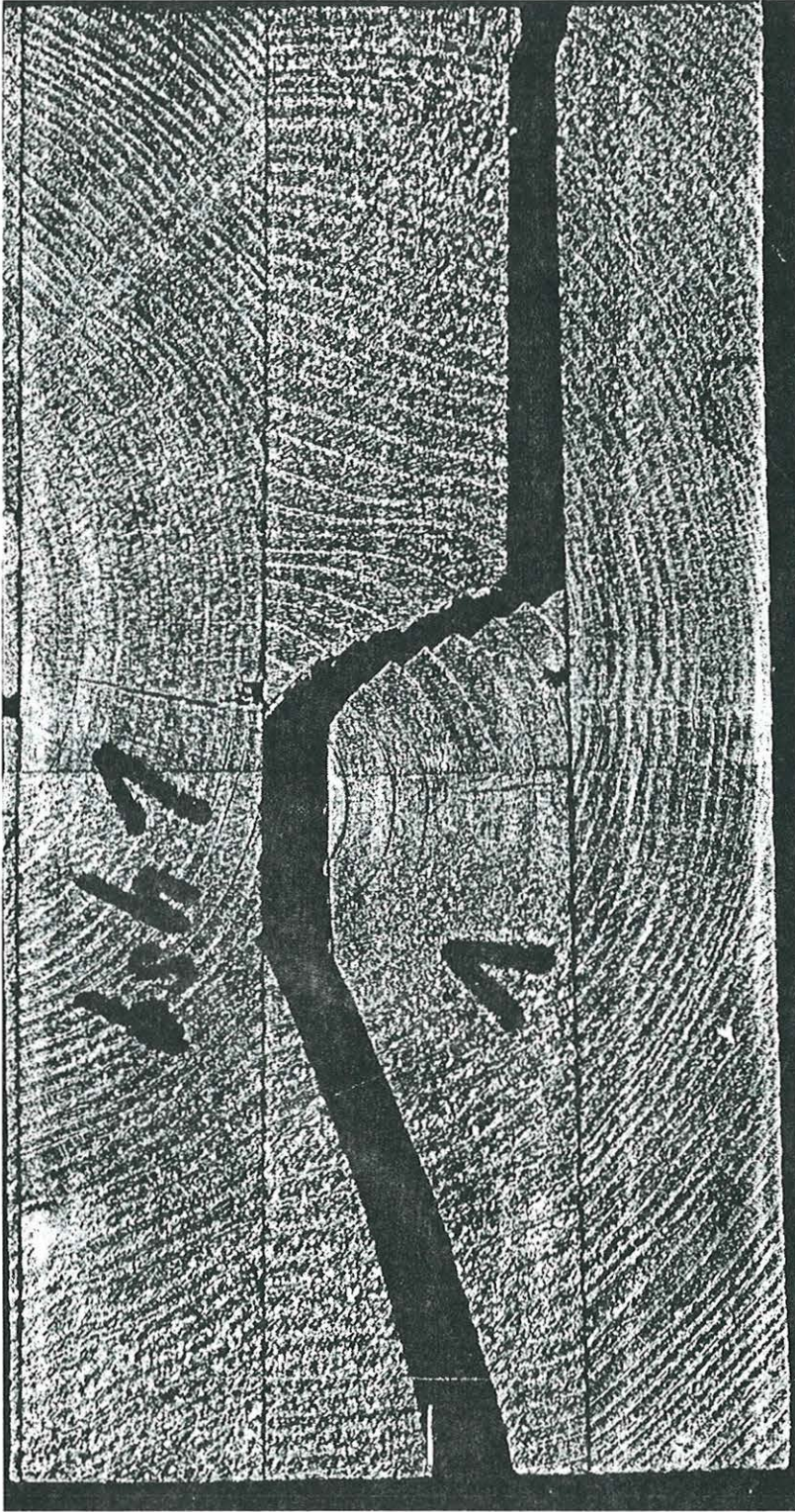
Tabelle A2 (Fortsetzung):

Versuch	Festigkeits- klasse	Lamellen- breite [mm]	Lamellen- dicke [mm]	$f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	max. Verformung [mm]
130	BS18	98	31	0,75	368	469	1,57
131	BS11BS14	235	40	0,86	368	430	1,60
132	BS11BS14	236	39	1,01	341	389	2,07
133	BS16	219	31	0,93	276	380	1,64
134	BS18	99	30	0,90	380	471	1,86
135	BS18	98	31	0,93	395	478	1,26
136	BS18	138	31	0,48	246	513	1,37
137	BS16	217	31	1,20	274	467	2,99
138	BS11BS14	180	38	0,72	319	433	1,47
139	BS16	179	30	0,74	409	541	1,20
140	BS11BS14	181	39	0,56	283	406	1,36
141	BS11BS14	179	38	1,22	324	419	2,53
142	BS11BS14	180	39	0,51	258	399	1,46
143	BS16	235	39	1,17	356	,	2,13
144	BS11BS14	235	38	1,35	310	400	2,59
145	BS11BS14	236	39	1,28	307	543	2,75
146	BS16	179	31	1,03	334	428	2,21
147	BS16	179	30	0,98	332	474	2,03
148	BS16	179	30	1,11	310	447	2,32
149	BS16	179	31	0,86	337	404	1,56
150	BS16	179	31	0,81	332	393	1,66
151	BS16	178	31	0,99	444	414	1,52
152	BS16	179	31	1,14	432	425	1,77
153	BS16	179	31	0,51	364	414	1,73
154	BS11BS14	179	41	0,63	393	437	1,21



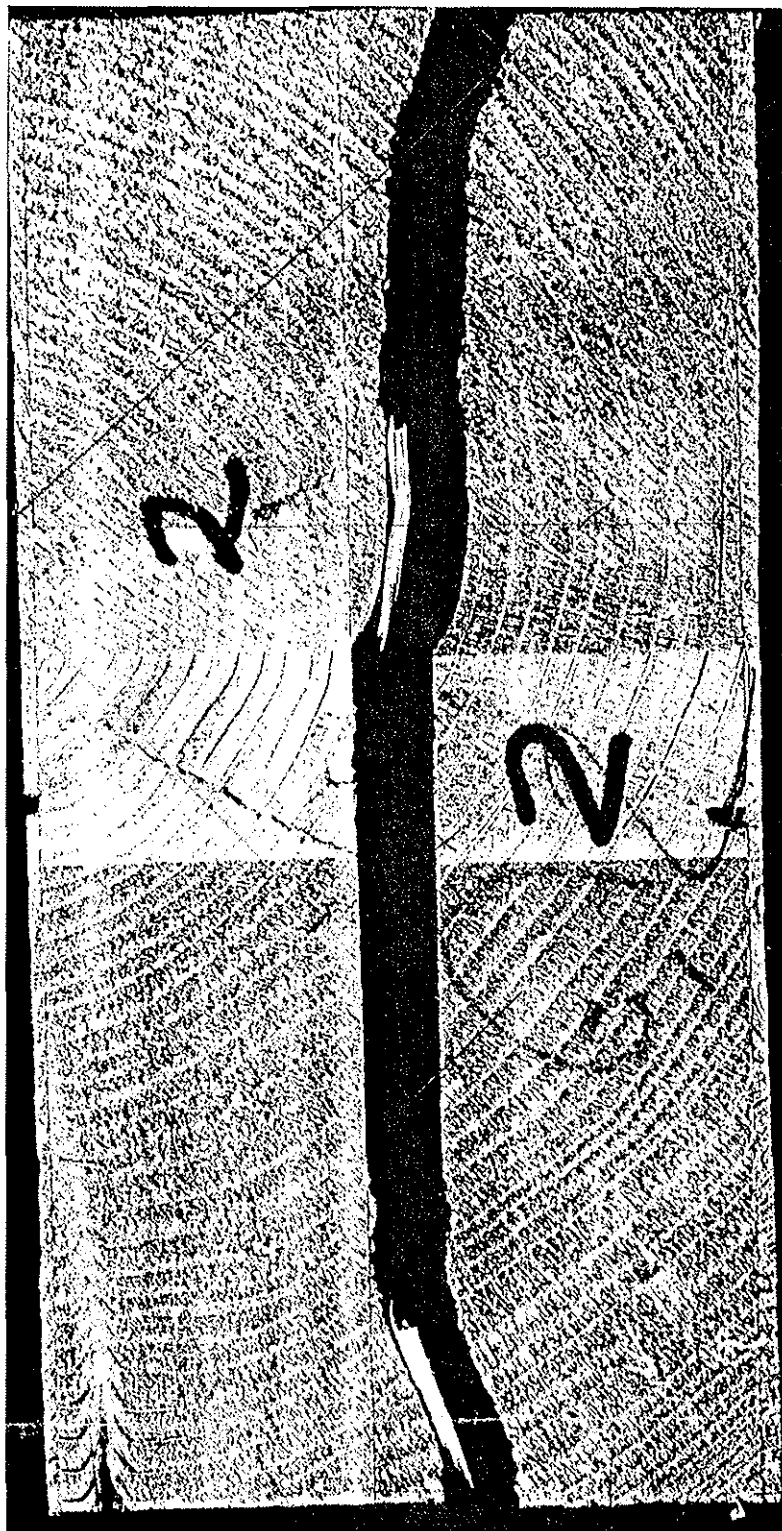
Tabelle A2 (Fortsetzung):

Versuch	Festigkeits- klasse	Lamellen- breite [mm]	Lamellen- dicke [mm]	$f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	max. Verformung [mm]
155	BS16	179	30	0,83	365	491	1,71
156	BS11BS14	179	41	0,61	375	442	1,47
157	BS16	179	31	0,92	331	402	2,01
158	BS11BS14	179	41	0,67	359	448	1,74



**Bild A54:** Bruchbild bsh1





**Bild A55:** Bruchbild bsh2

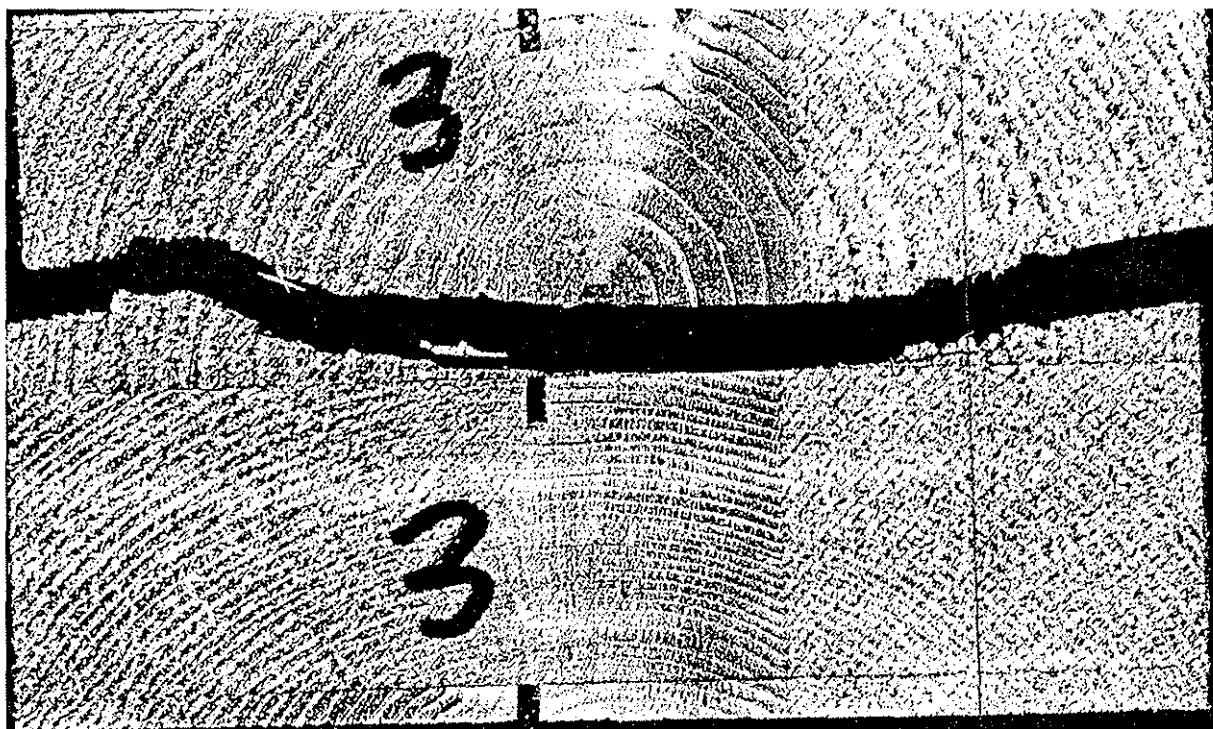


Bild A56: Bruchbild bsh3

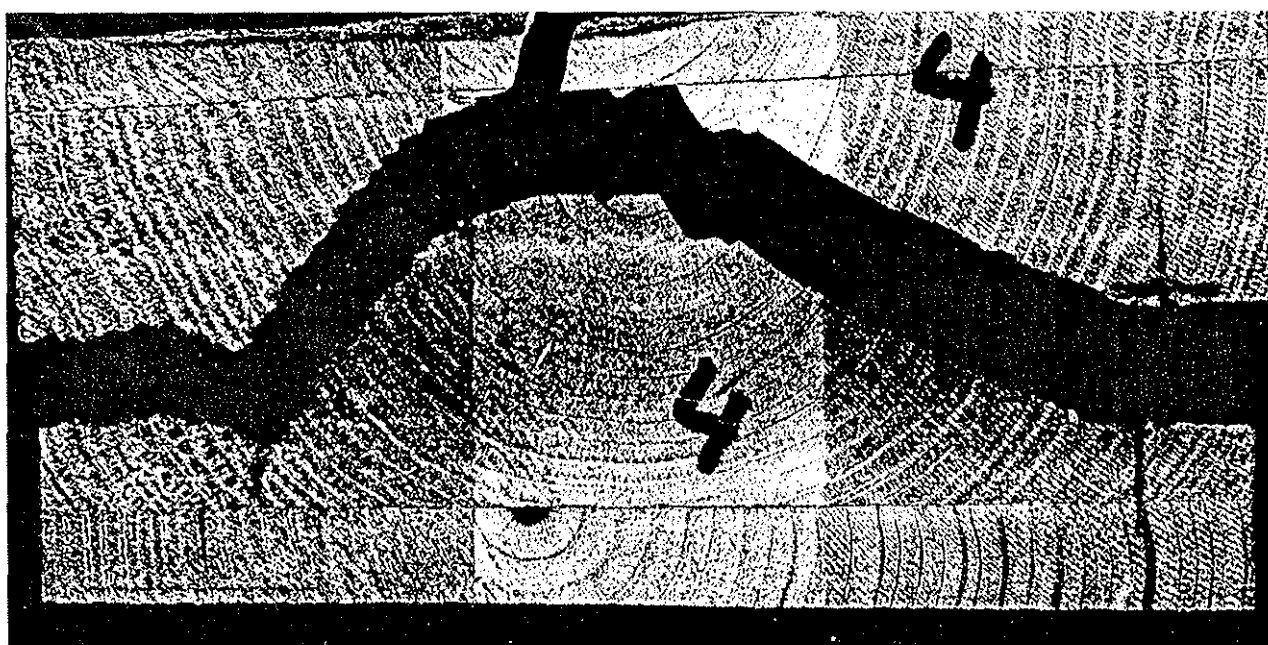
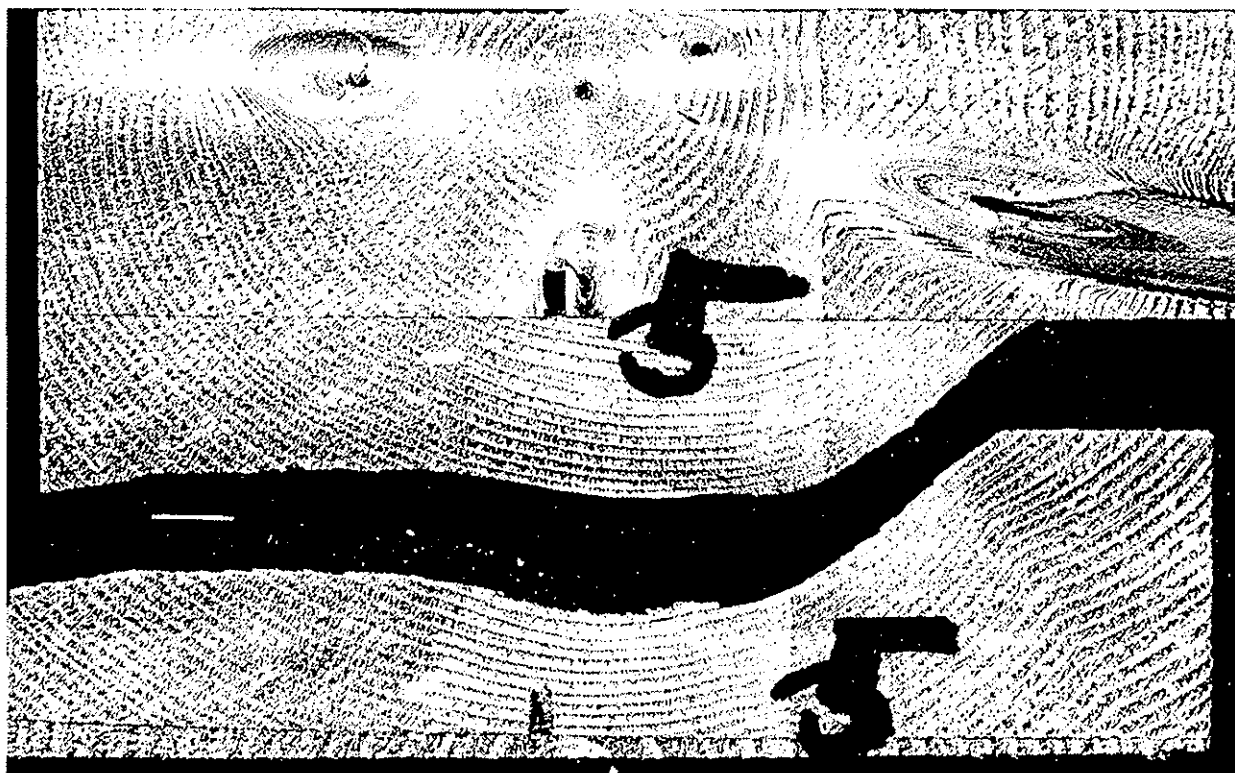
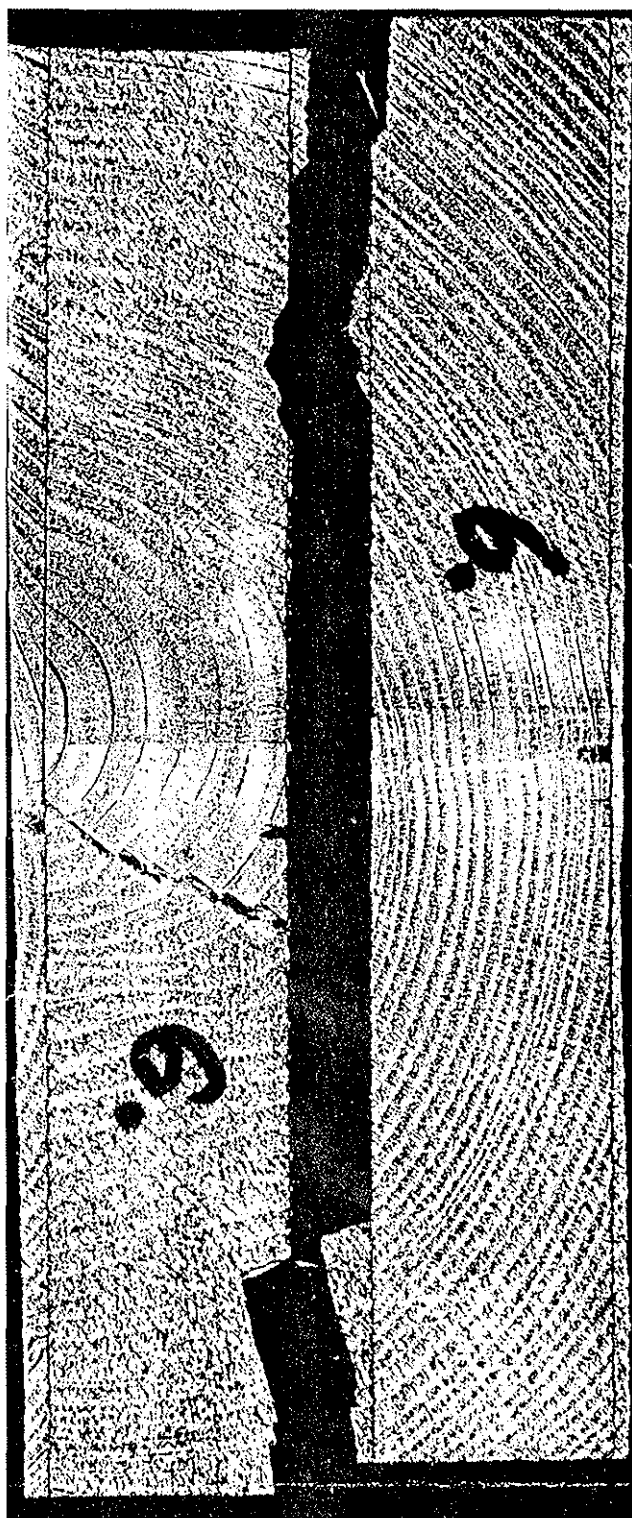


Bild A57: Bruchbild bsh4



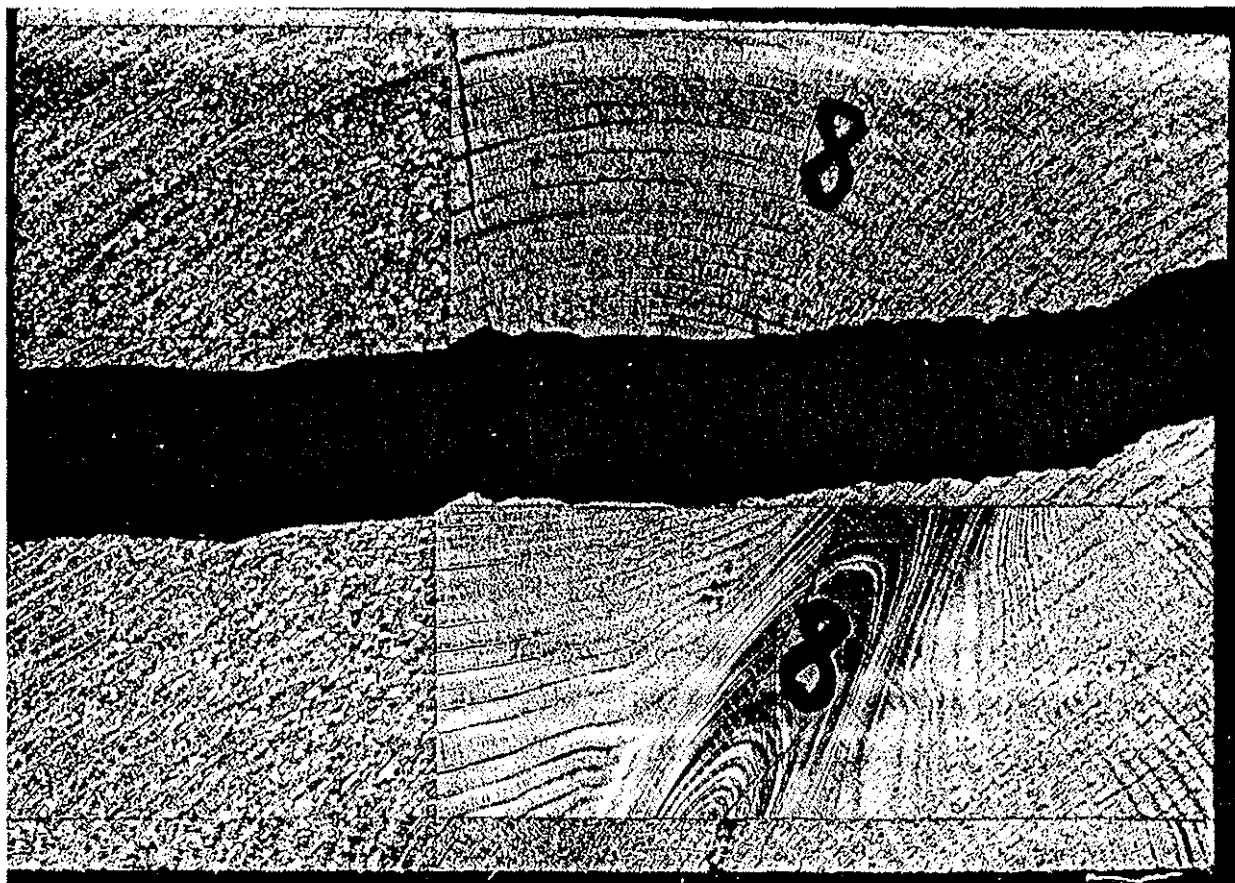


**Bild A58:** Bruchbild bsh5

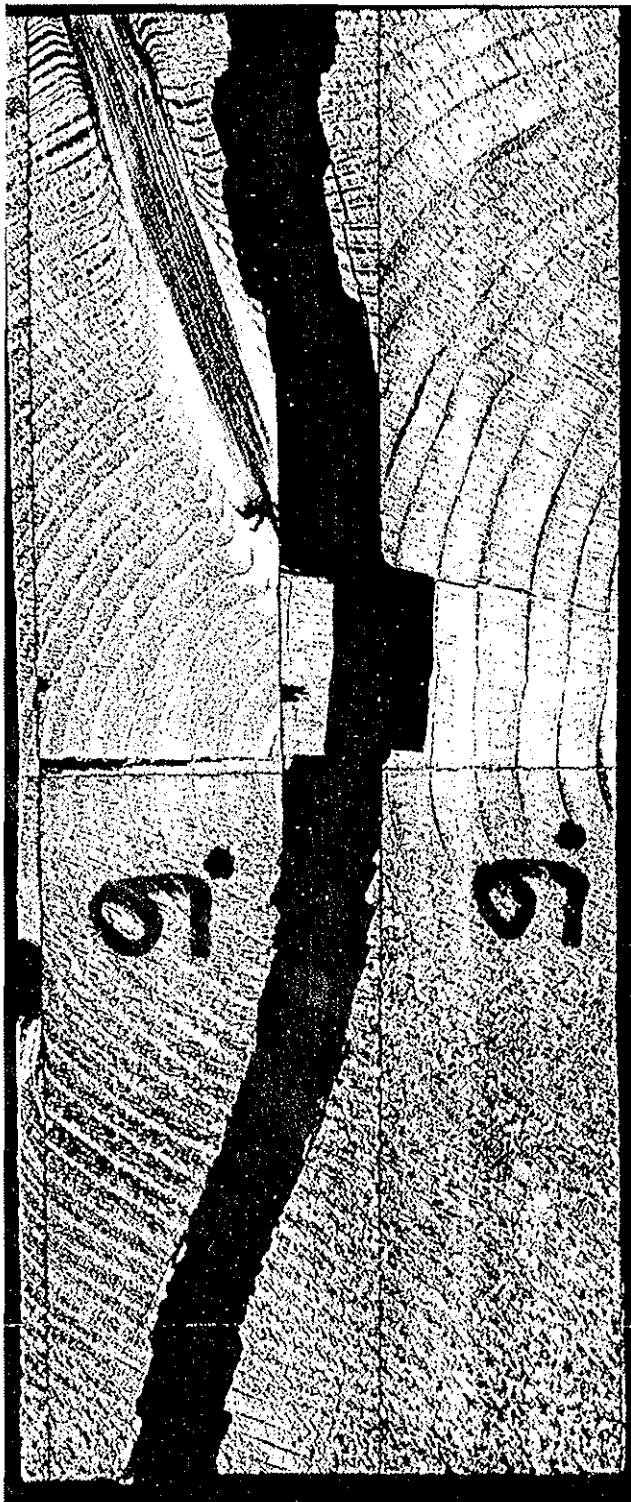


**Bild A59:** Bruchbild bsh6



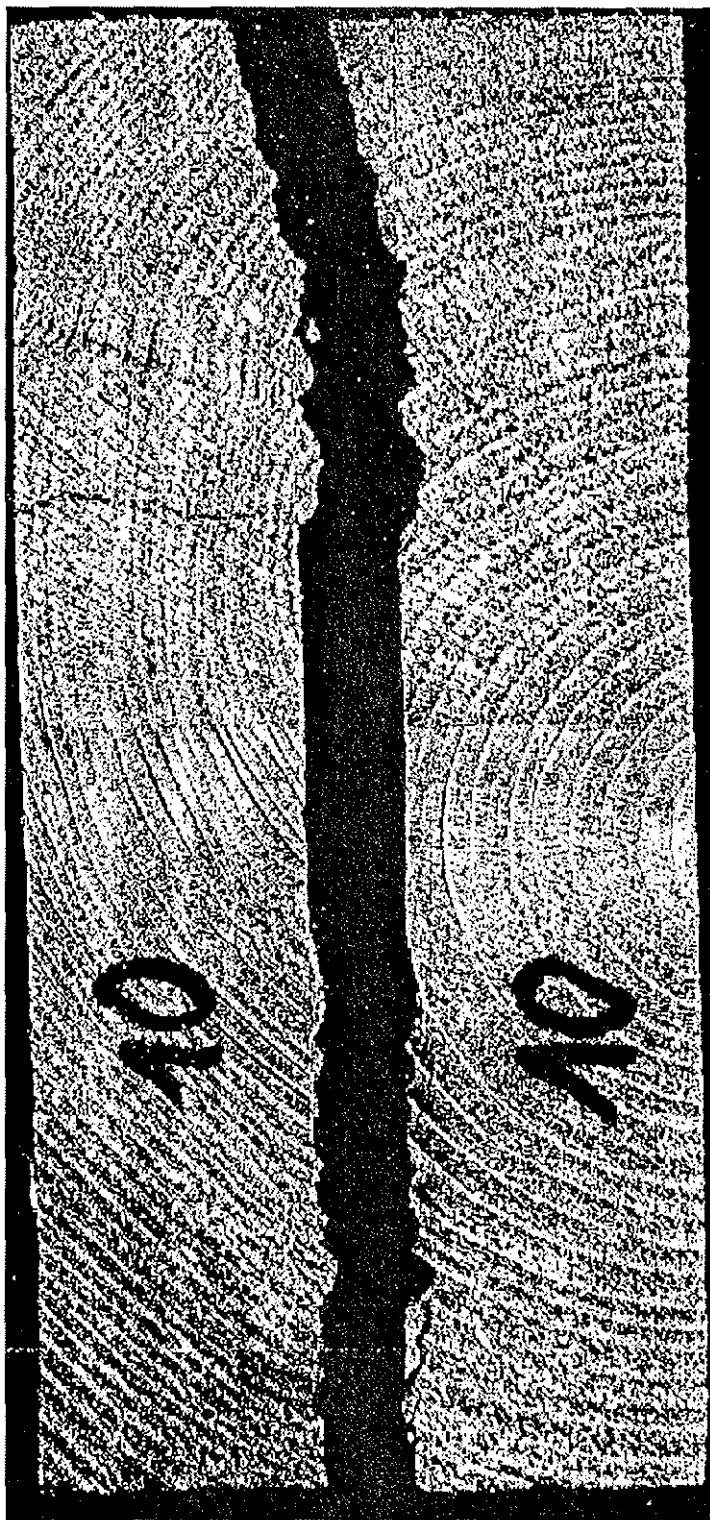


**Bild A60:** Bruchbild bsh8



**Bild A61:** Bruchbild bsh9





**Bild A62:** Bruchbild bsh10

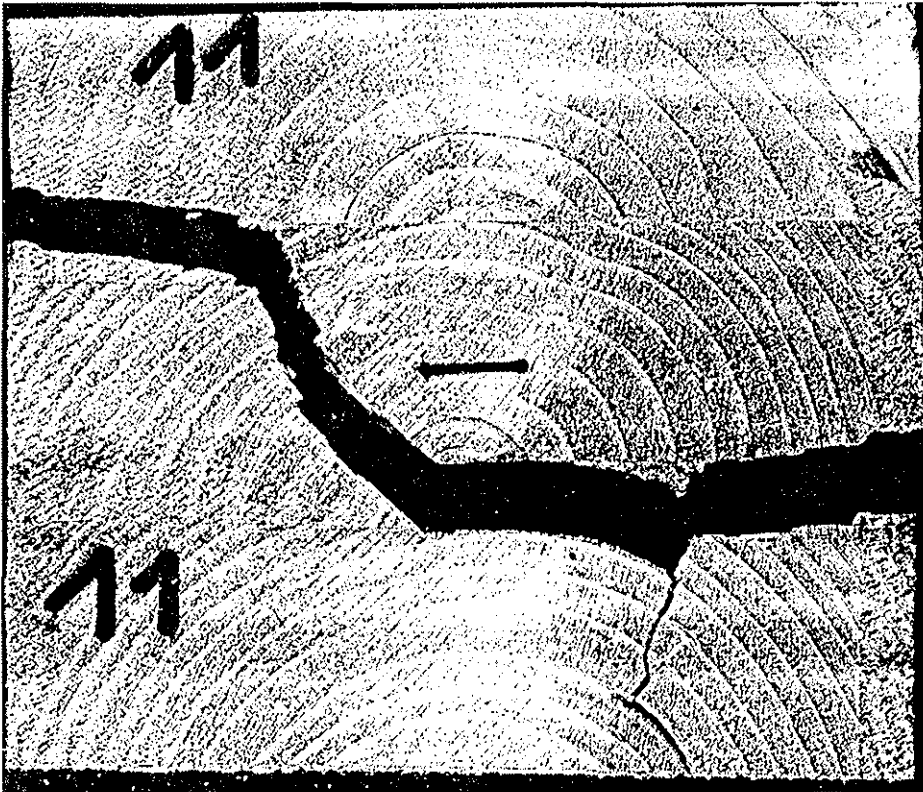


Bild A63: Bruchbild bsh11

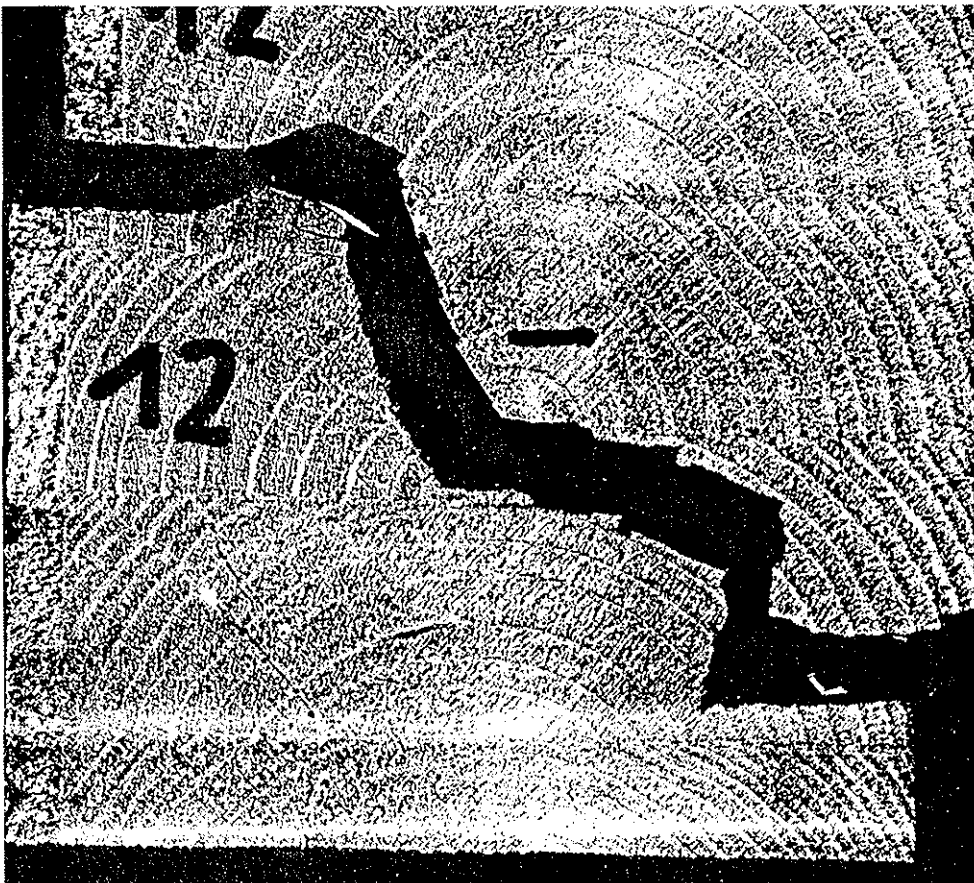


Bild A64: Bruchbild bsh12



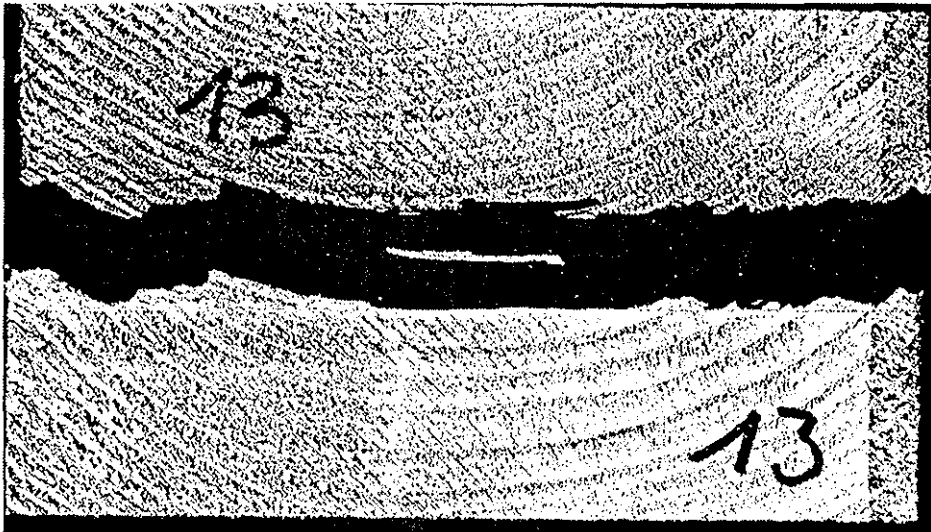


Bild A65: Bruchbild bsh13

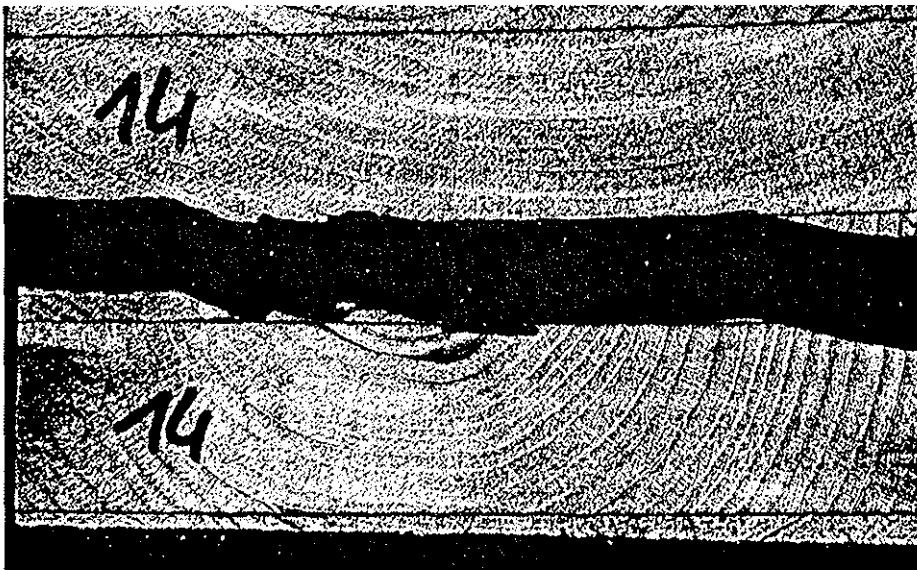


Bild A66: Bruchbild bsh14



Bild A67: Bruchbild bsh15





**Bild A68:** Bruchbild bsh16

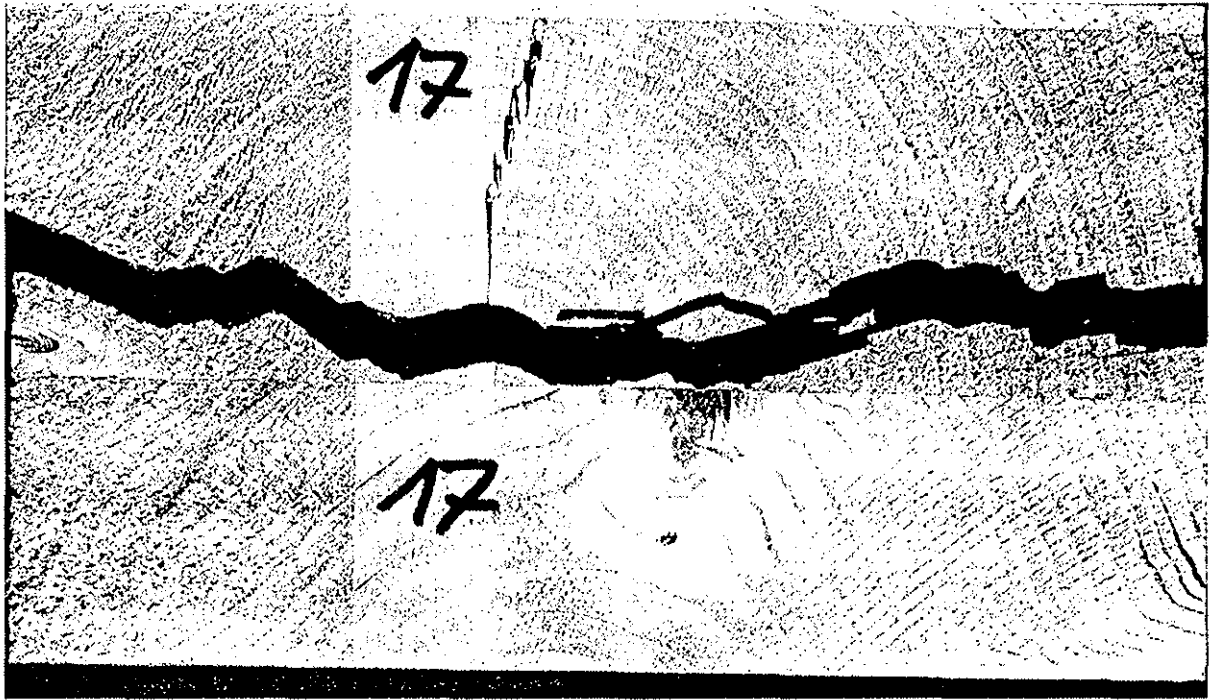


Bild A70: Bruchbild bsh17

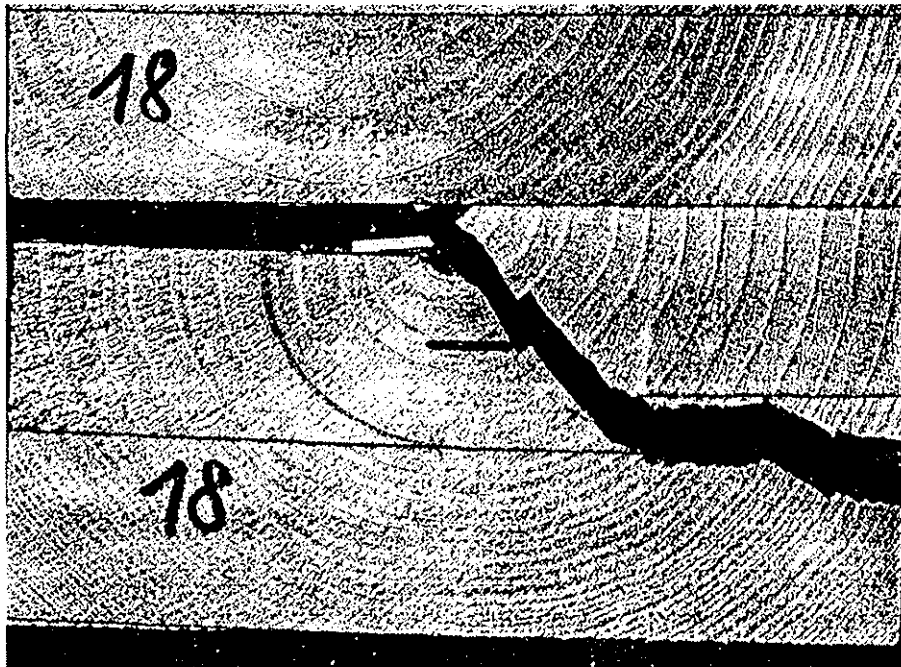


Bild A71: Bruchbild bsh18



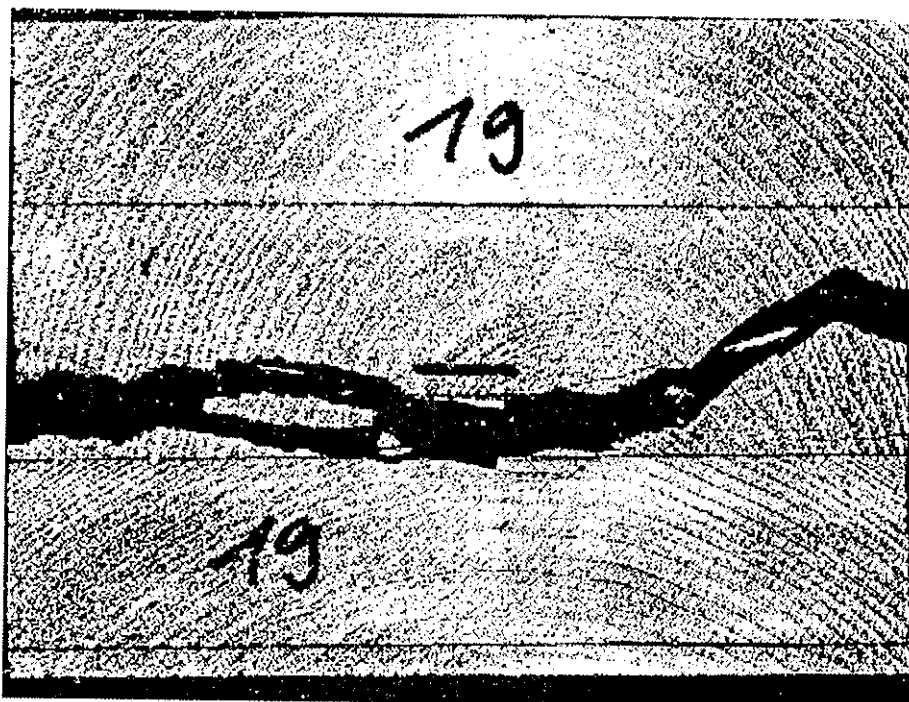


Bild A72: Bruchbild bsh19

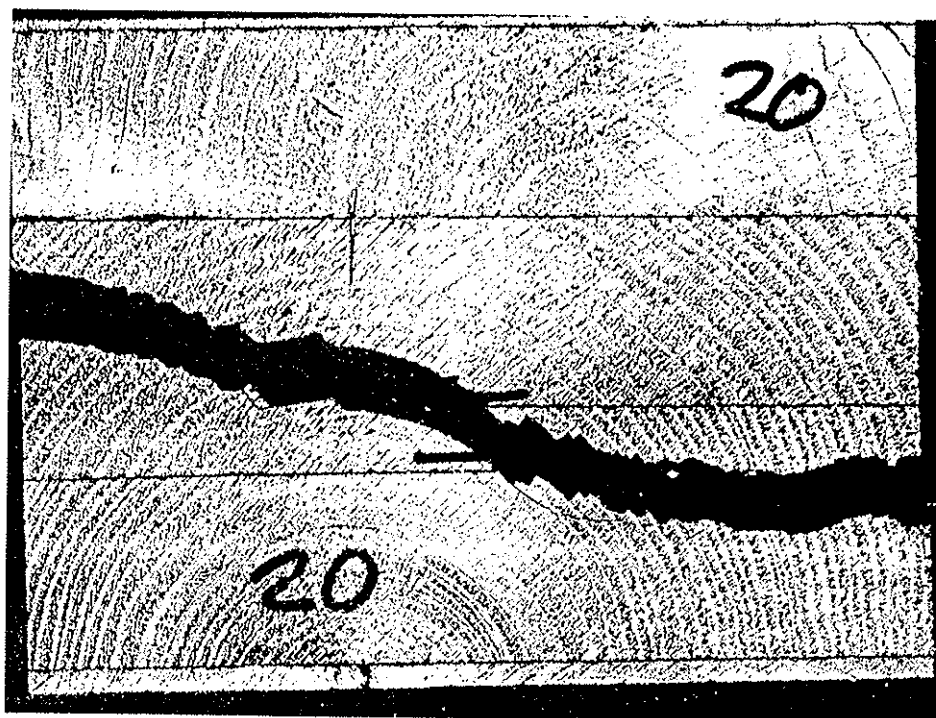


Bild A73: Bruchbild bsh20

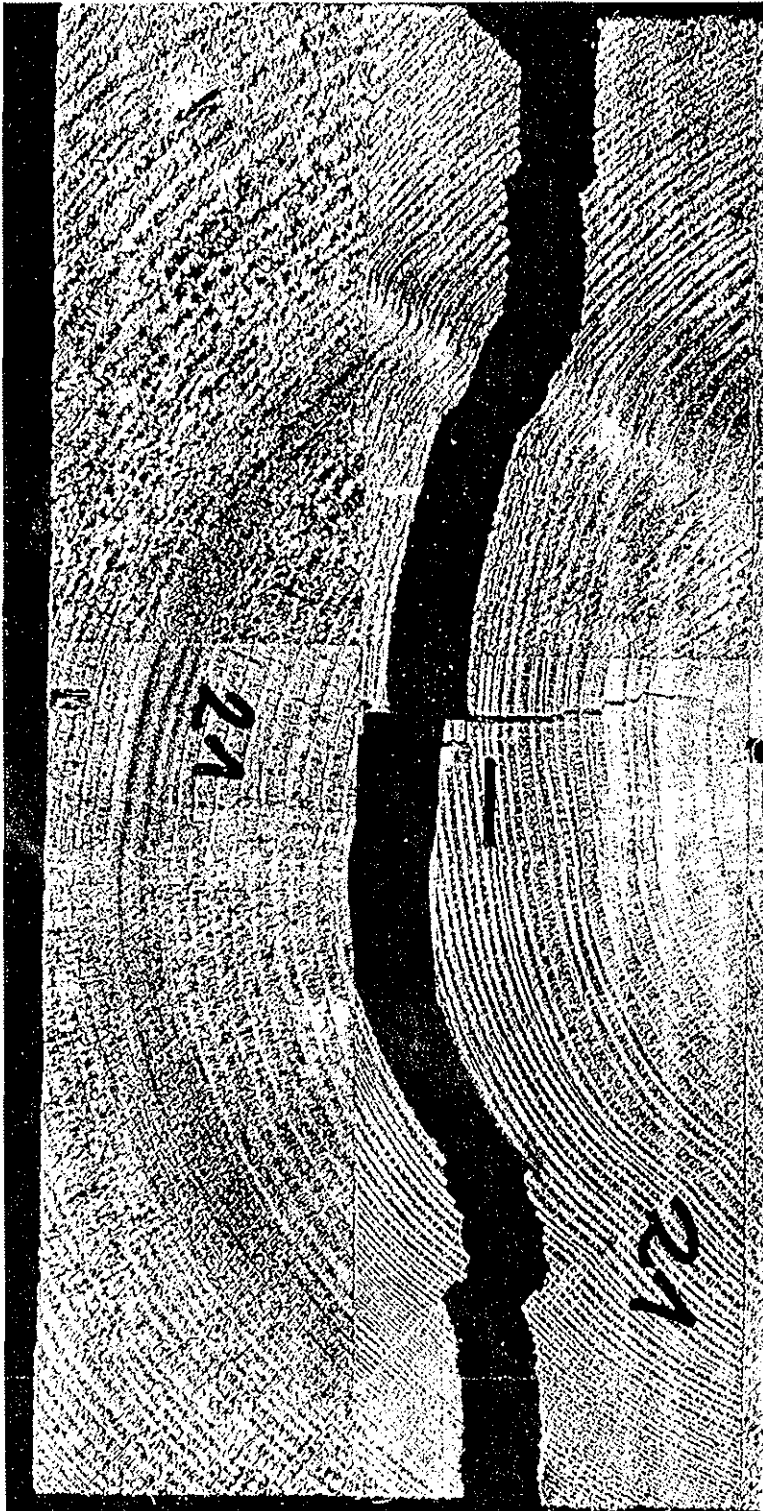


Bild A74: Bruchbild bsh21





**Bild A75:** Bruchbild bsh22

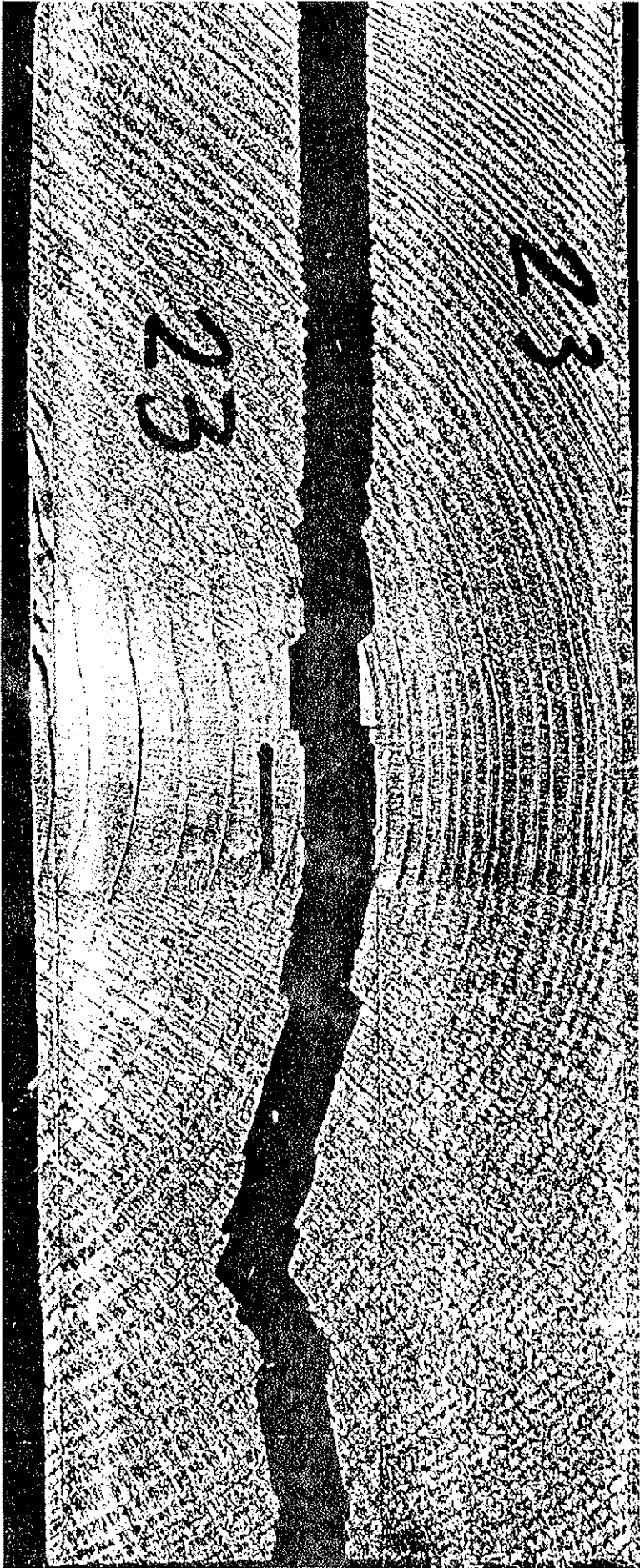
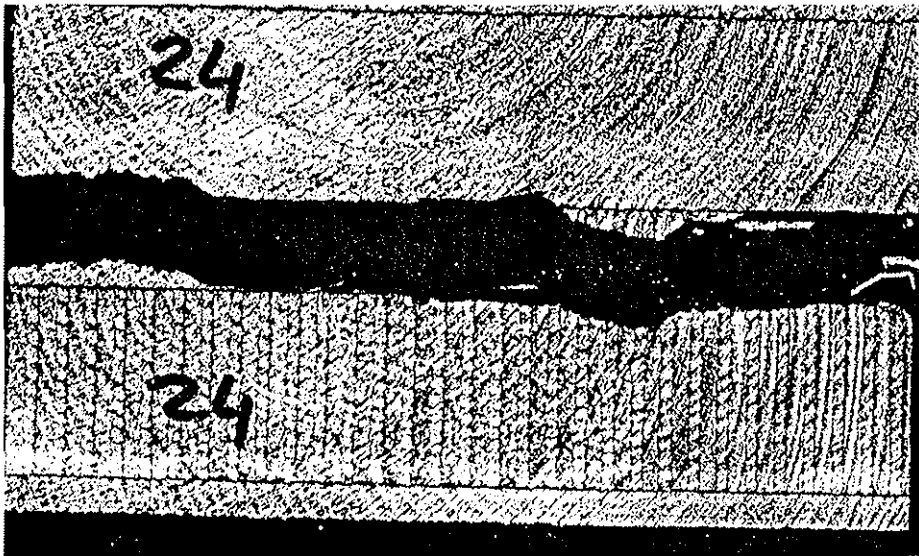
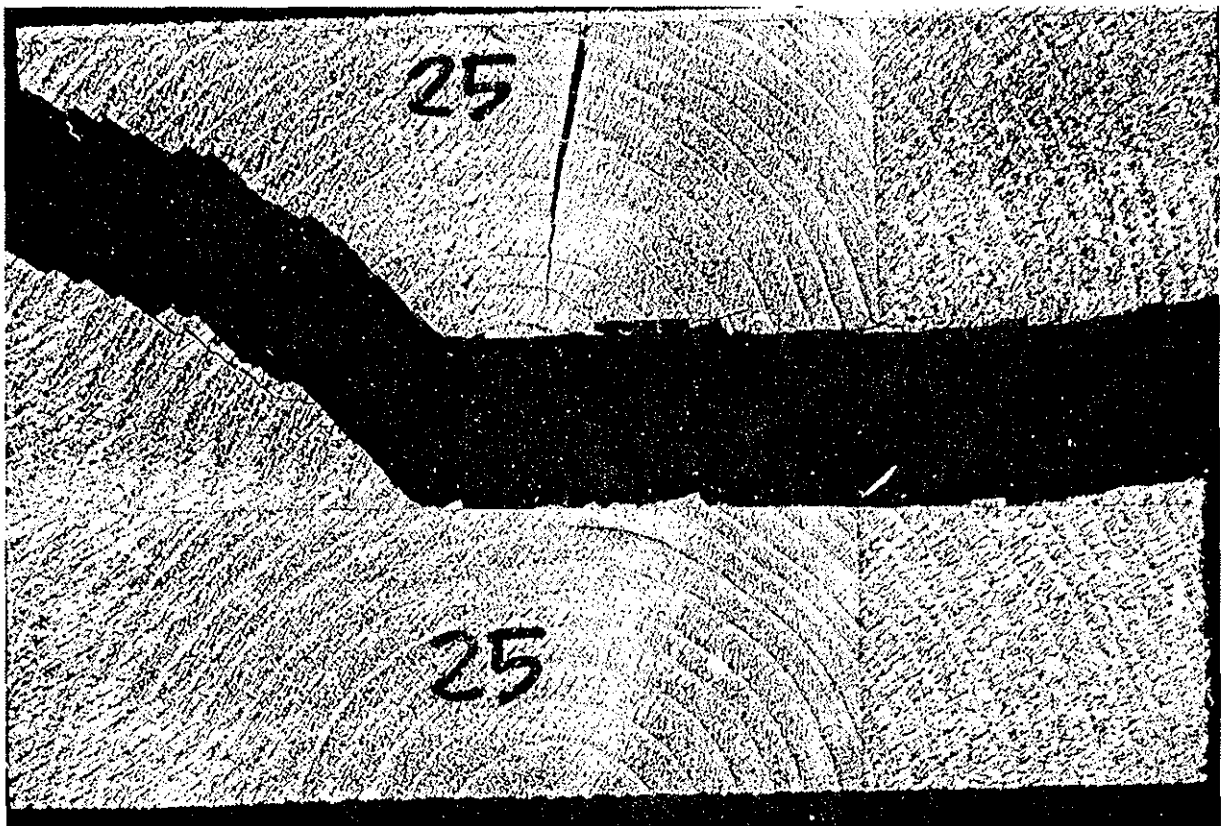


Bild A76: Bruchbild bsh23

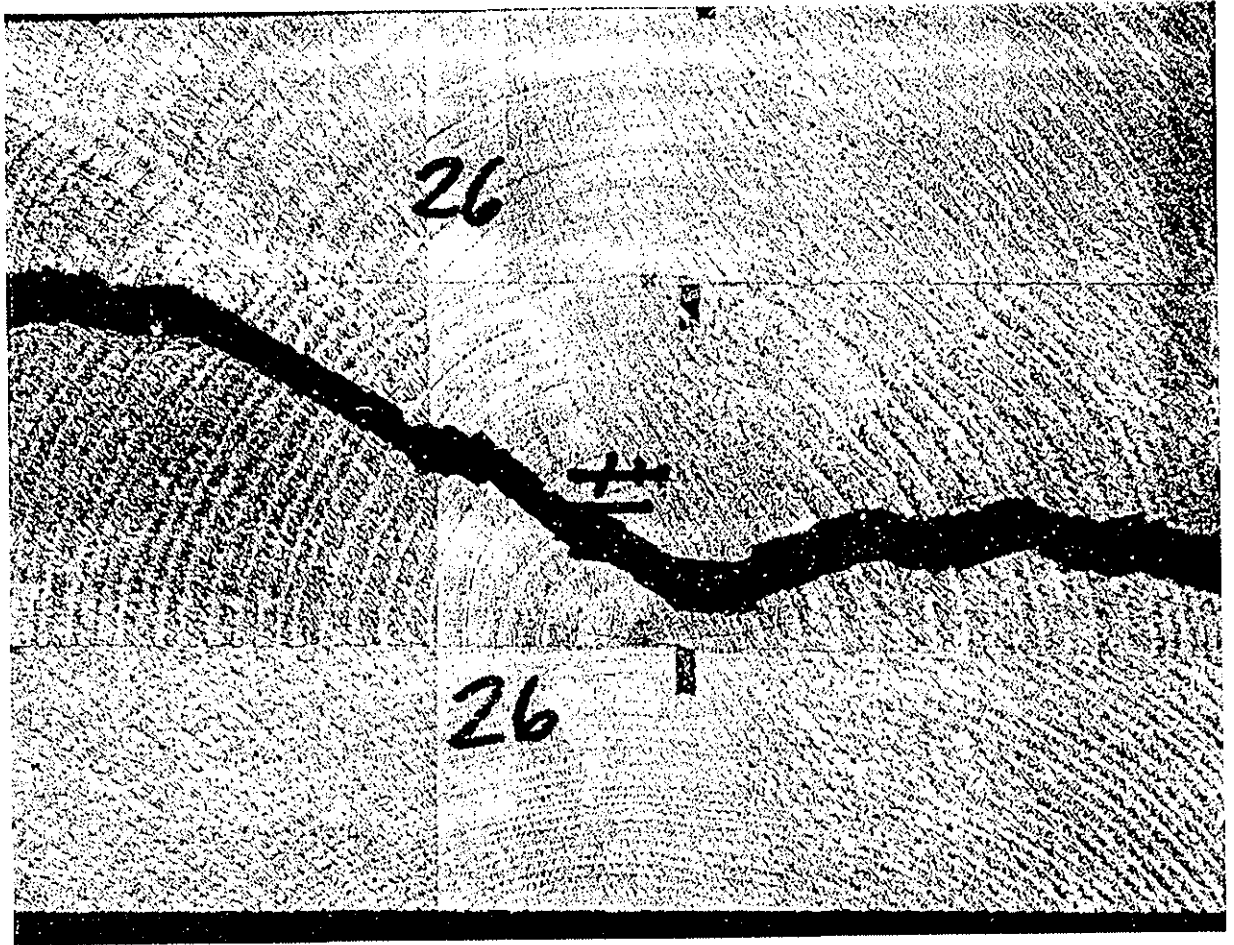




**Bild A77:** Bruchbild bsh24



**Bild A78:** Bruchbild bsh25



**Bild A79:** Bruchbild bsh26



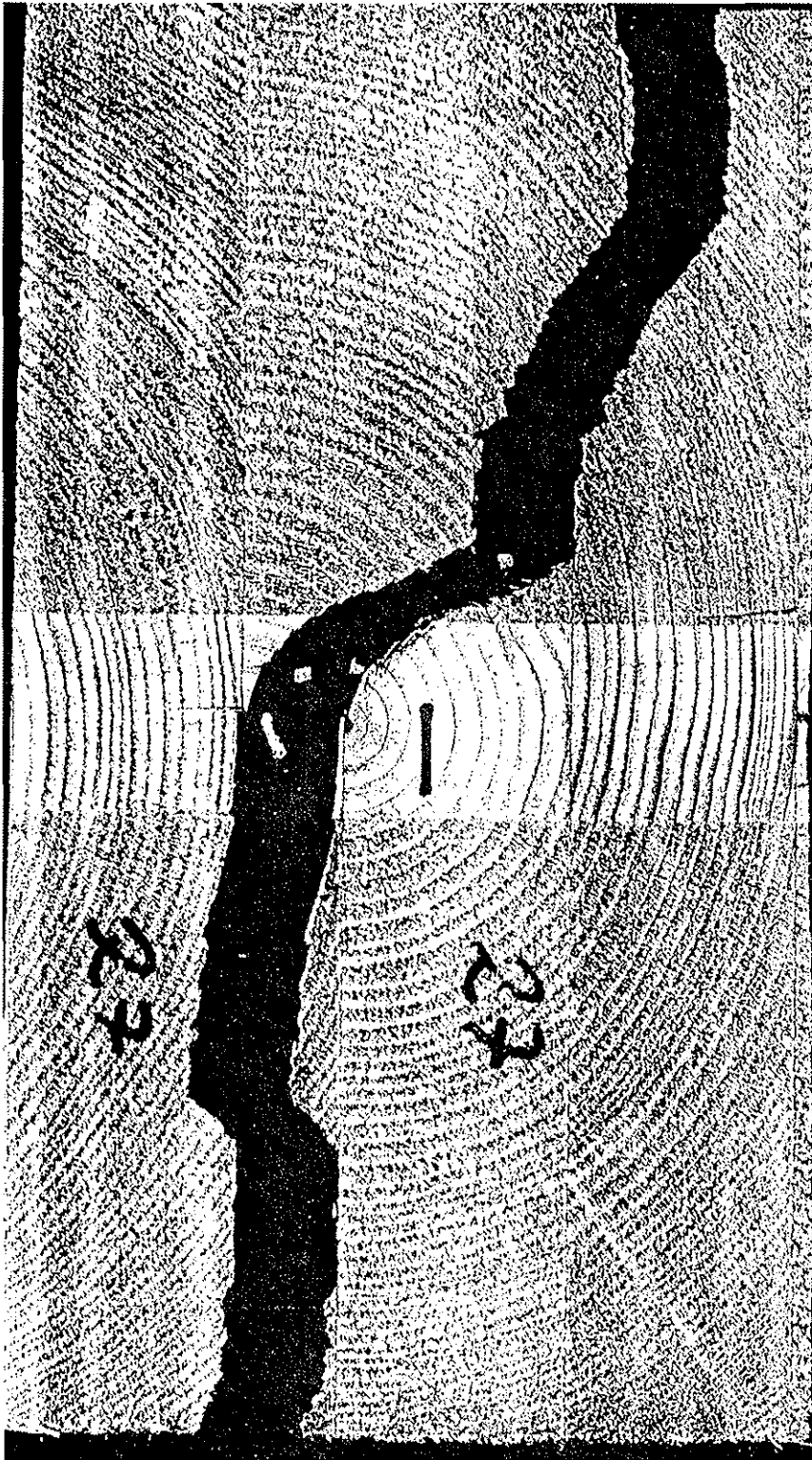
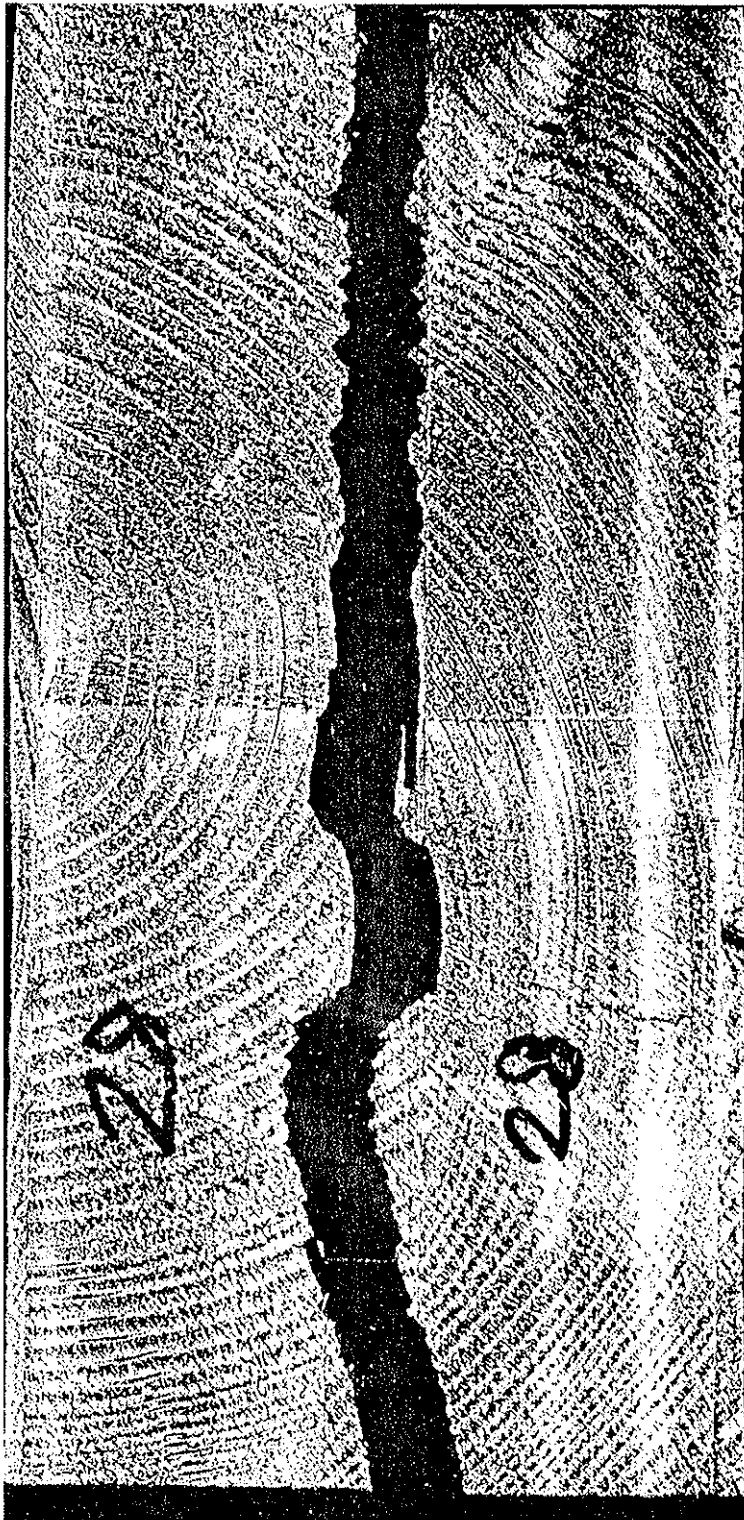


Bild A80: Bruchbild bsh27



**Bild A81:** Bruchbild bsh28



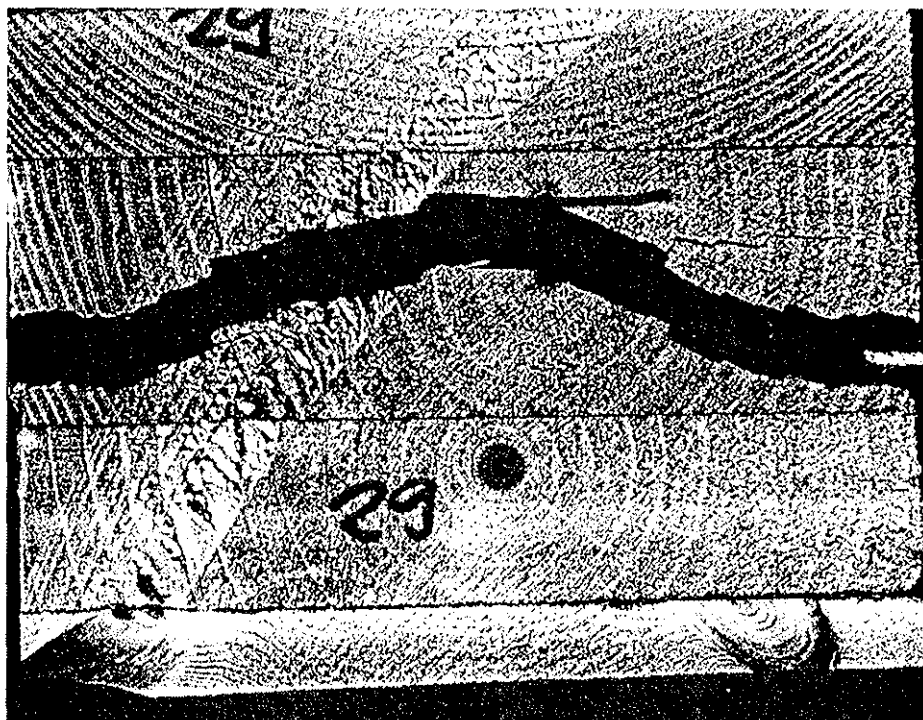


Bild A82: Bruchbild bsh29

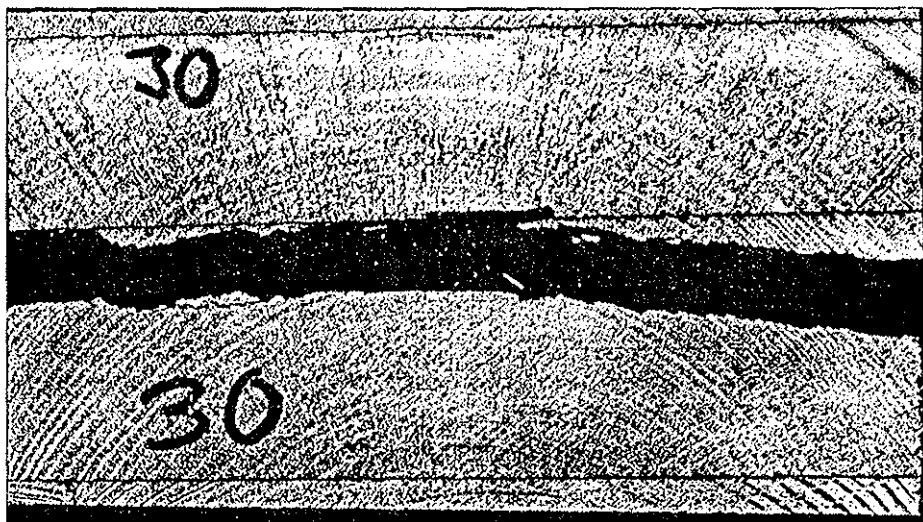
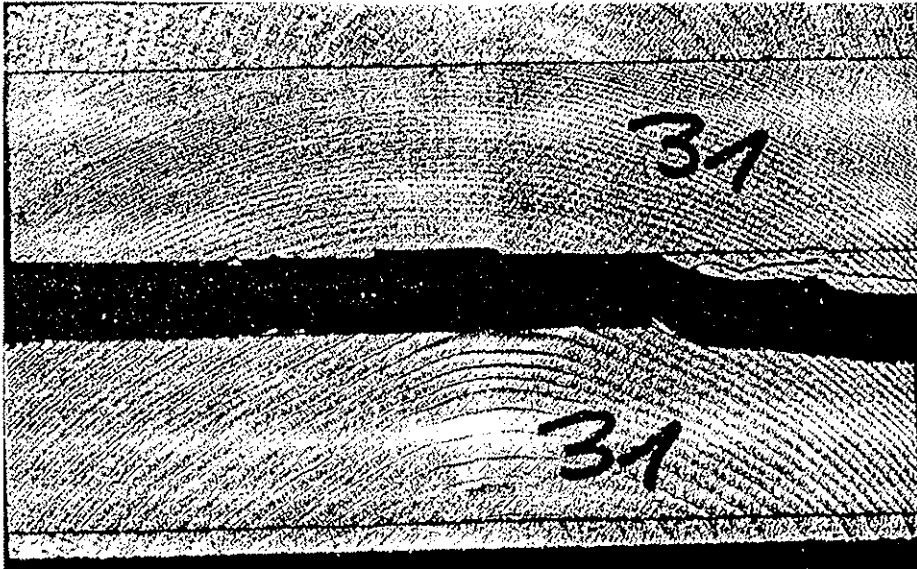
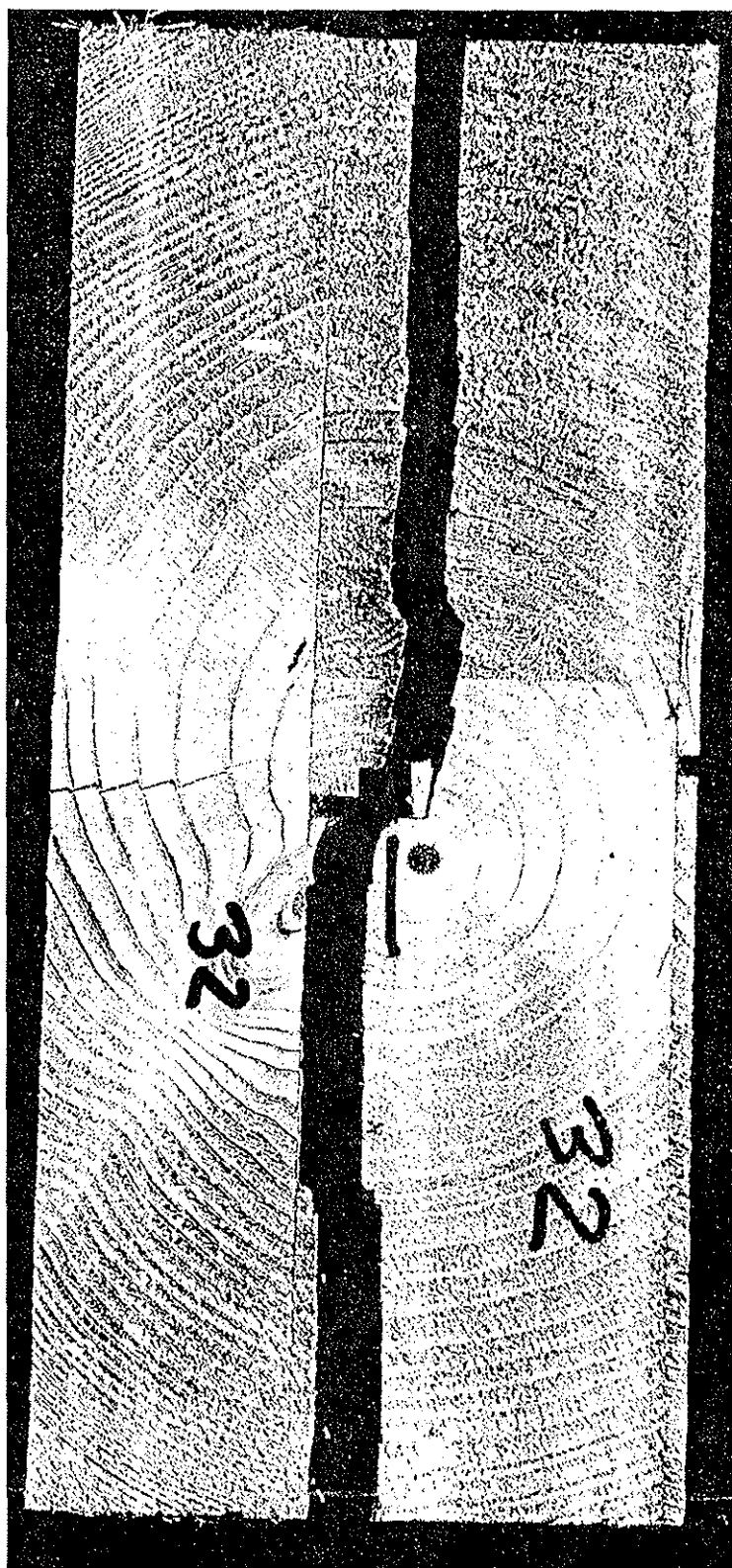


Bild A83: Bruchbild bsh30



**Bild A84:** Bruchbild bsh31





**Bild A85:** Bruchbild bsh32

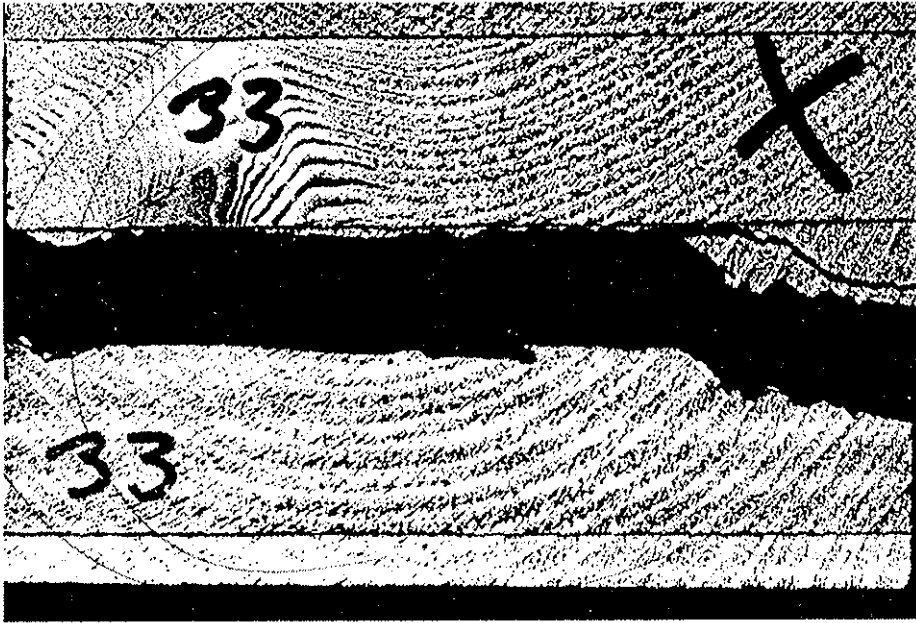


Bild A86: Bruchbild bsh33



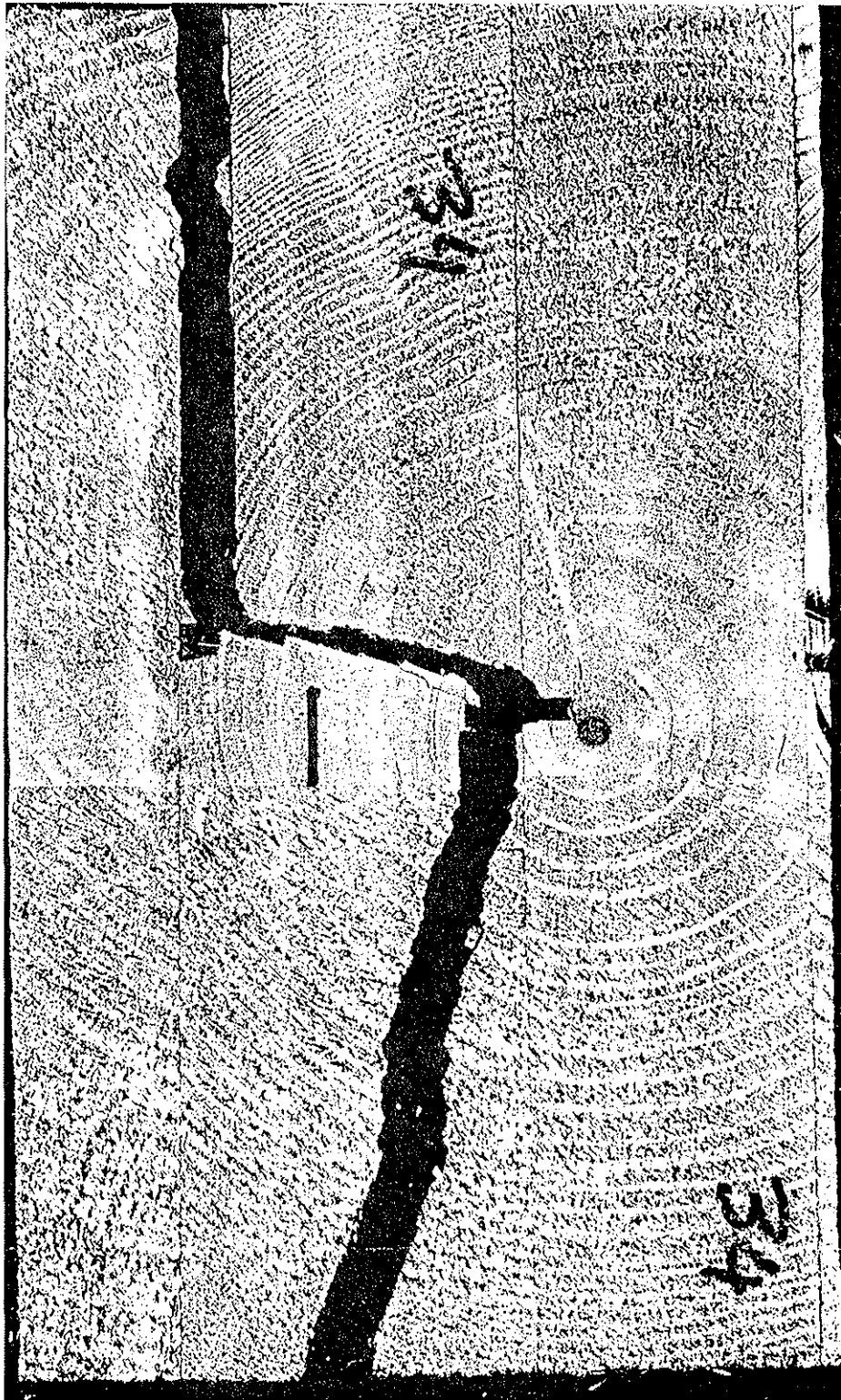


Bild A87: Bruchbild bsh34



Bild A88: Bruchbild bsh35



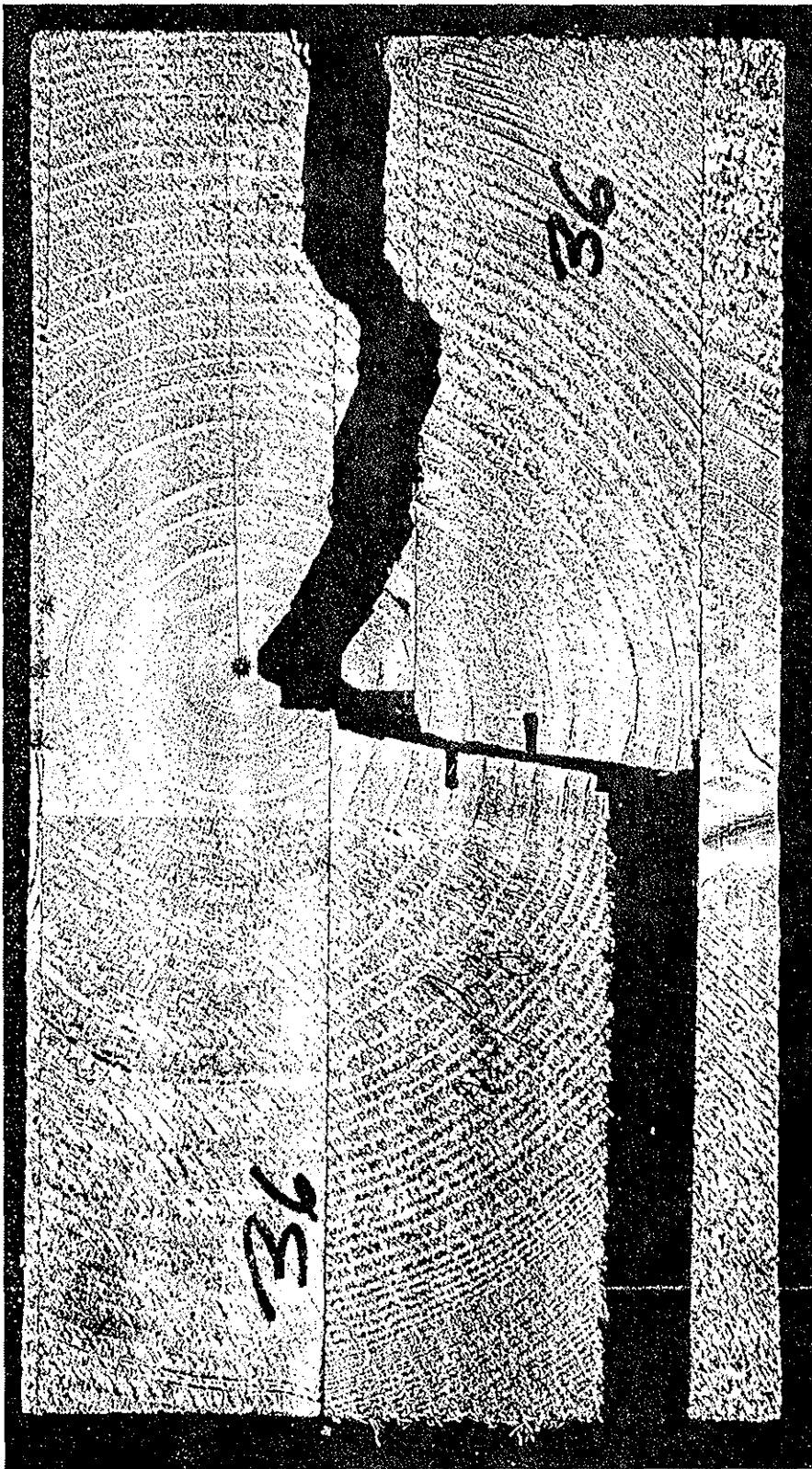
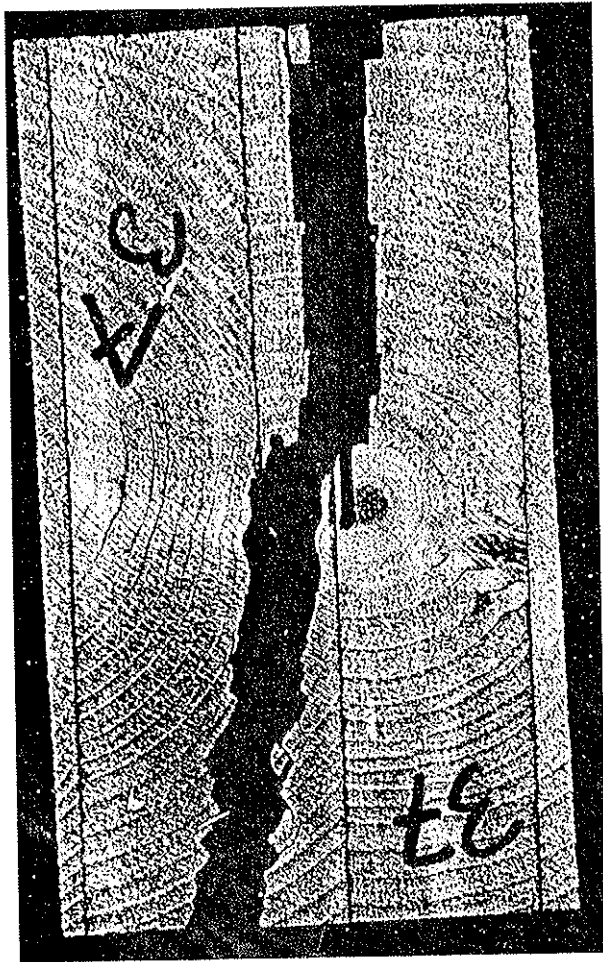
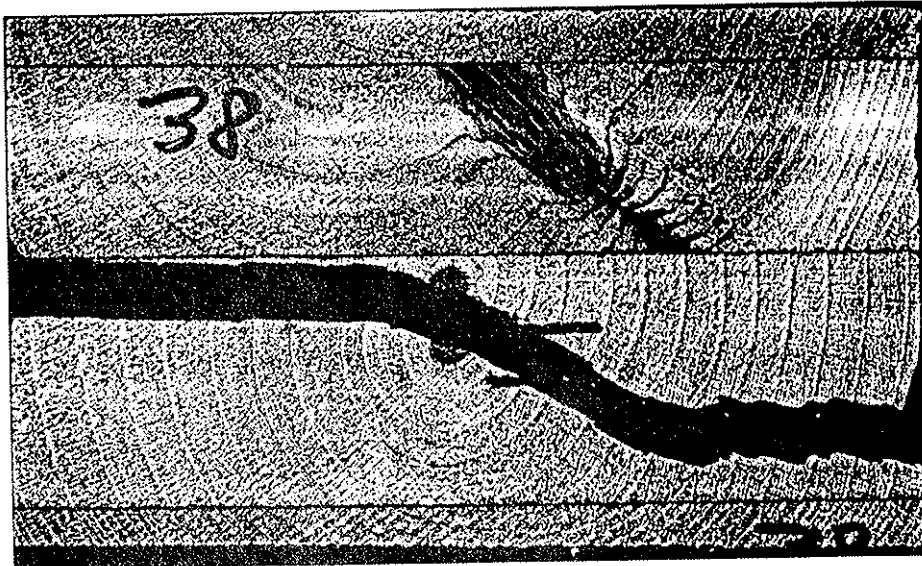


Bild A89: Bruchbild bsh36

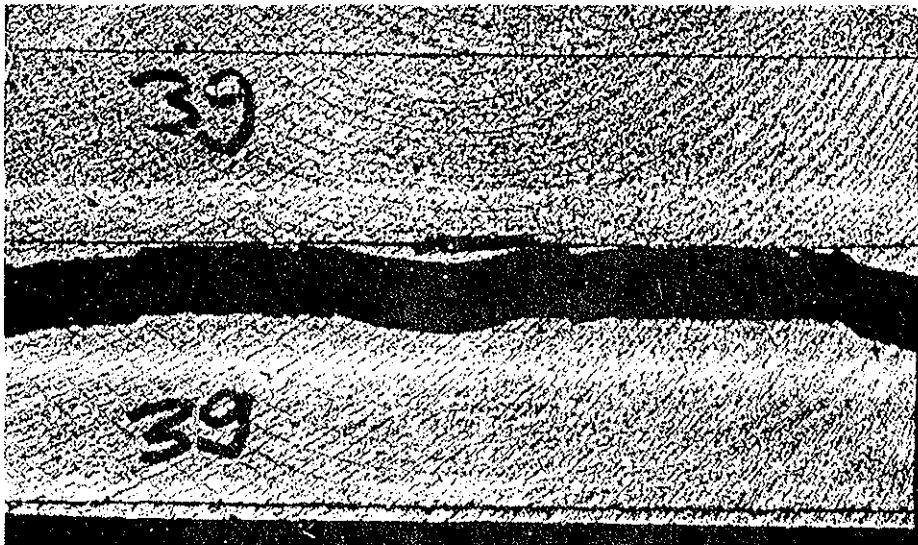


**Bild A90:** Bruchbild bsh37

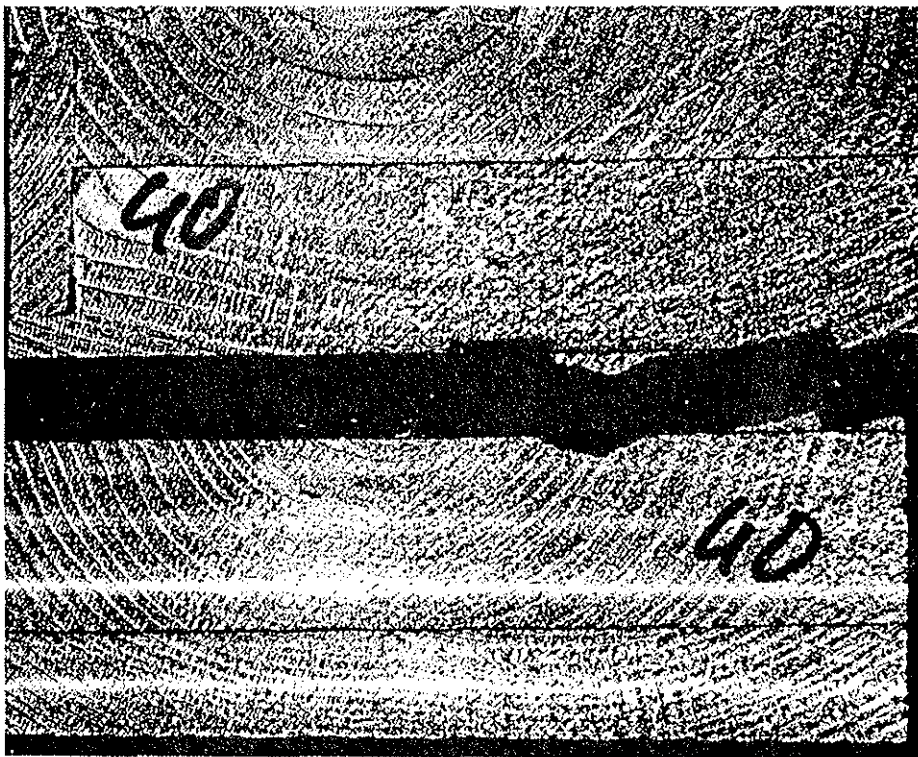


**Bild A91:** Bruchbild bsh38





**Bild A92:** Bruchbild bsh39



**Bild A93:** Bruchbild bsh40

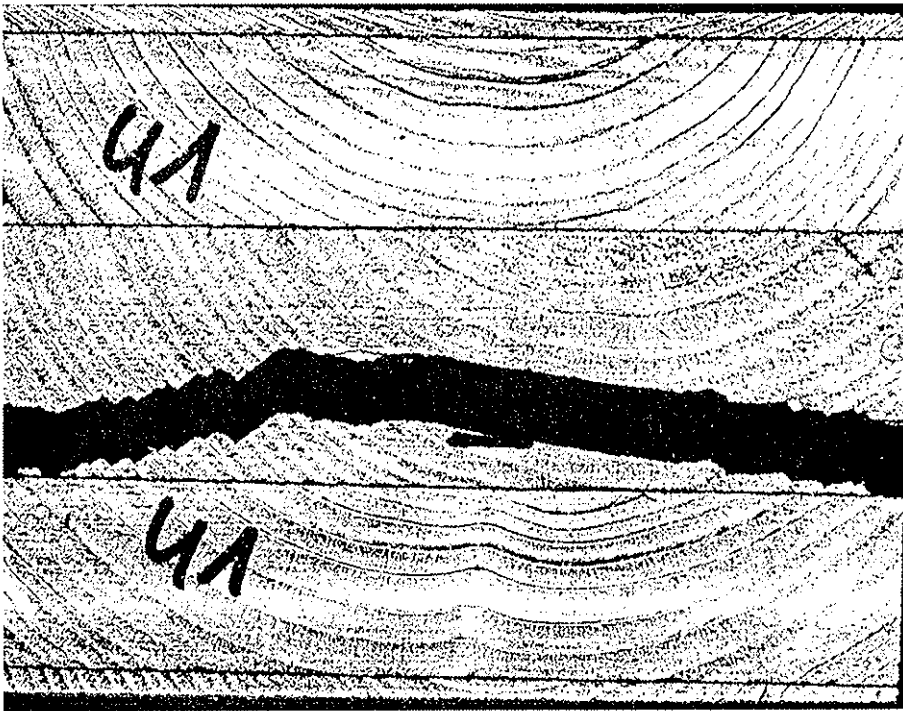


Bild A94: Bruchbild bsh41

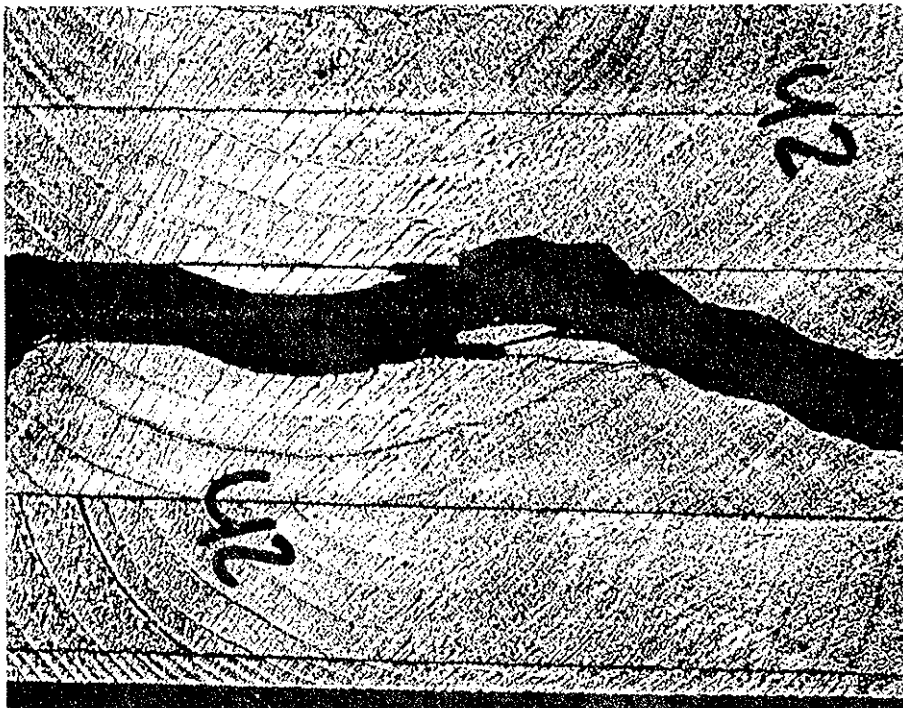
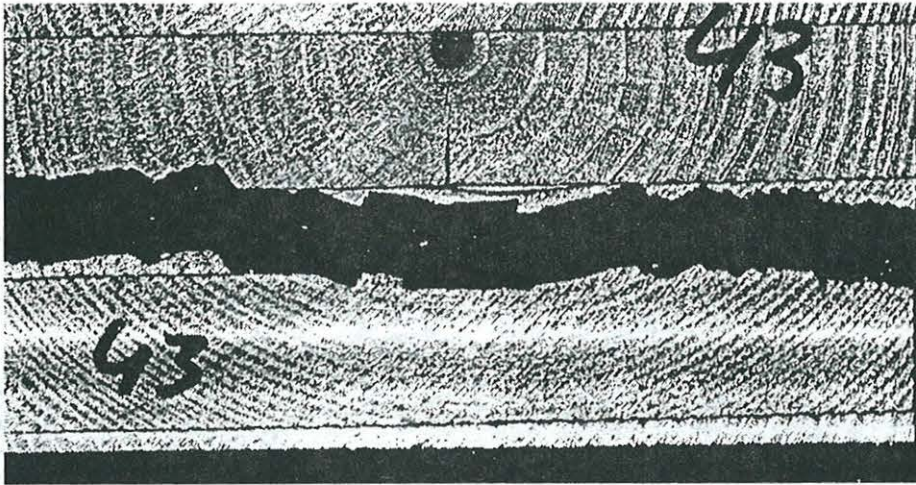


Bild A95: Bruchbild bsh42





**Bild A96:** Bruchbild bsh43

Die Versuche bsh44 – bsh48 wurden nicht durchgeführt, siehe auch Tabelle A2

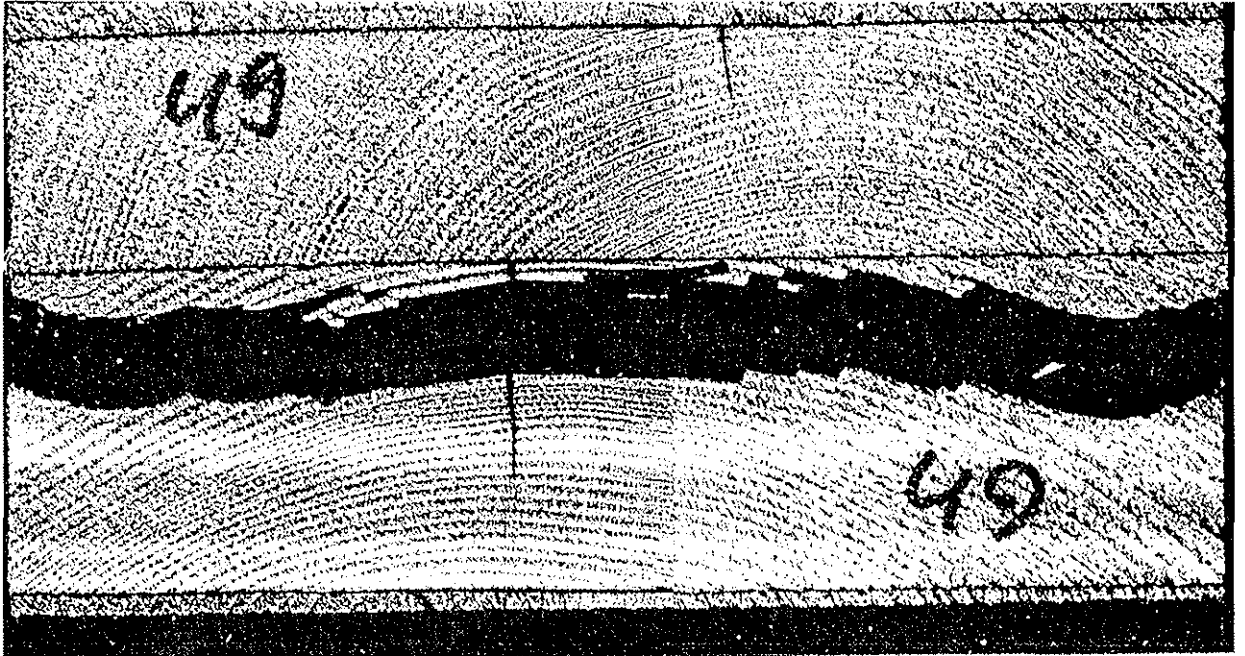


Bild A97: Bruchbild bsh49

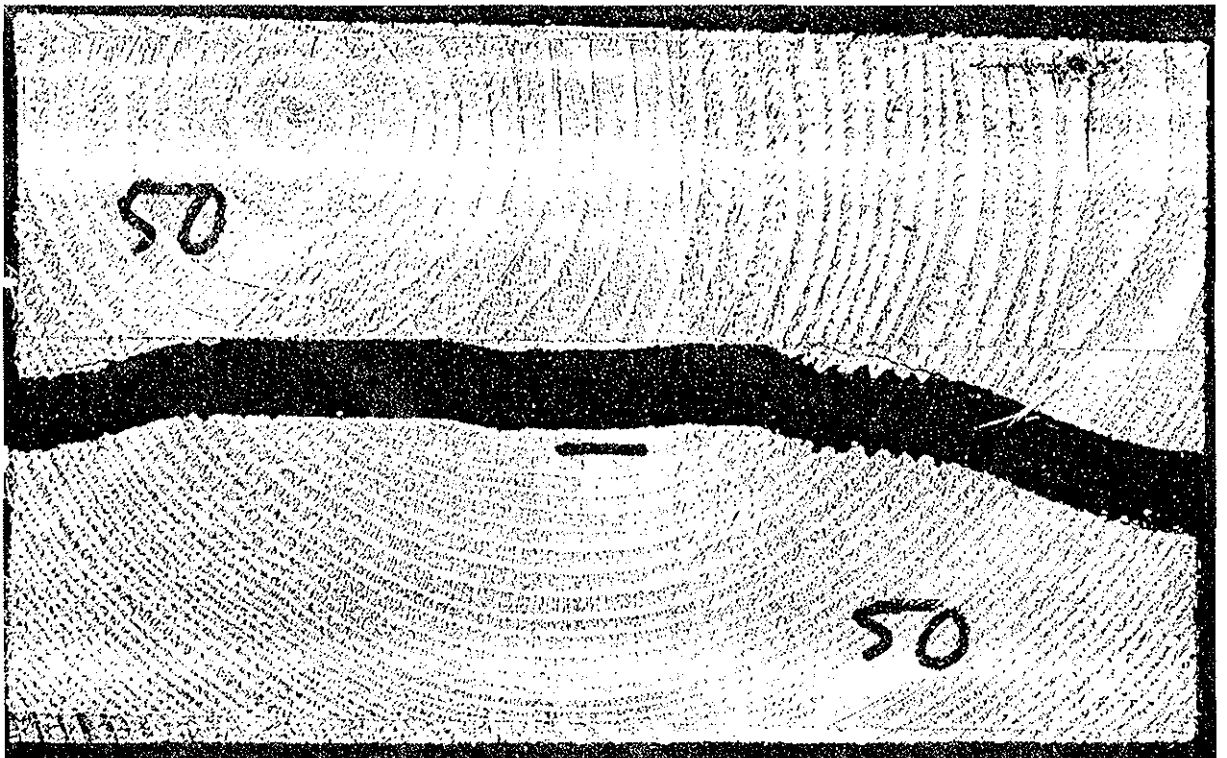
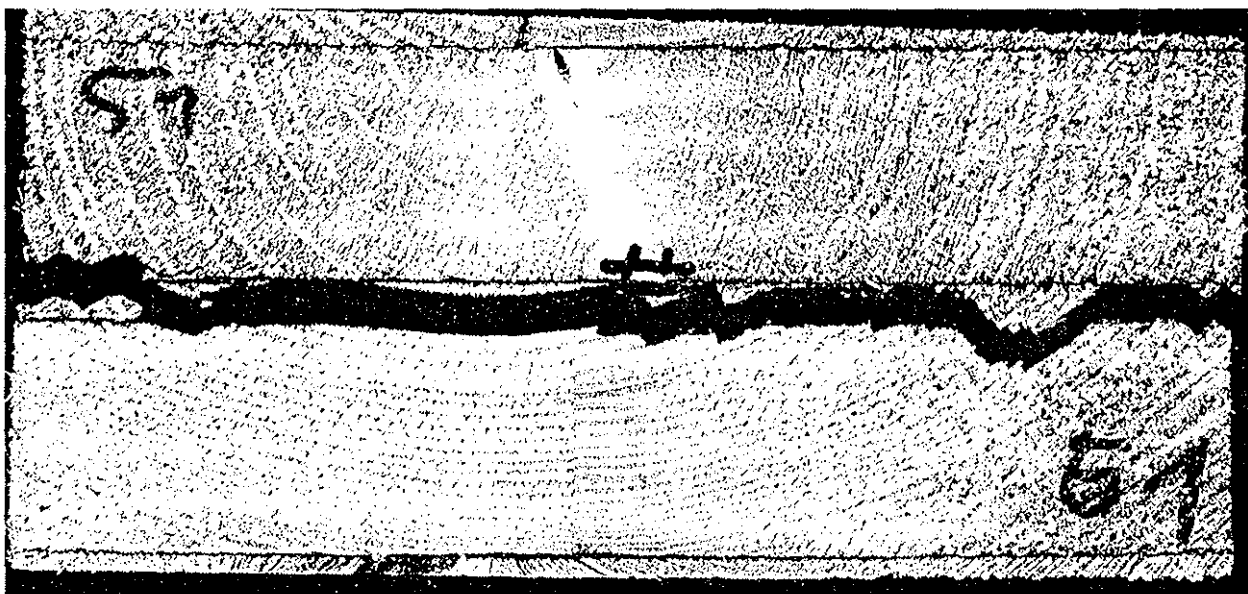
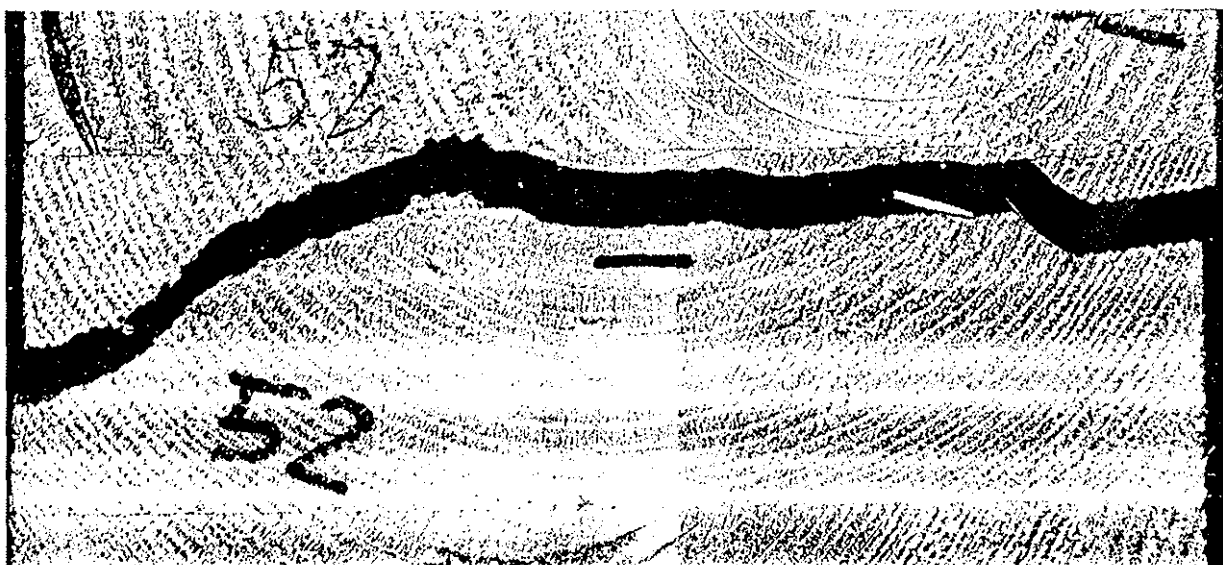


Bild A98: Bruchbild bsh50





**Bild A99:** Bruchbild bsh51



**Bild A100:** Bruchbild bsh52

Bild fehlt

**Bild A101:** Bruchbild bsh53



**Bild A105:** Bruchbild bsh57



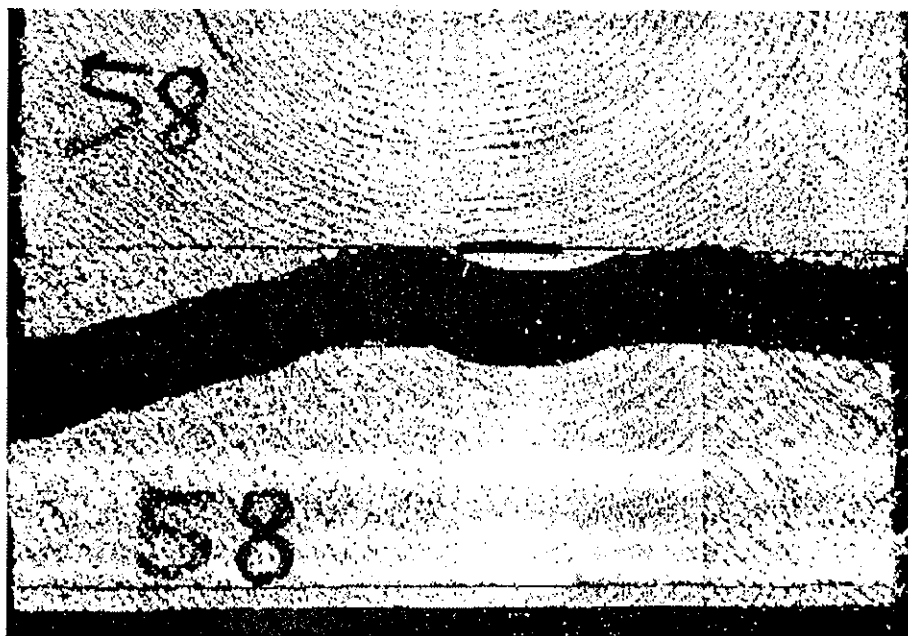


Bild A106: Bruchbild bsh58

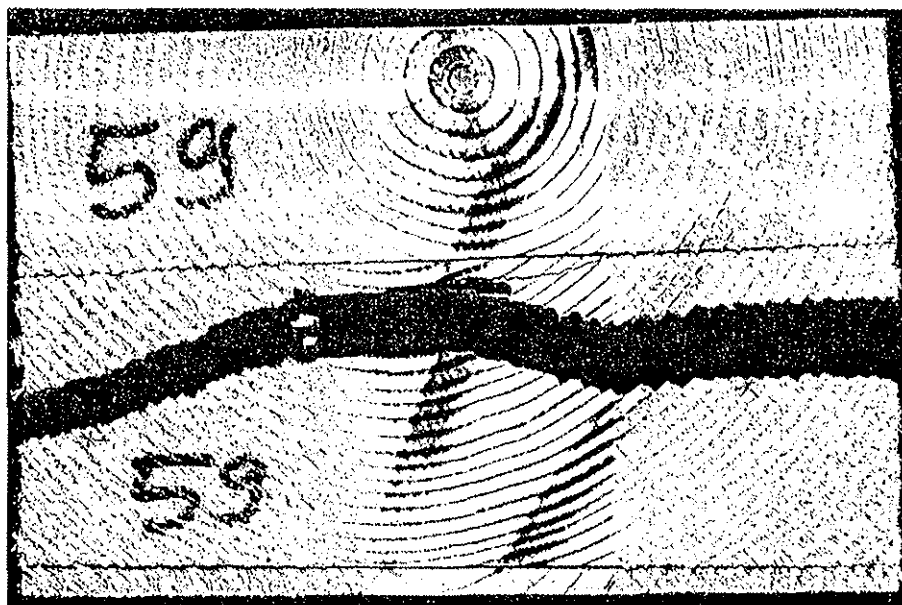
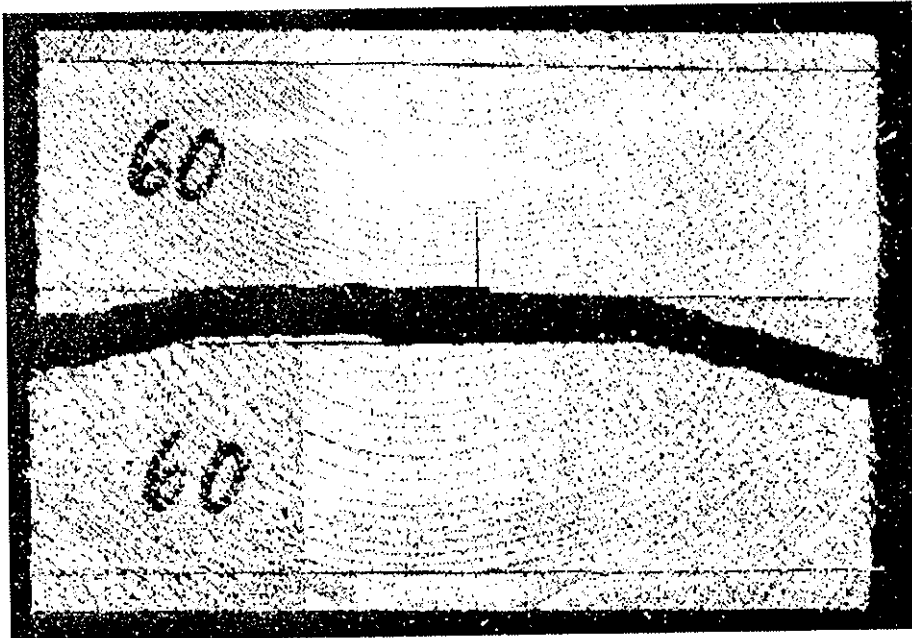
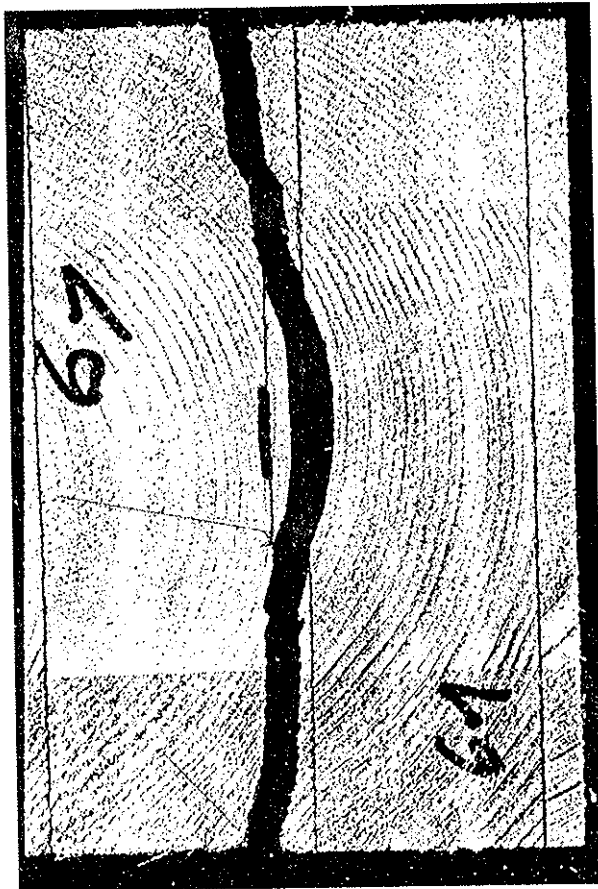


Bild A107: Bruchbild bsh59

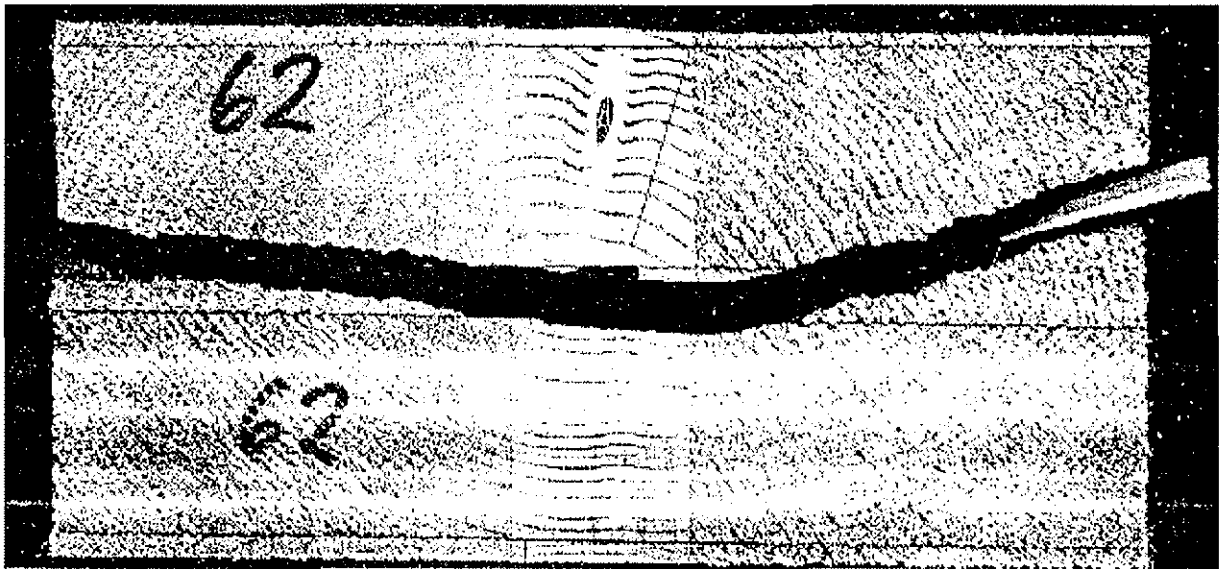


**Bild A108:** Bruchbild Bsh60

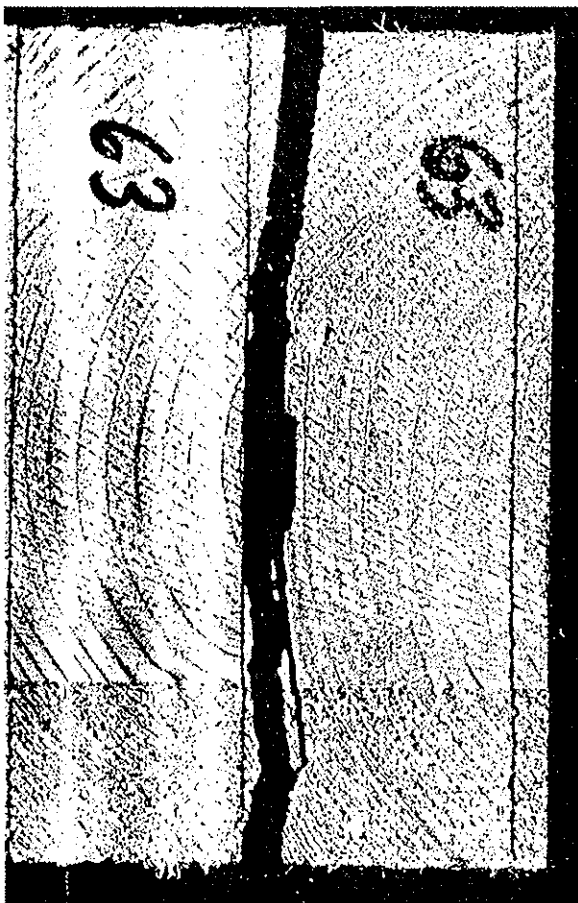


**Bild A109:** Bruchbild bsh61





**Bild A110:** Bruchbild bsh62



**Bild A111:** Bruchbild bsh63

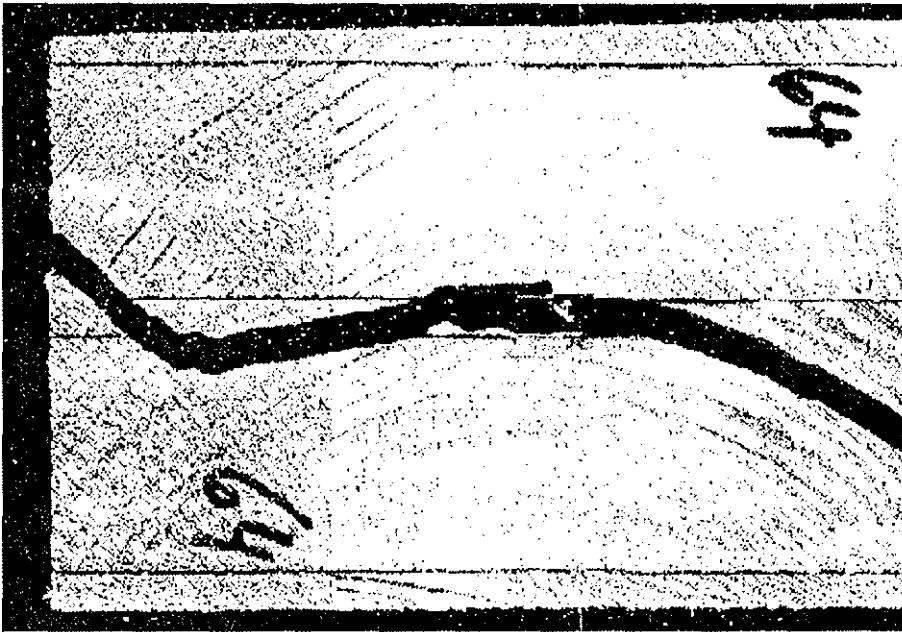


Bild A112: Bruchbild bsh64

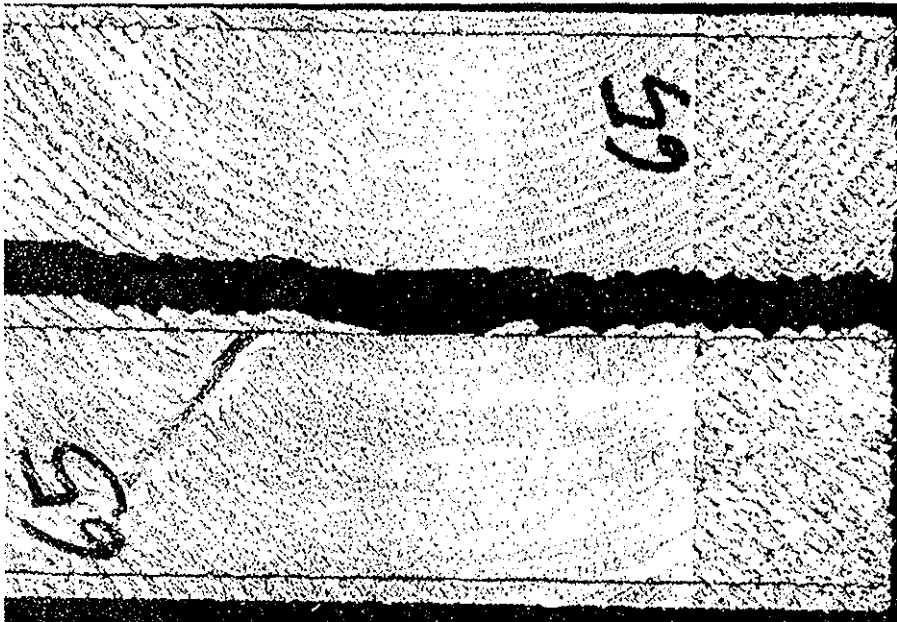
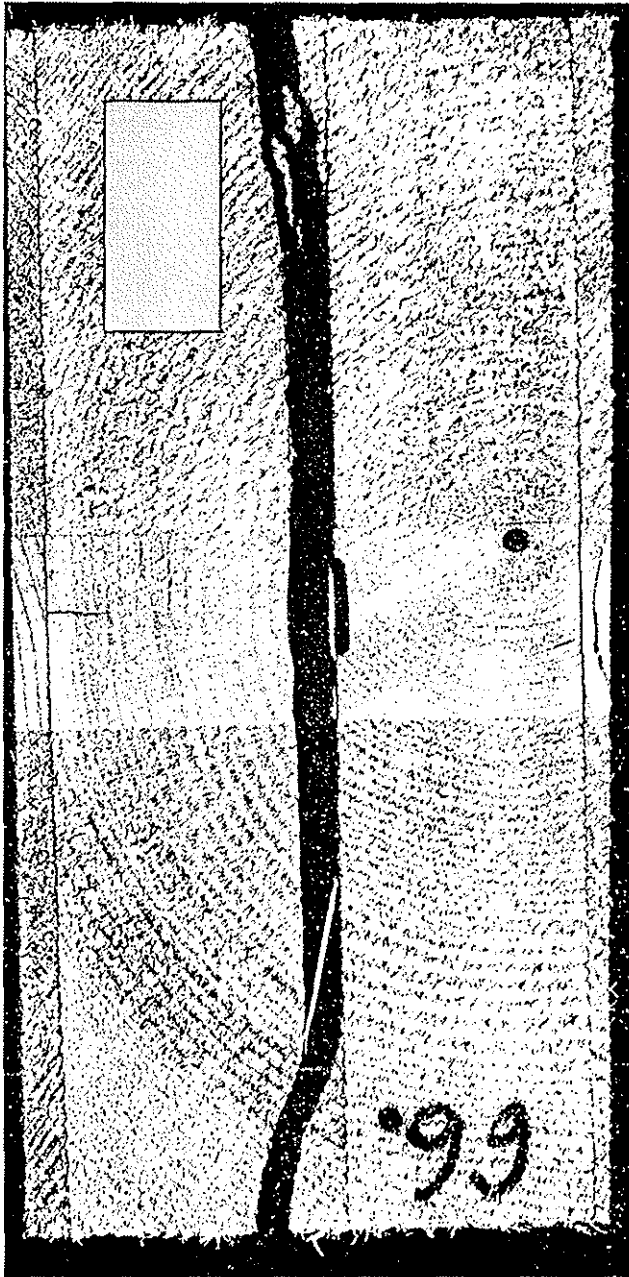


Bild A113: Bruchbild bsh65





**Bild A114:** Bruchbild bsh66

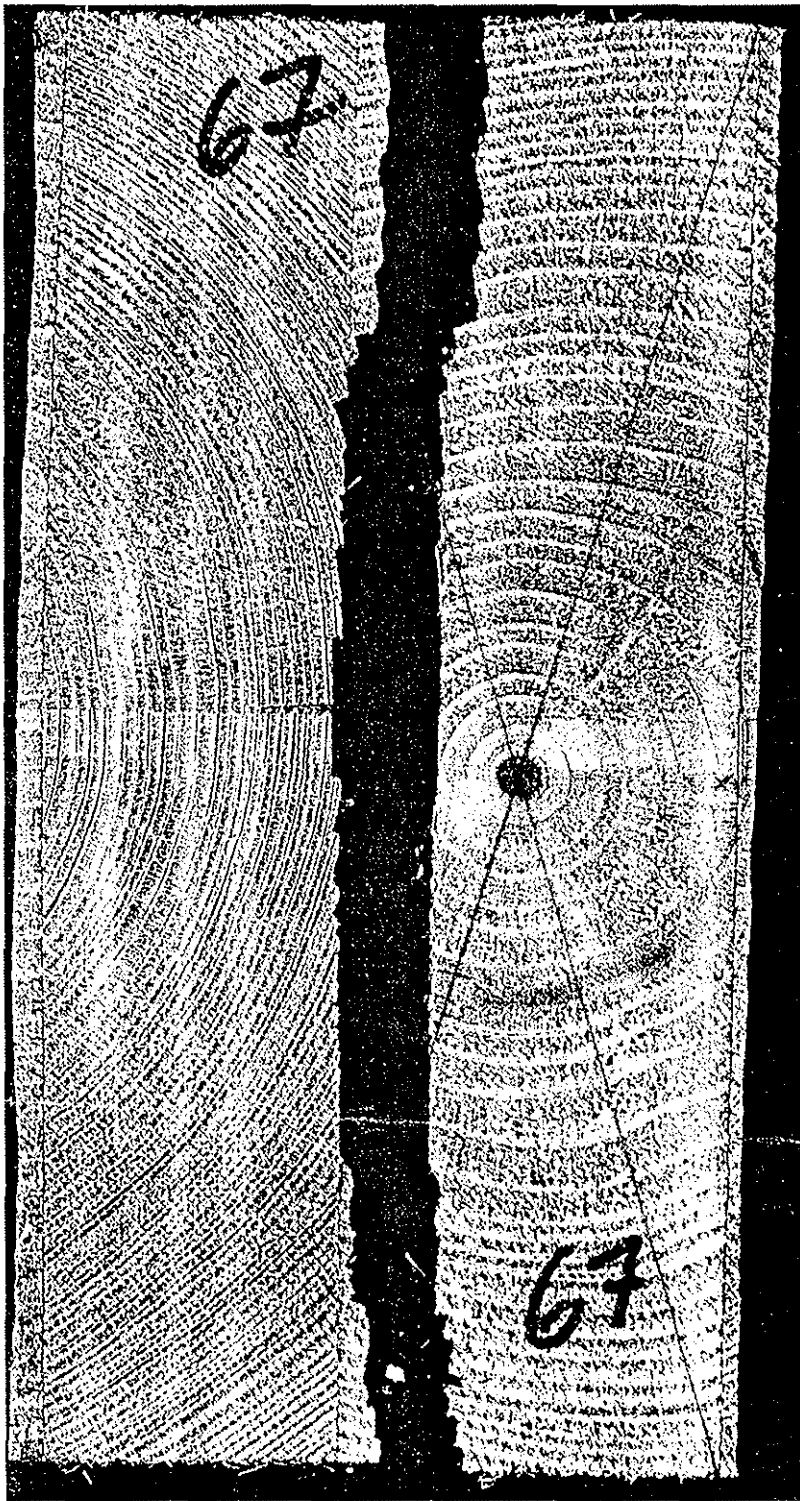
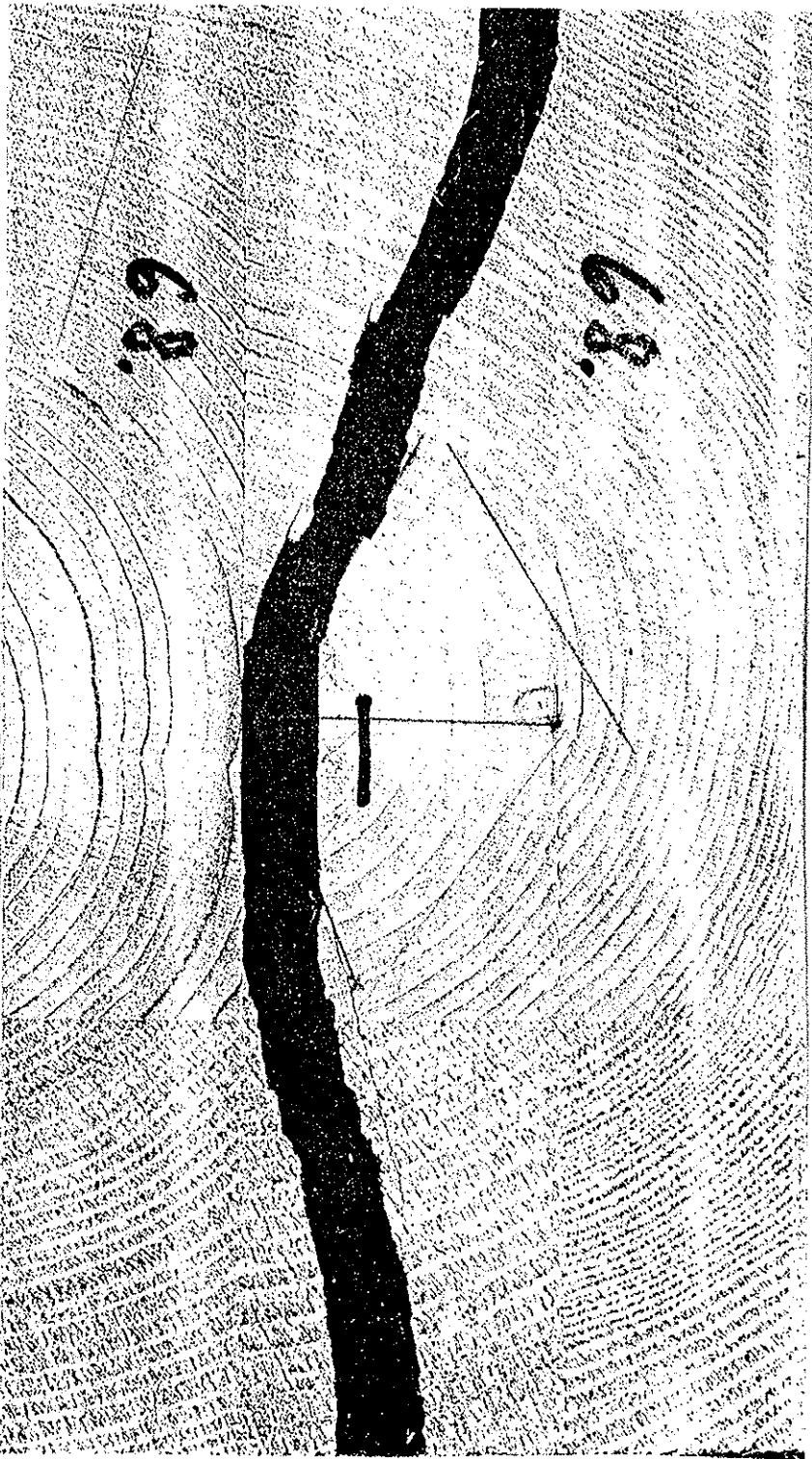
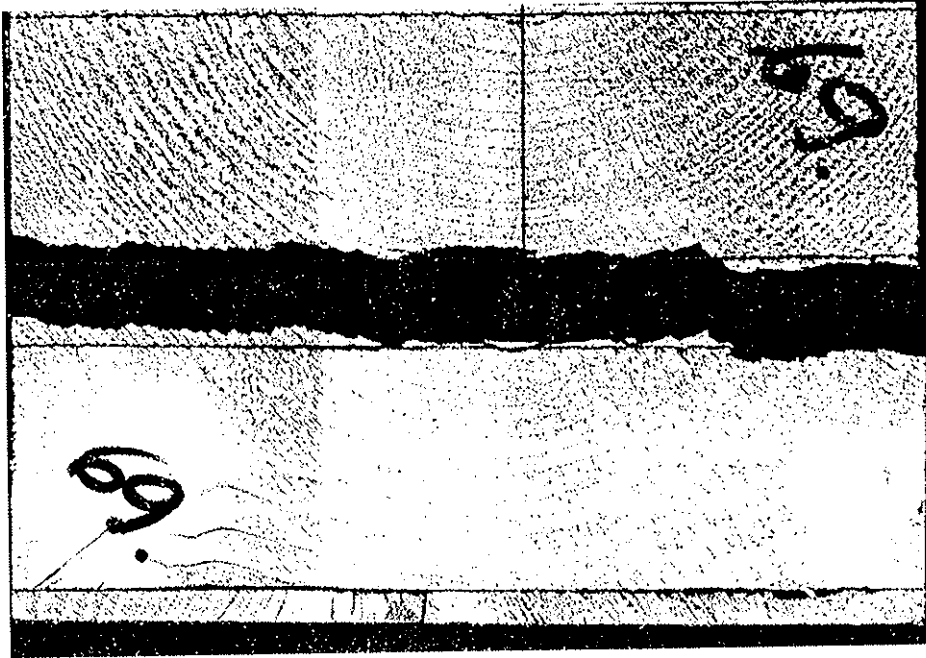


Bild A115: Bruchbild Bsh67



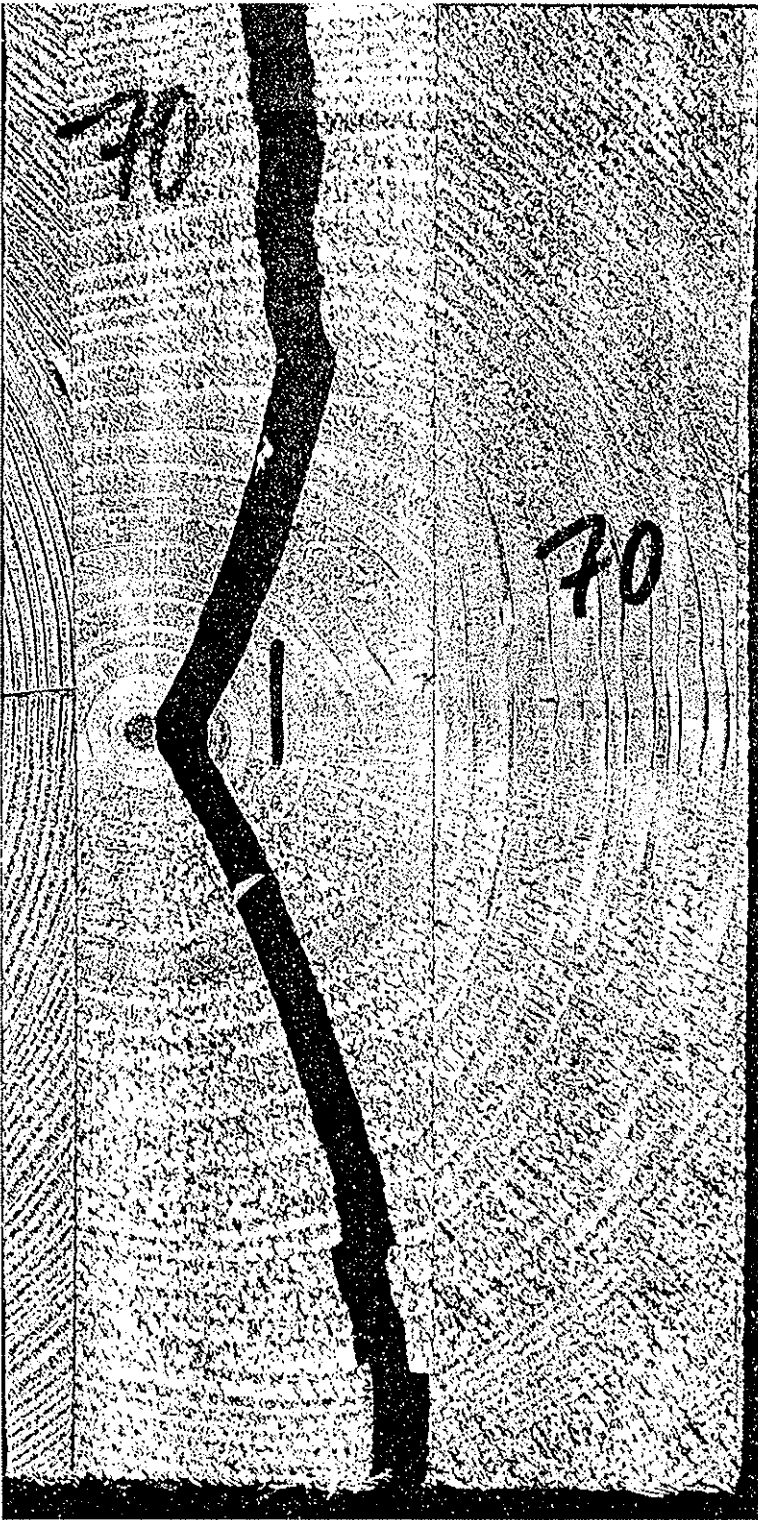


**Bild A116:** Bruchbild bsh68

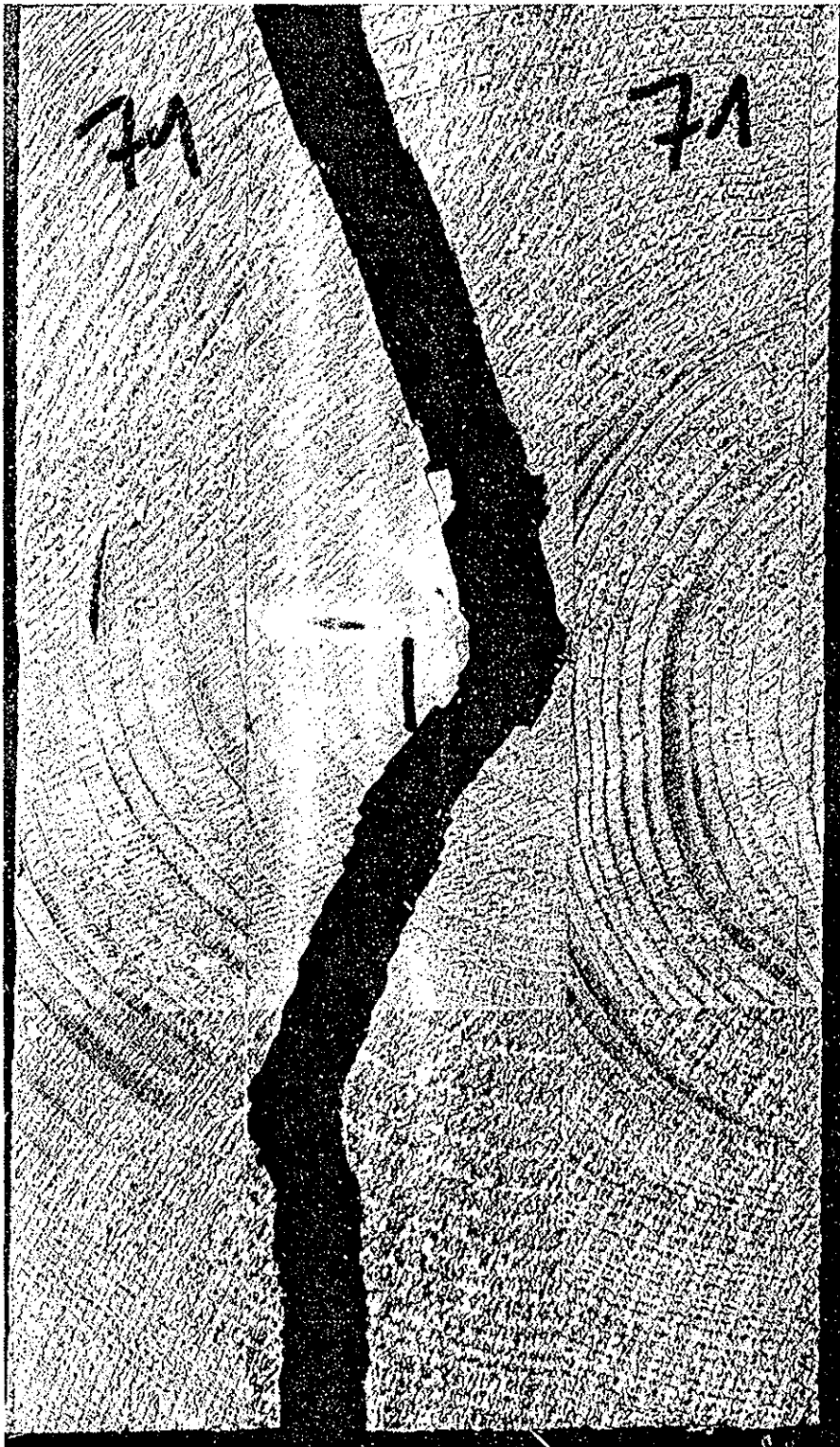


**Bild A117:** Bruchbild bsh69





**Bild A118:** Bruchbild bsh70



**Bild A119:** Bruchbild bsh71



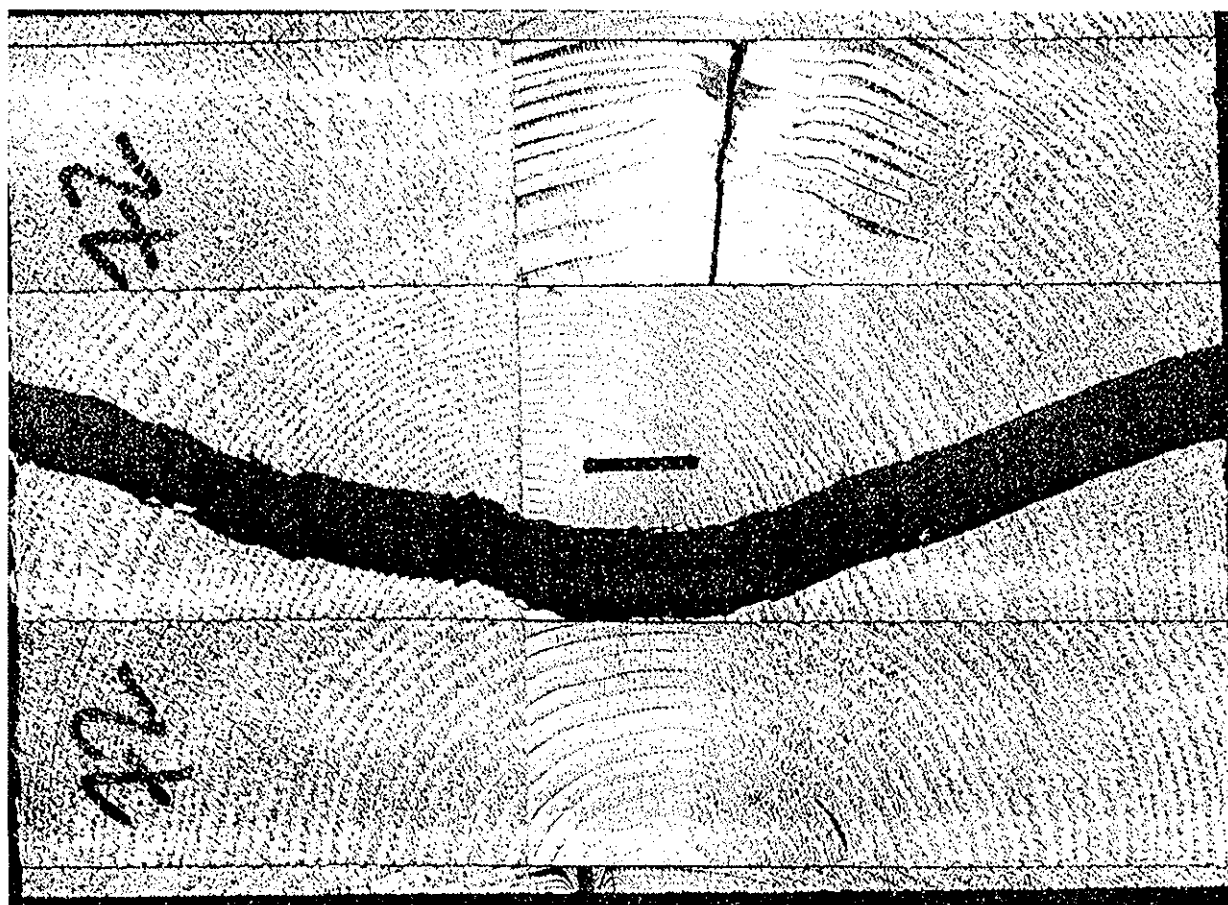
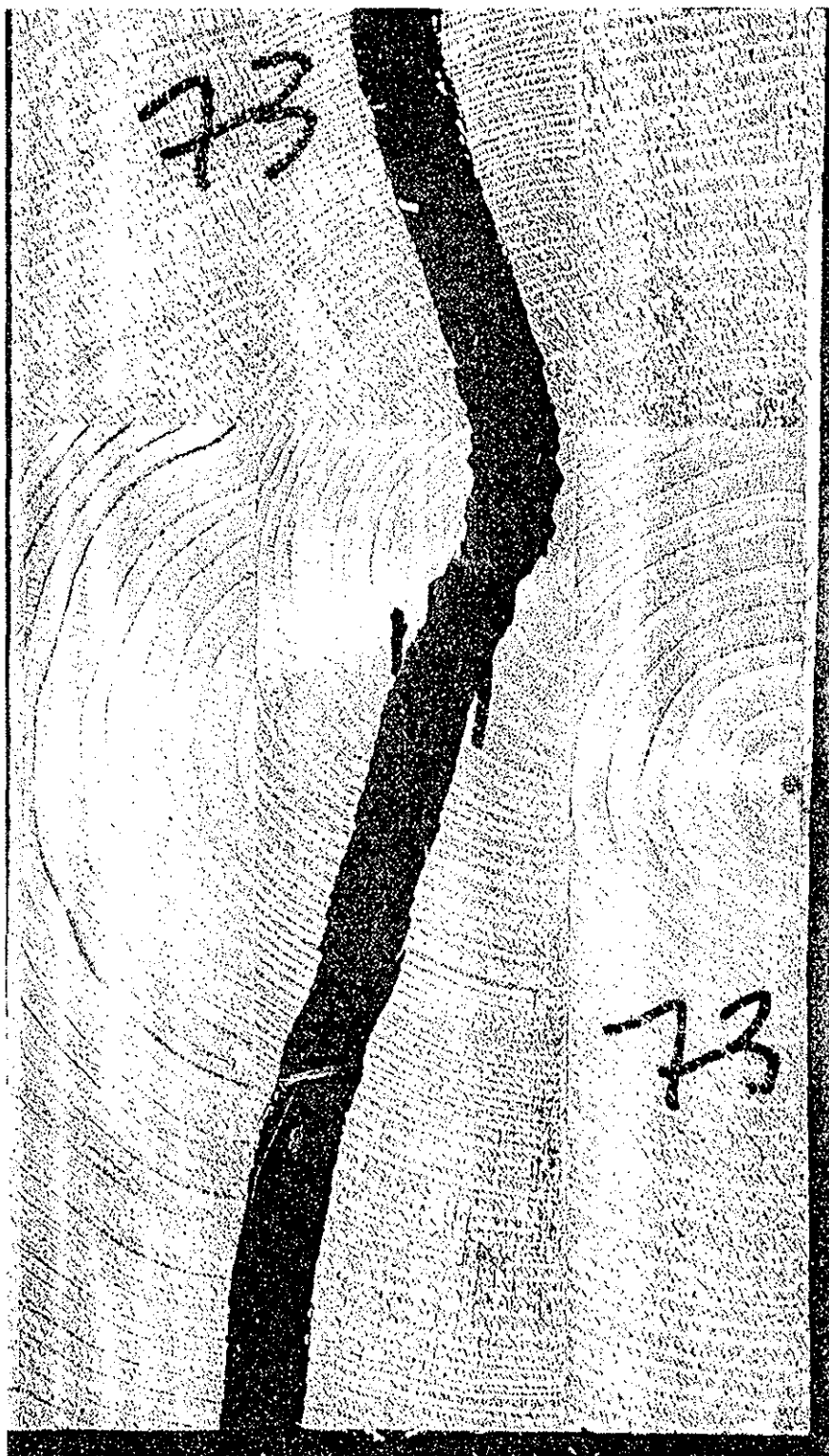
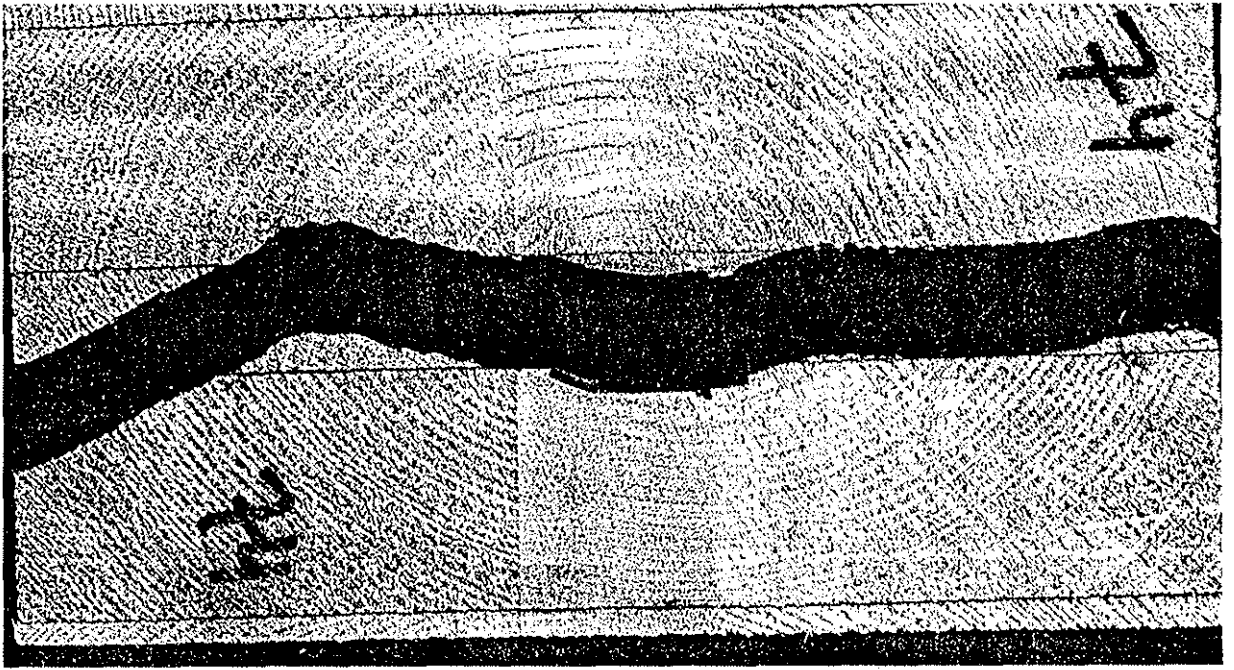


Bild A120: Bruchbild bsh72



**Bild A121:** Bruchbild bsh73





**Bild A122:** Bruchbild bsh74

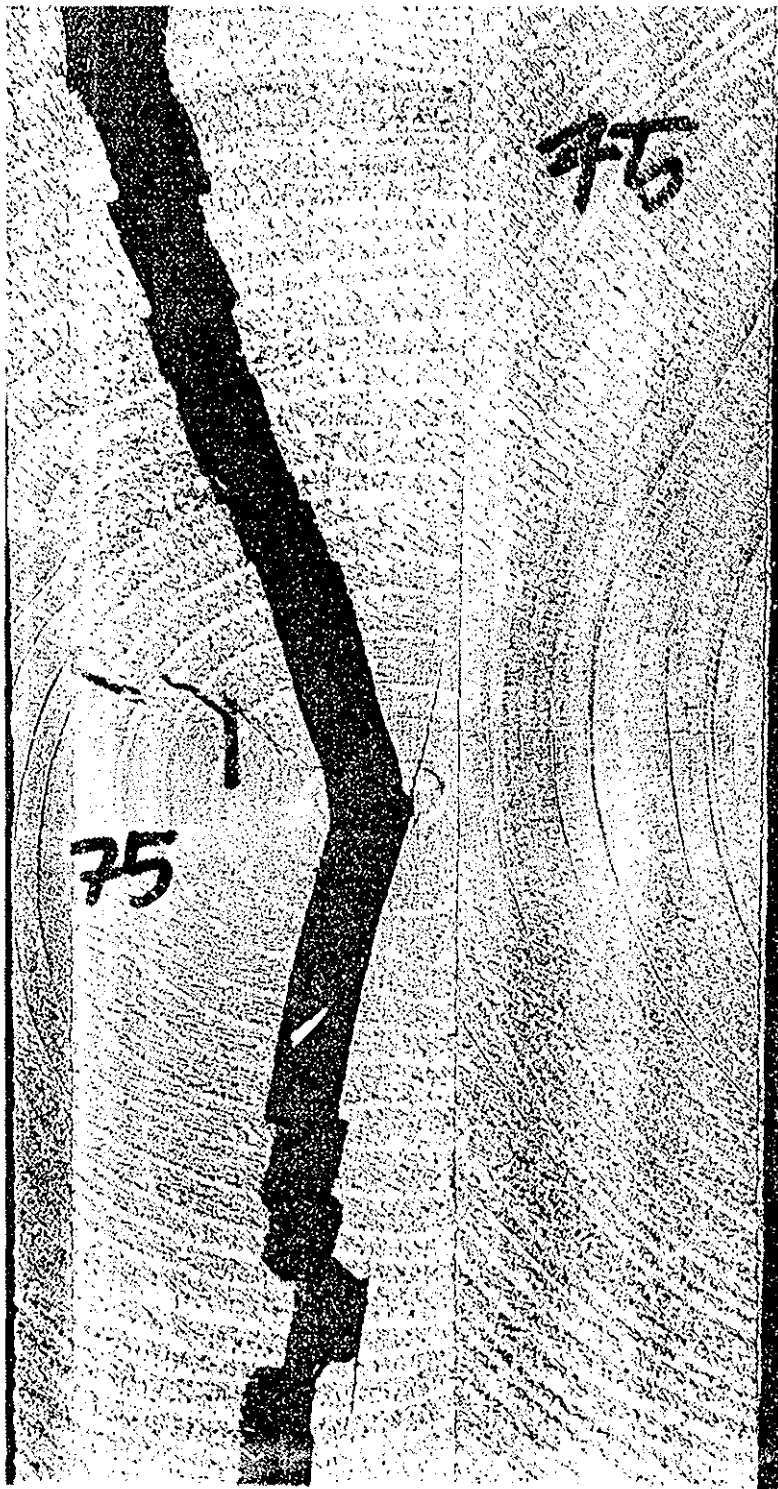


Bild A123: Bruchbild bsh75



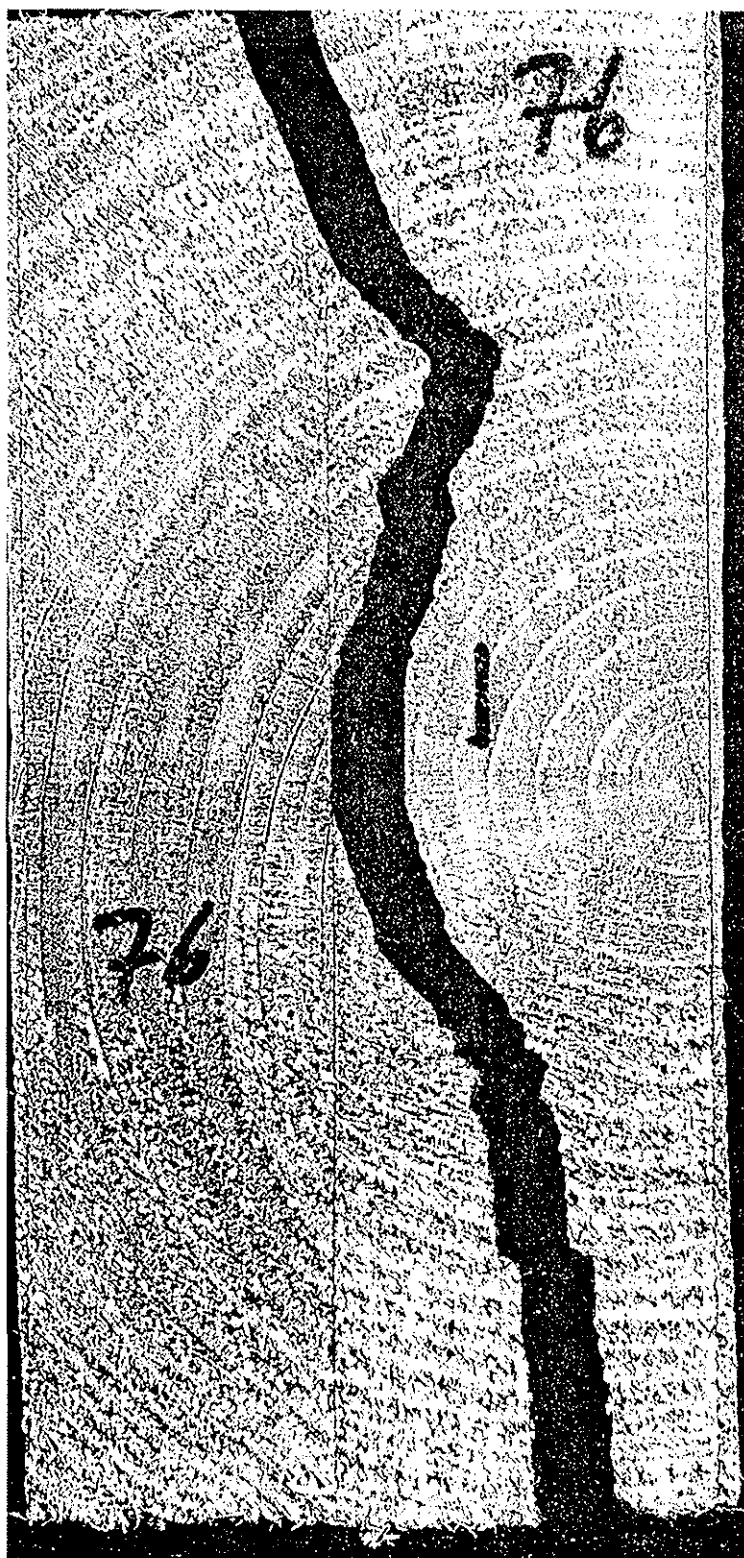


Bild A124: Bruchbild bsh76

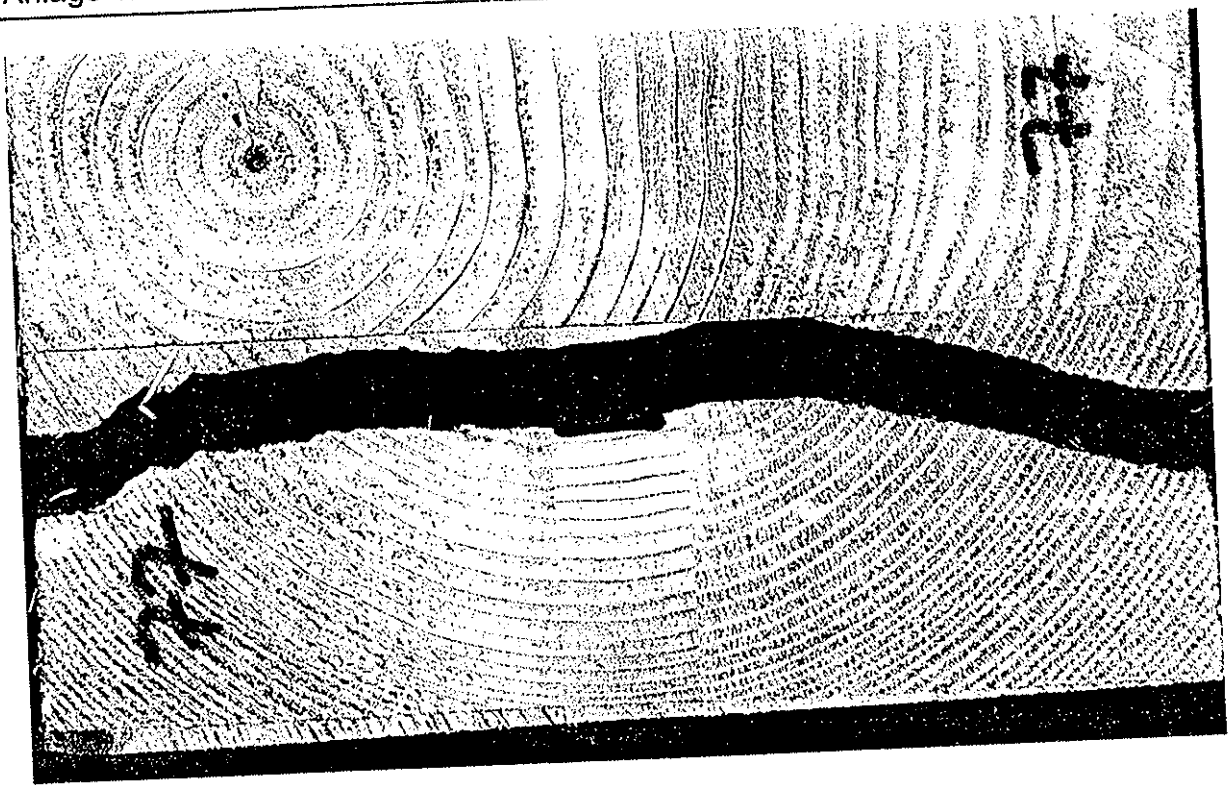


Bild A125: Bruchbild bsh77



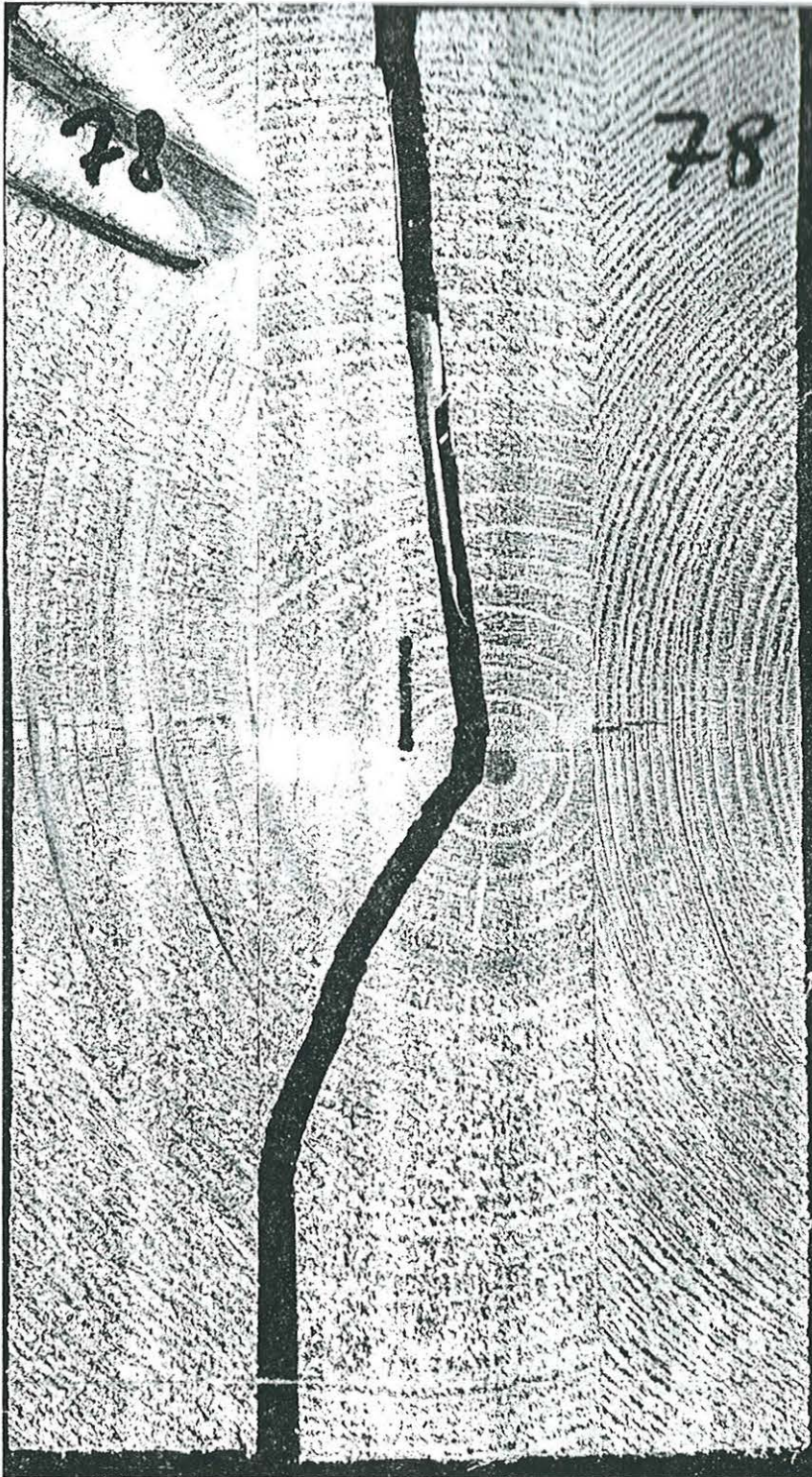


Bild A126: Bruchbild bsh78

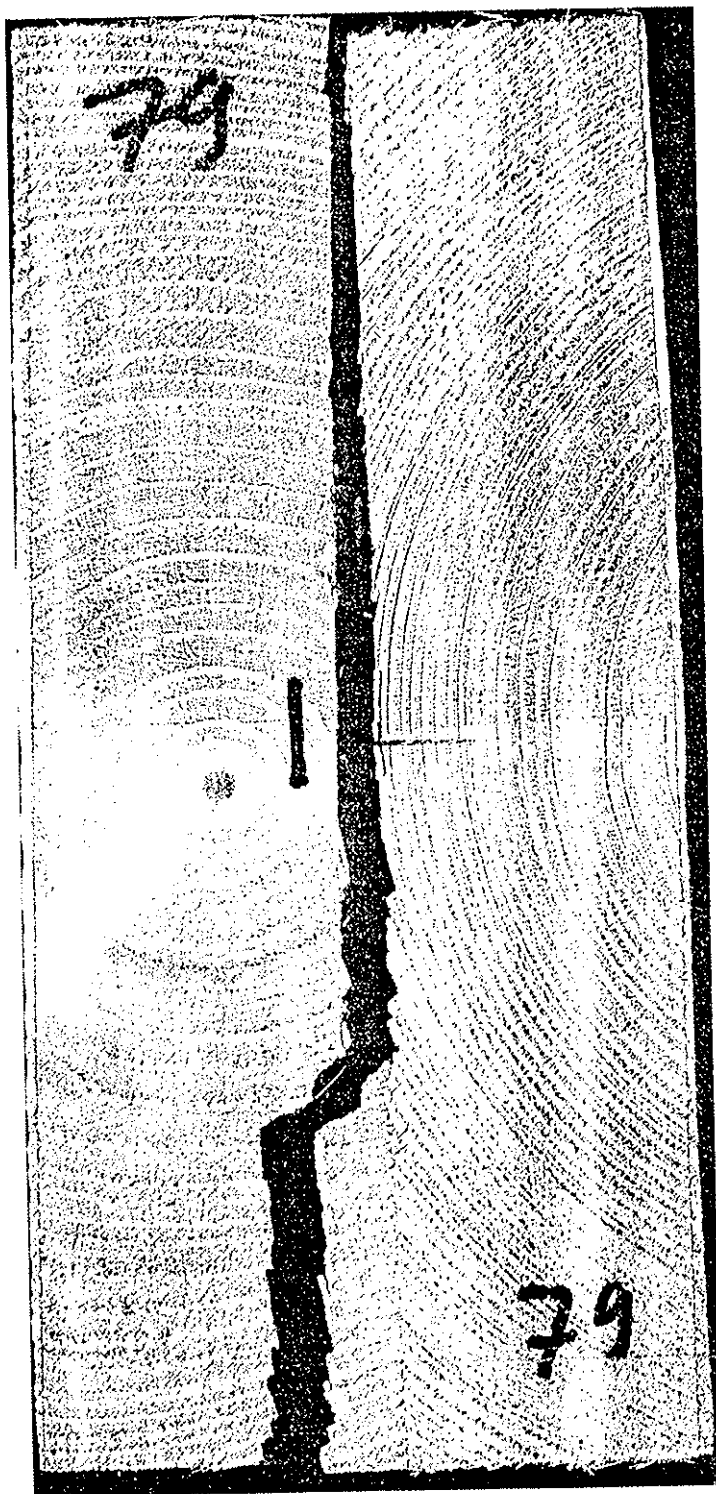
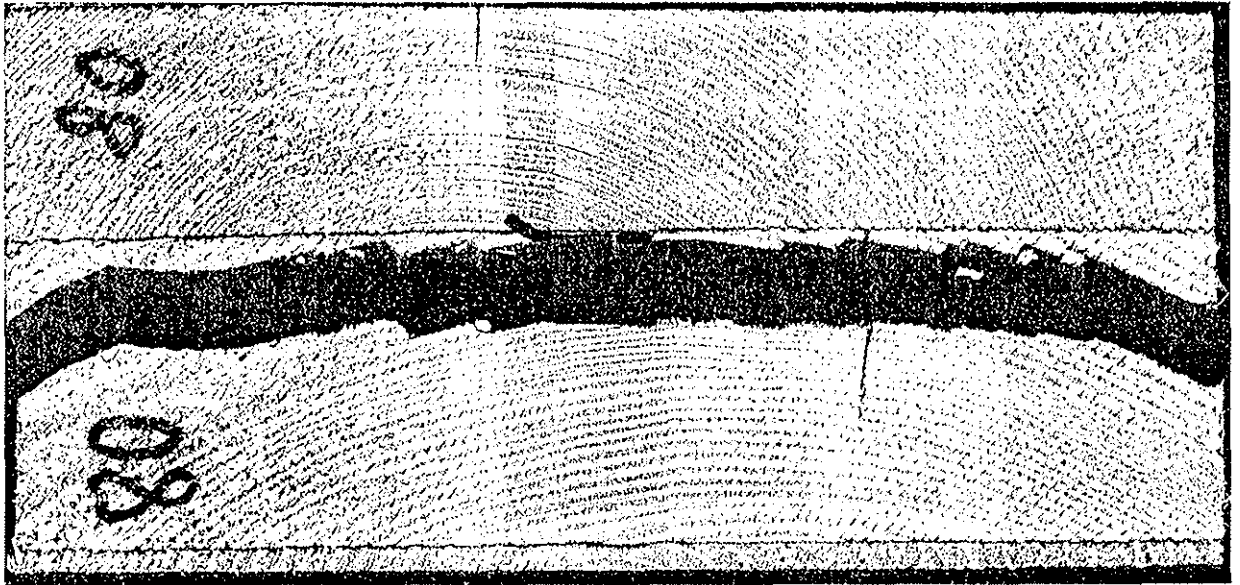


Bild A127: Bruchbild bsh79





**Bild A128:** Bruchbild bsh80

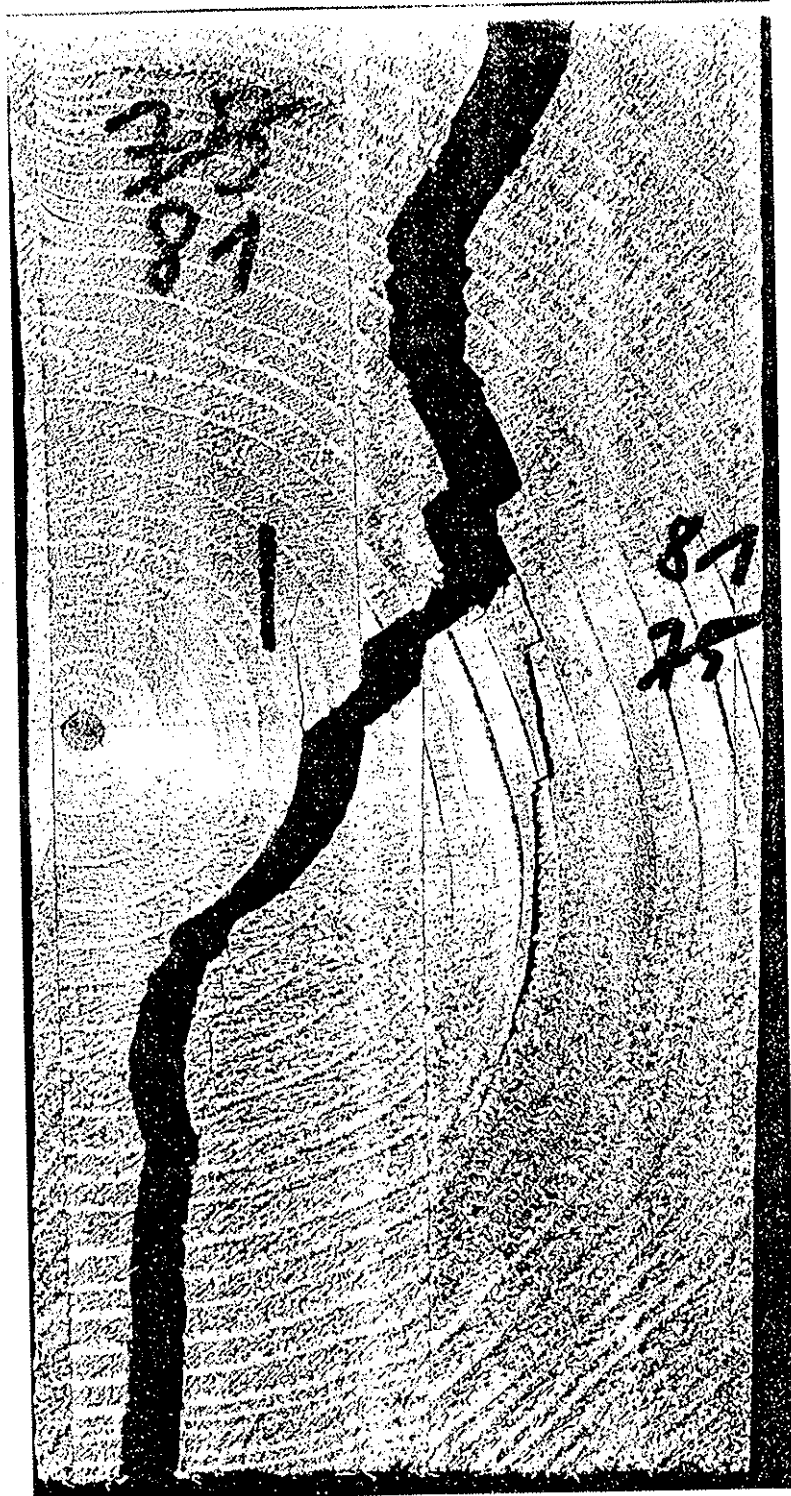
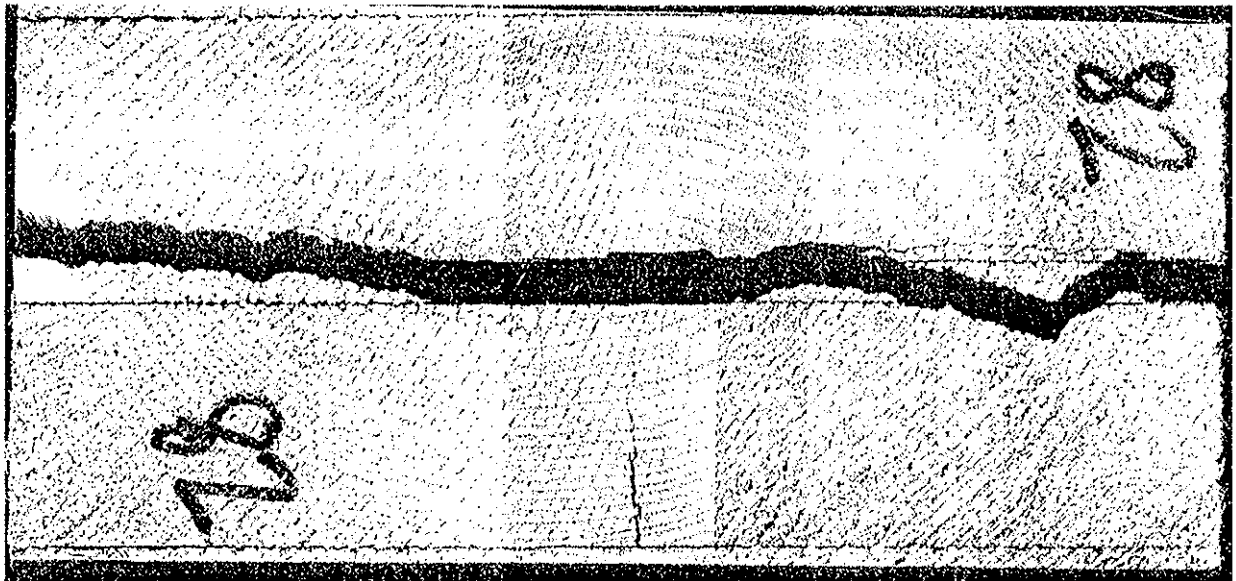
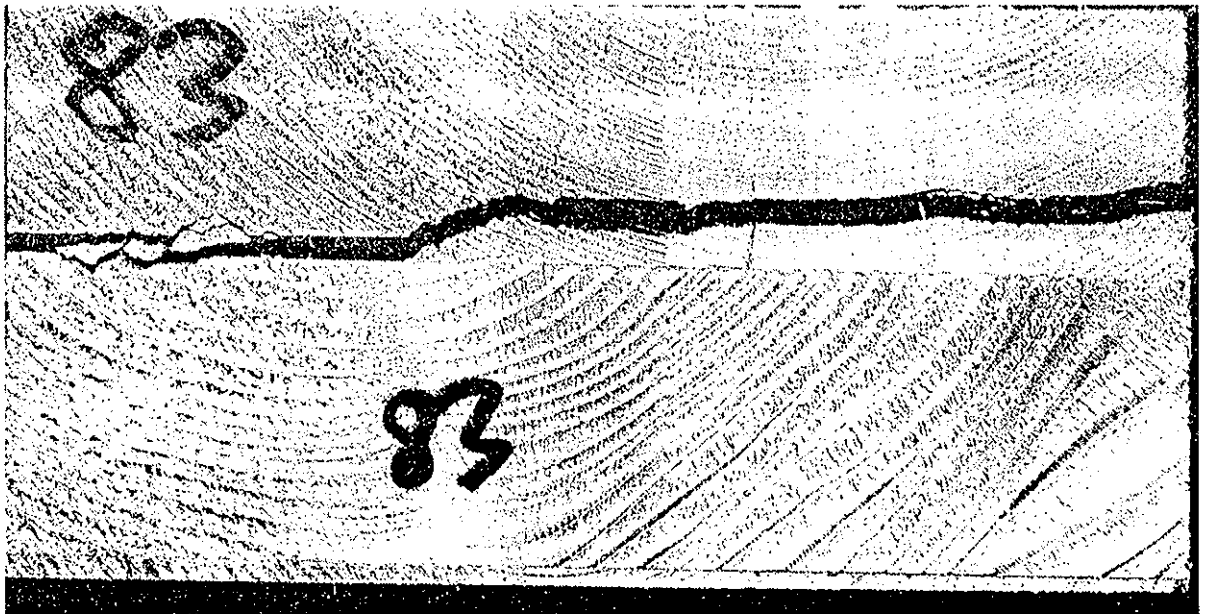


Bild A129: Bruchbild bsh81





**Bild A130:** Bruchbild bsh82



**Bild A131:** Bruchbild bsh83

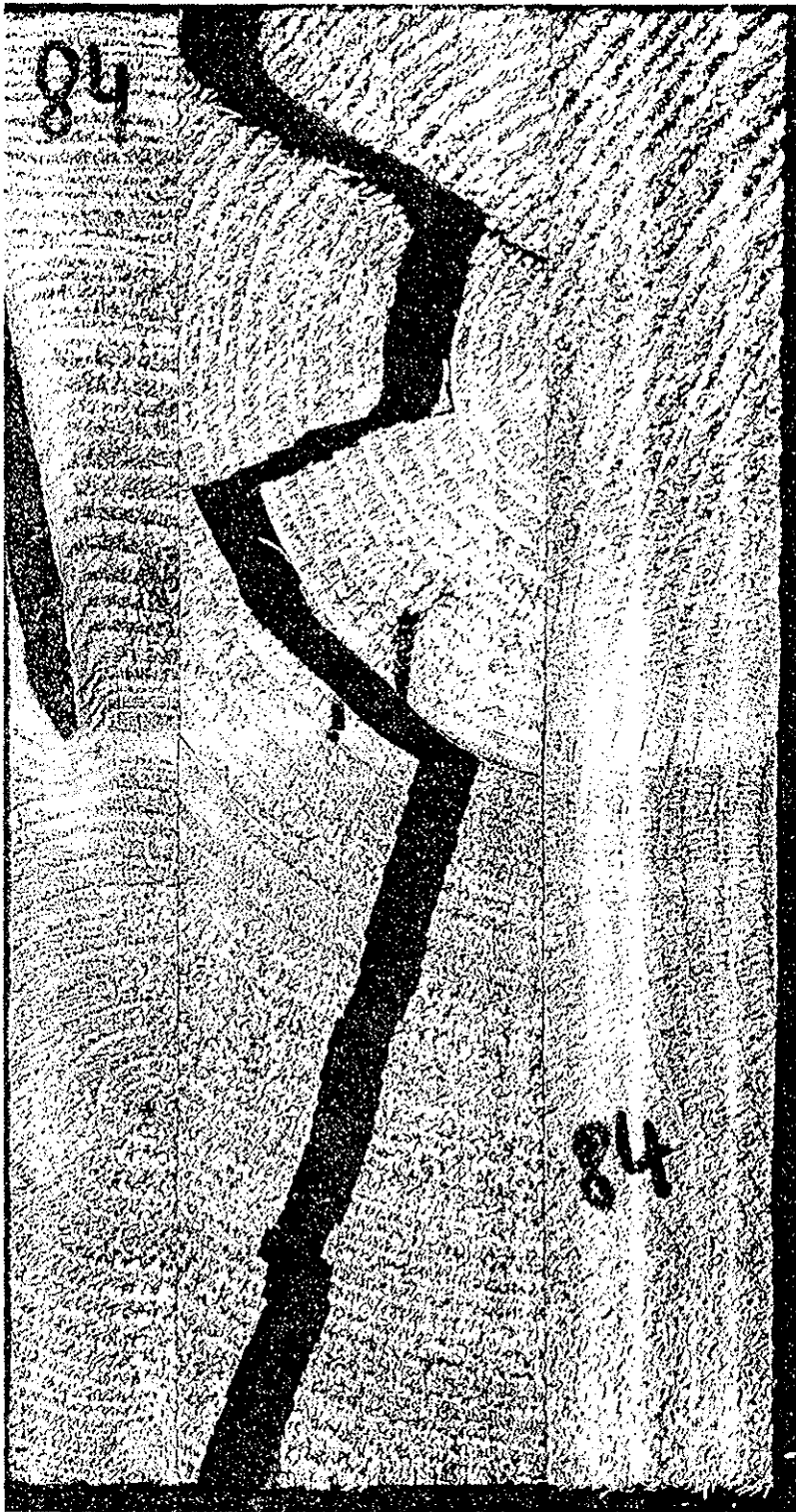
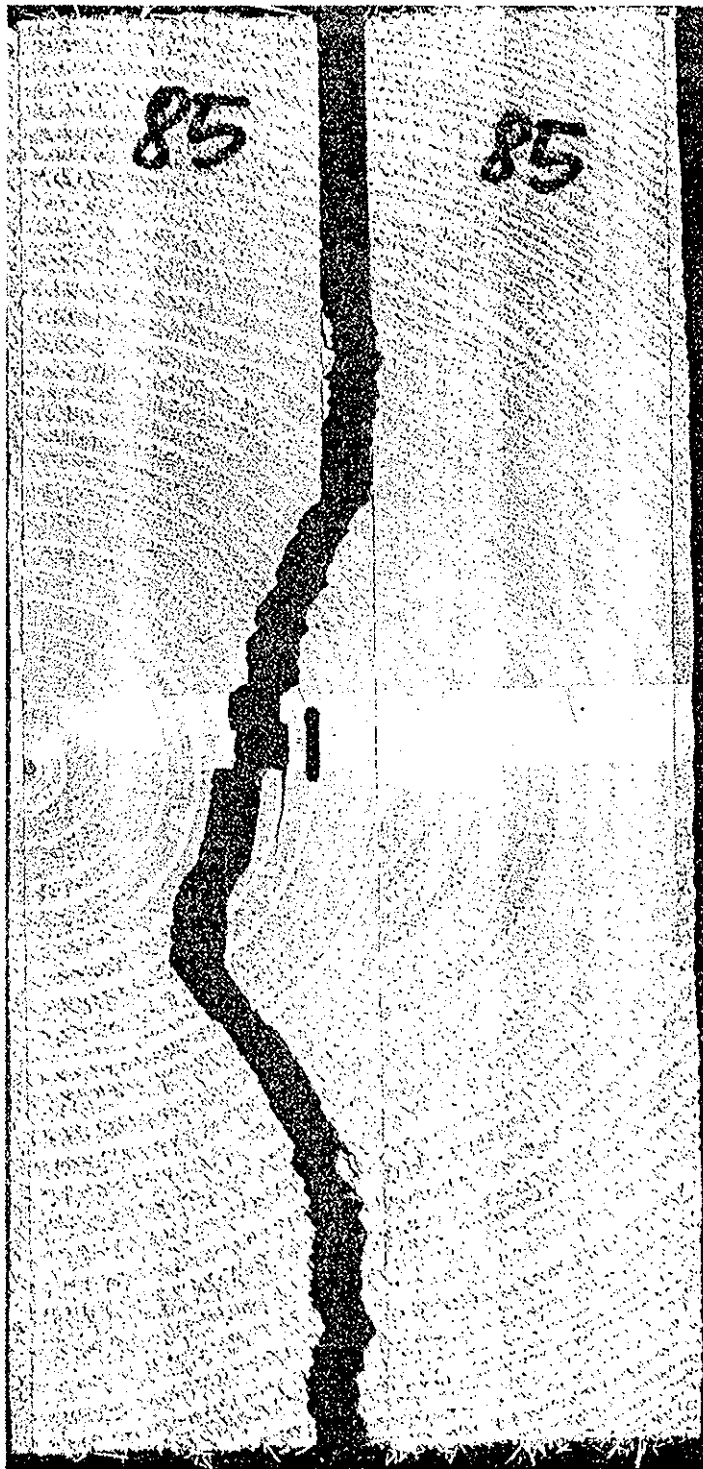
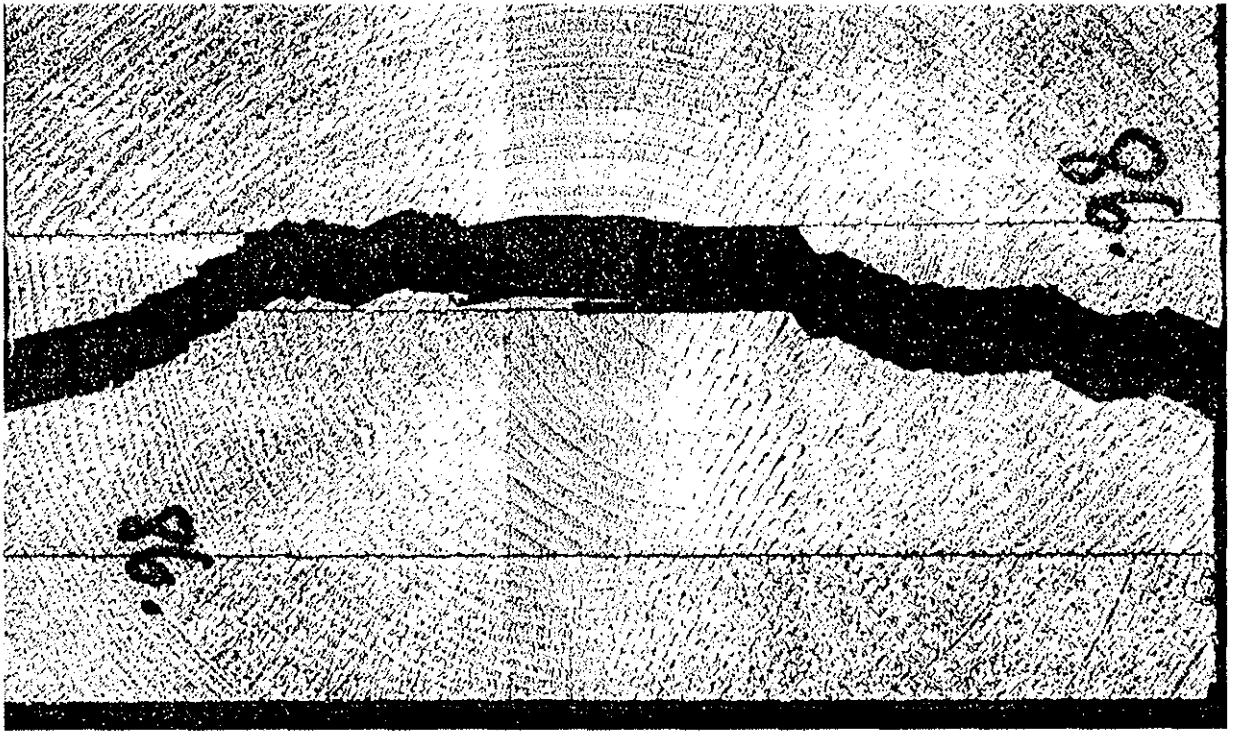


Bild A132: Bruchbild Bsh84





**Bild A133:** Bruchbild bsh85



**Bild A134:** Bruchbild bsh86



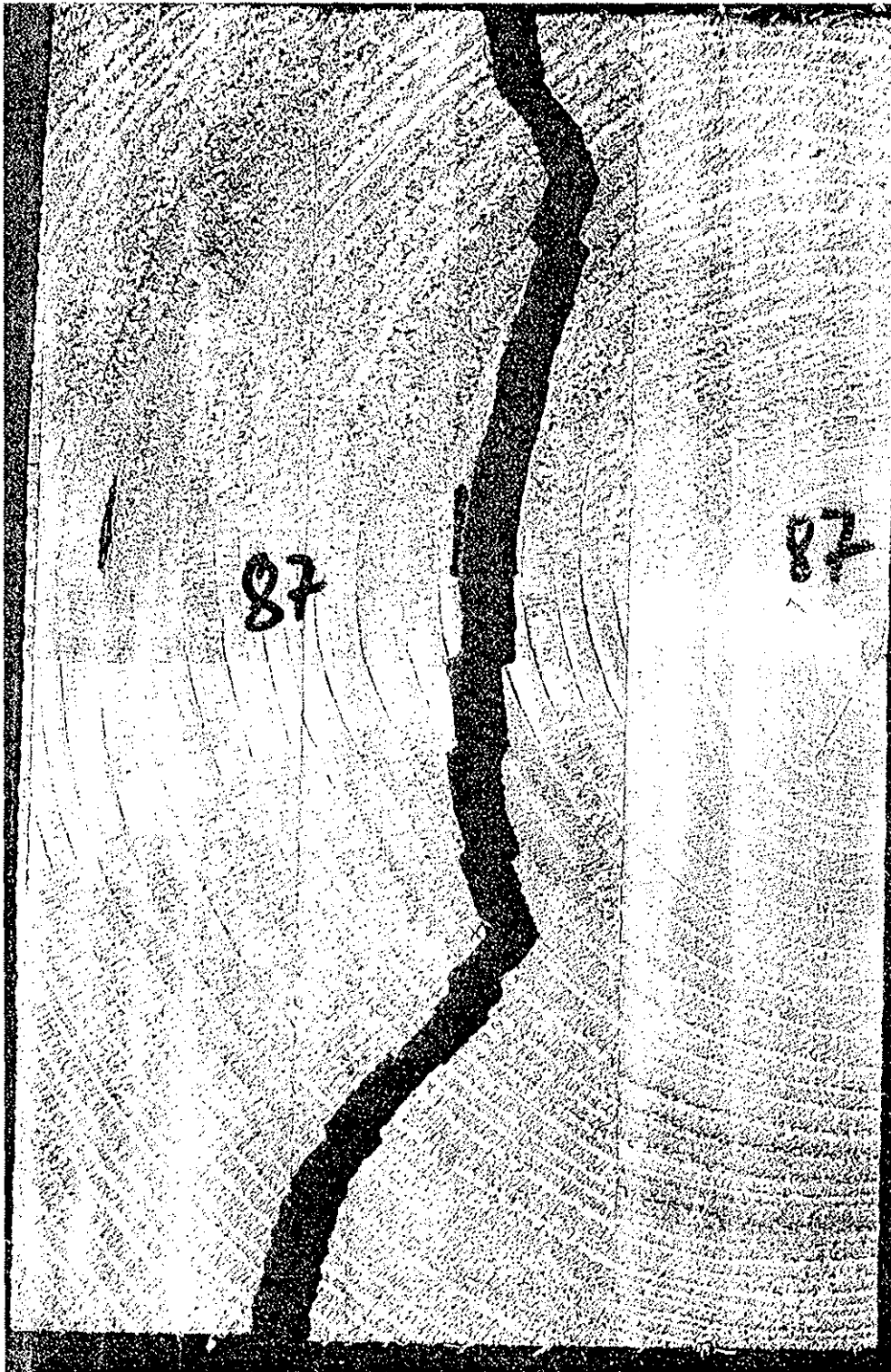


Bild A135: Bruchbild Bsh87

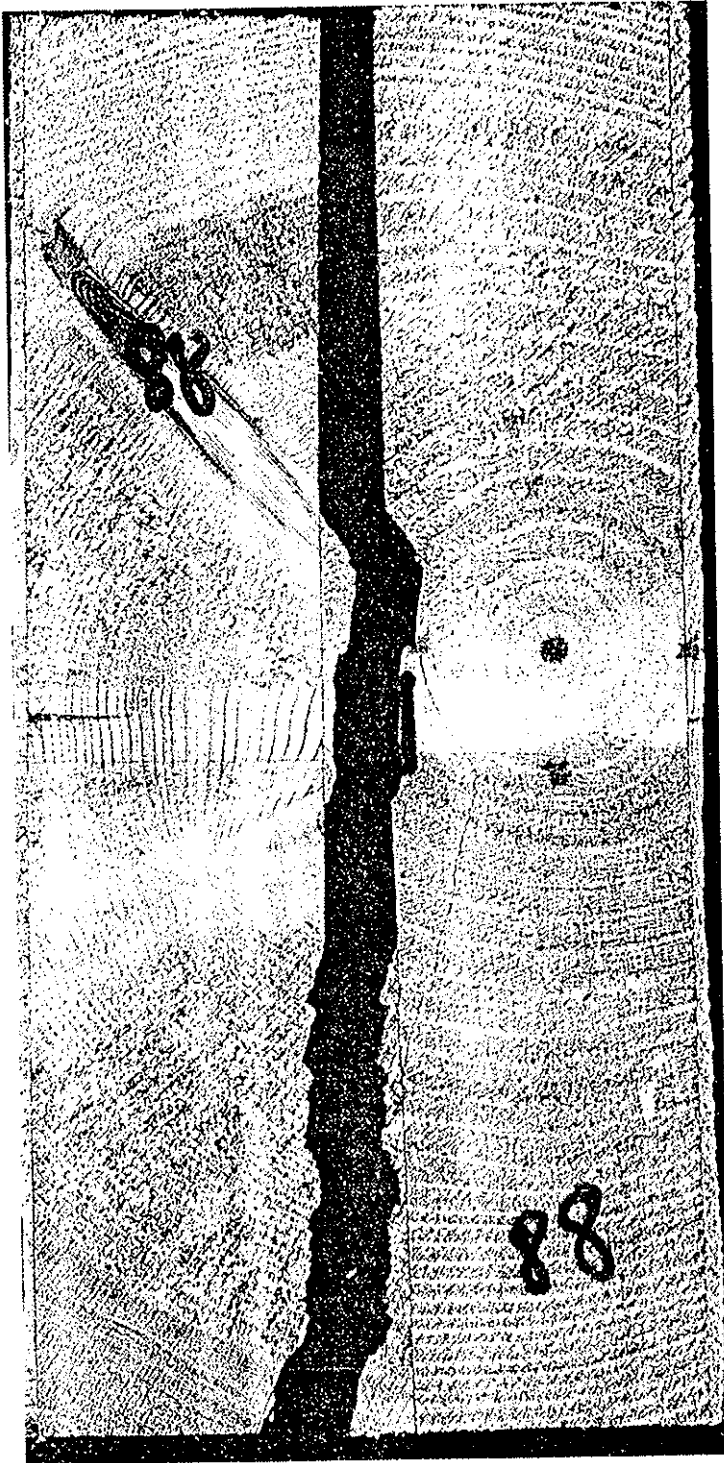
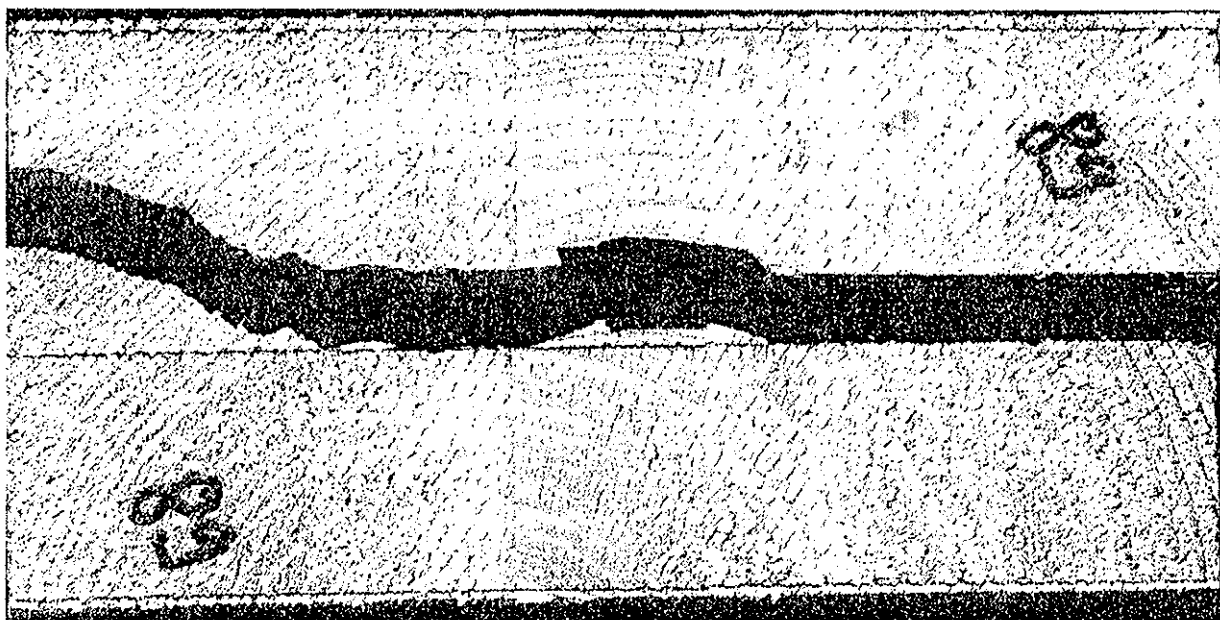
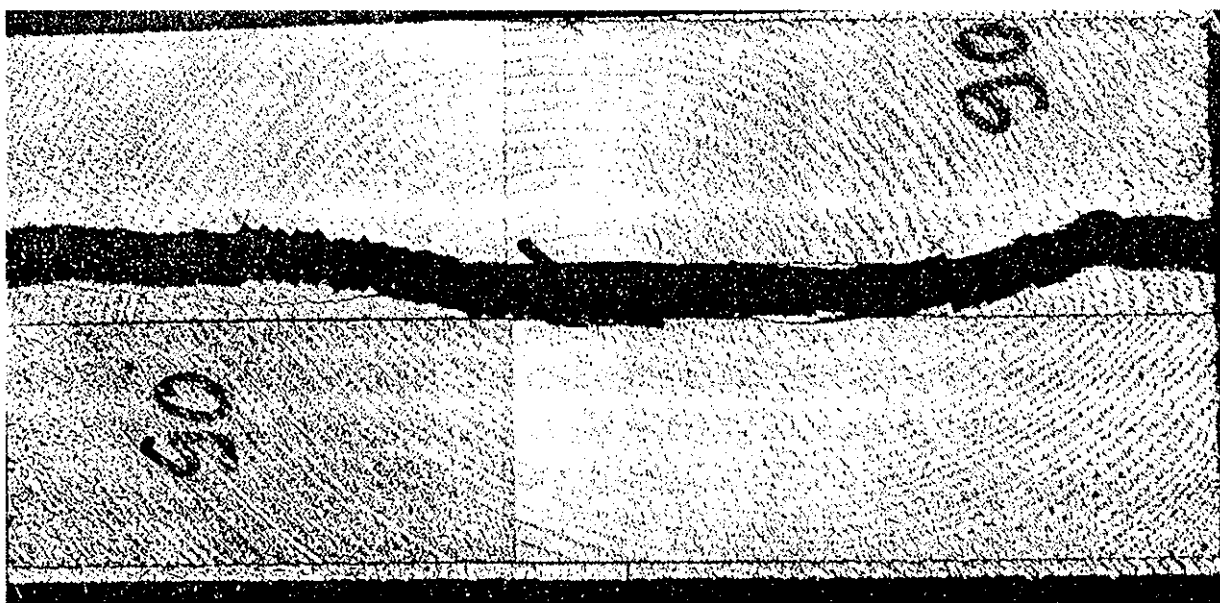


Bild A136: Bruchbild bsh88

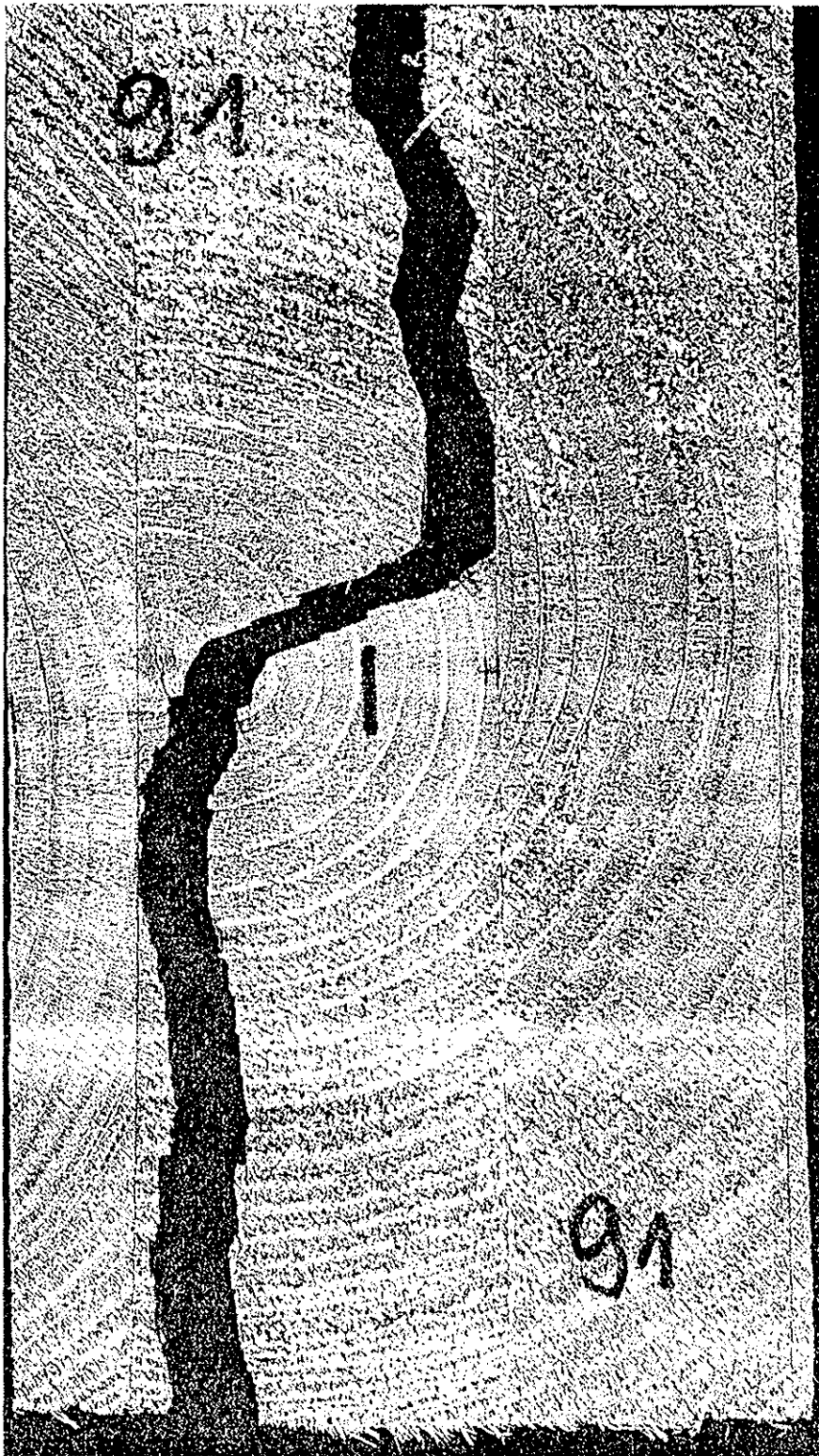




**Bild A137:** Bruchbild bsh89



**Bild A138:** Bruchbild bsh90



**Bild A139:** Bruchbild bsh91



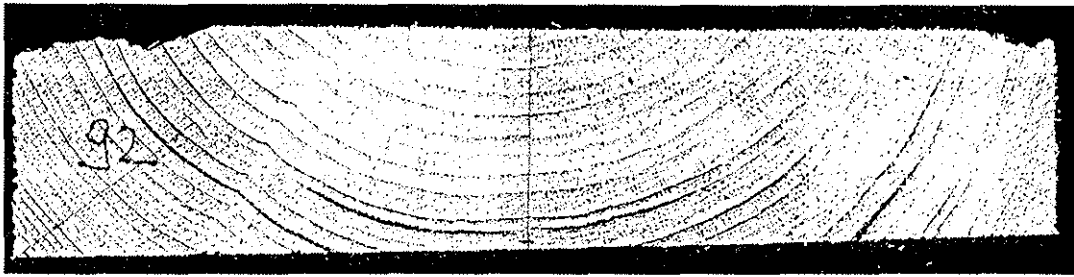


Bild A140: Bruchbild bsh92

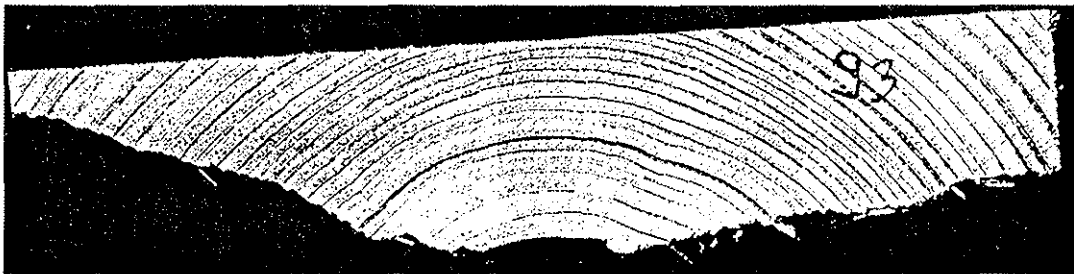


Bild A141: Bruchbild bsh93

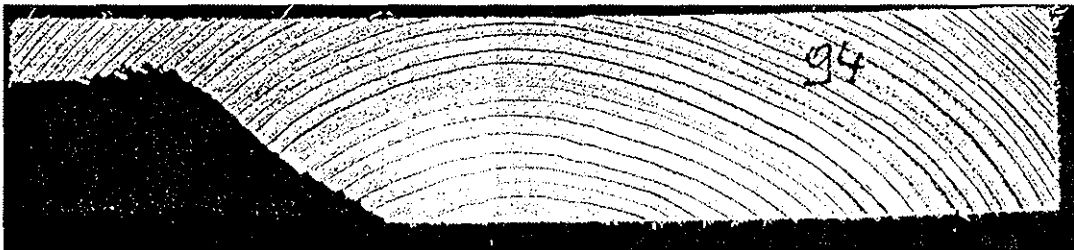


Bild A142: Bruchbild bsh94

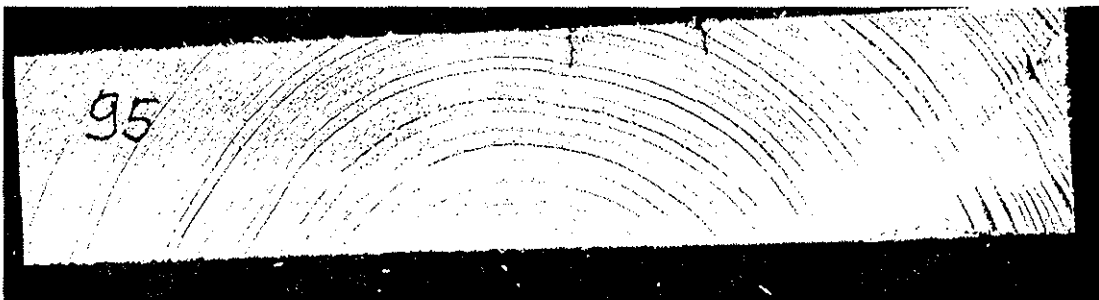
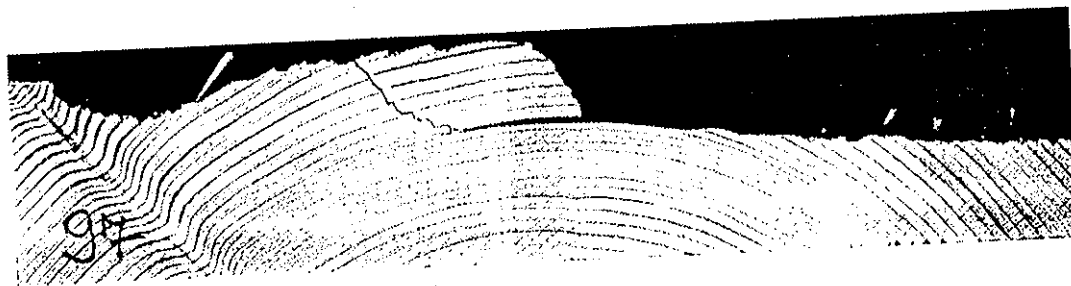


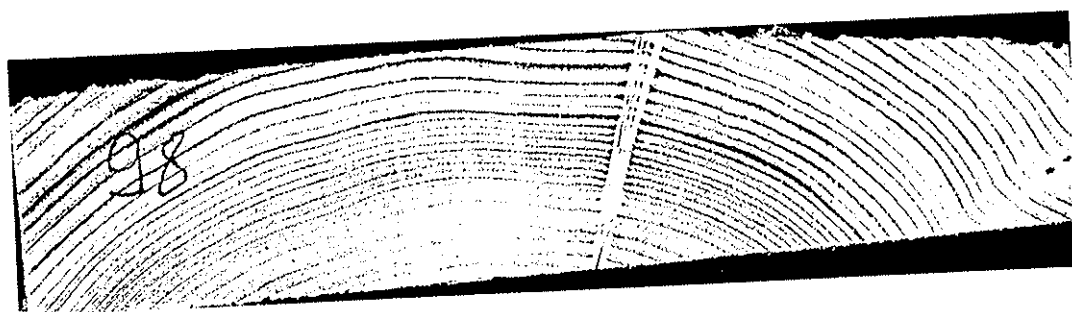
Bild A143: Bruchbild bsh95



Bild A144: Bruchbild bsh96



**Bild A145:** Bruchbild bsh97



**Bild A146:** Bruchbild bsh98





**Bild A147:** Bruchbild bsh99

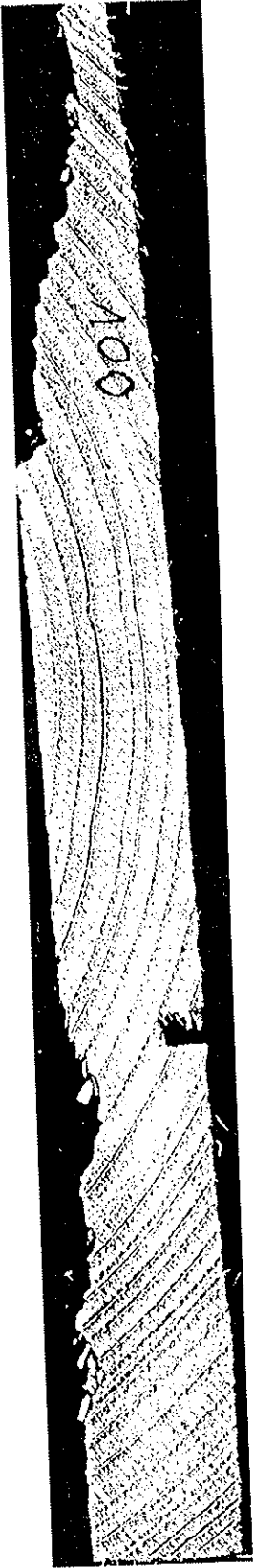
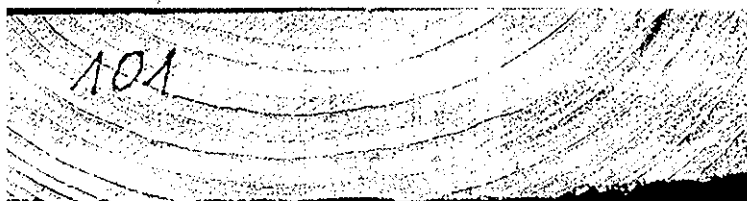


Bild A148: Bruchbild bsh100

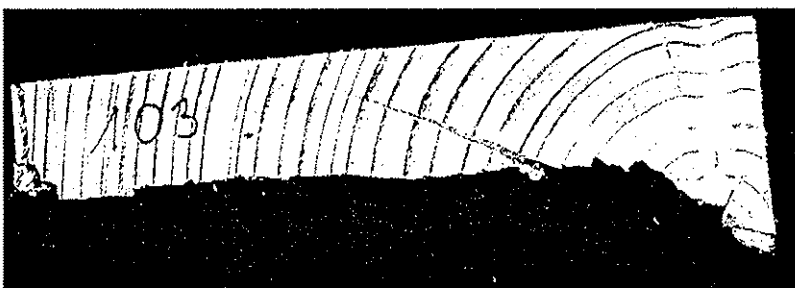




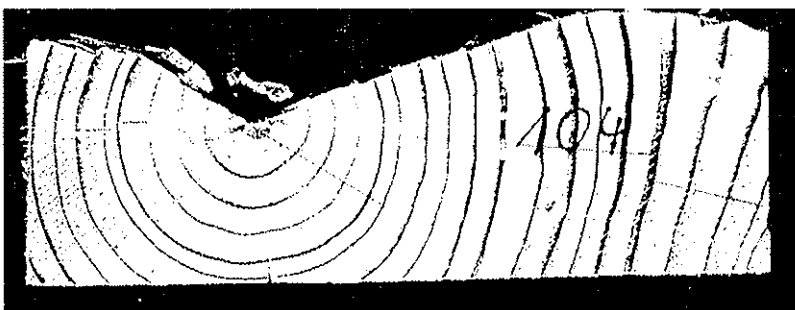
**Bild A149:** Bruchbild bsh101



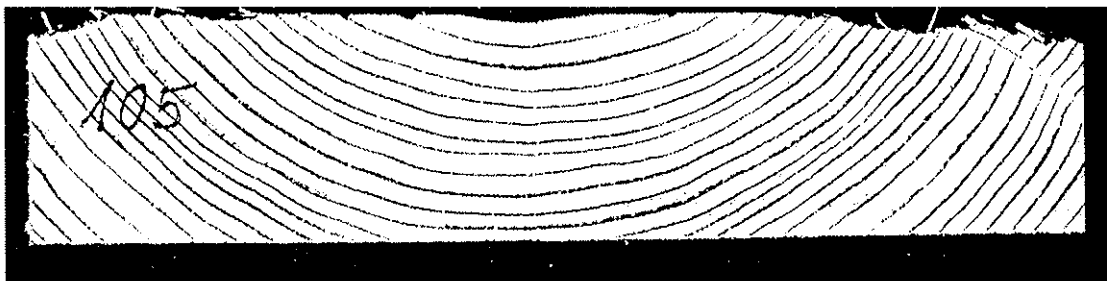
**Bild A150:** Bruchbild bsh102



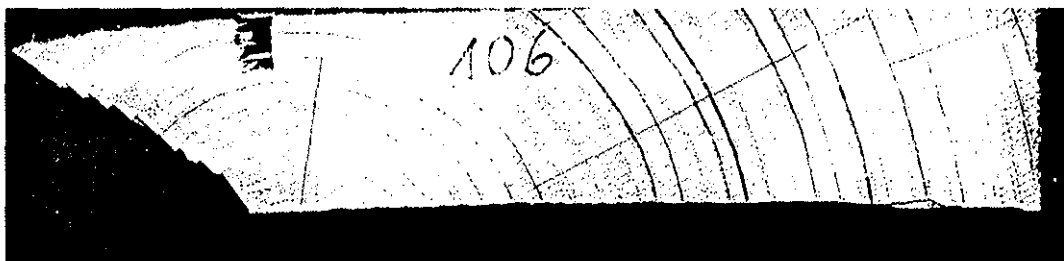
**Bild A151:** Bruchbild bsh103



**Bild A152:** Bruchbild bsh104



**Bild A153:** Bruchbild bsh105



**Bild A154:** Bruchbild bsh106



**Bild A155:** Bruchbild bsh107

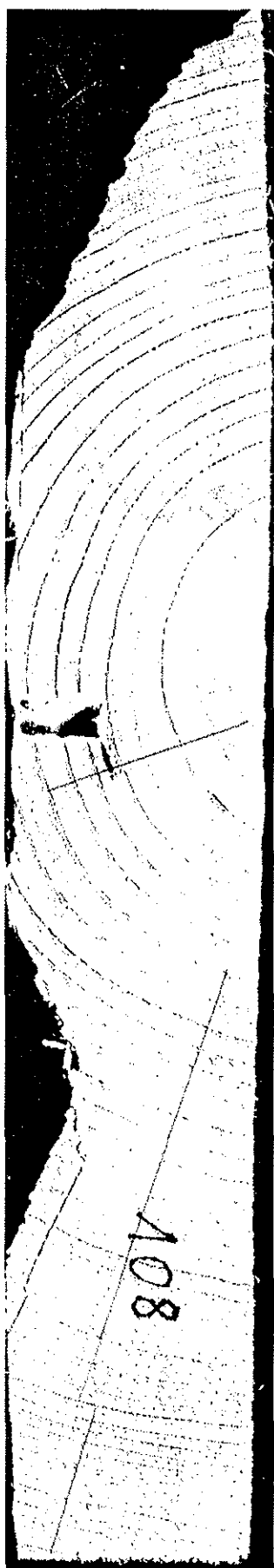


Bild A156: Bruchbild bsh108

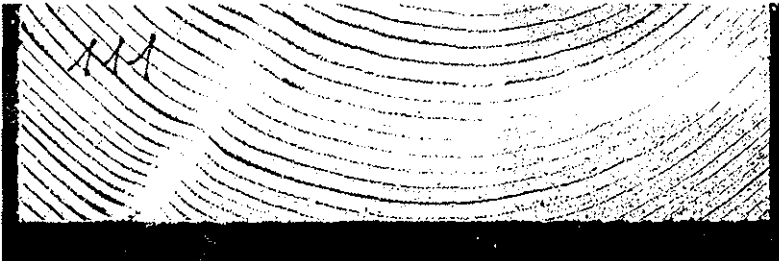




**Bild A157:** Bruchbild bsh109



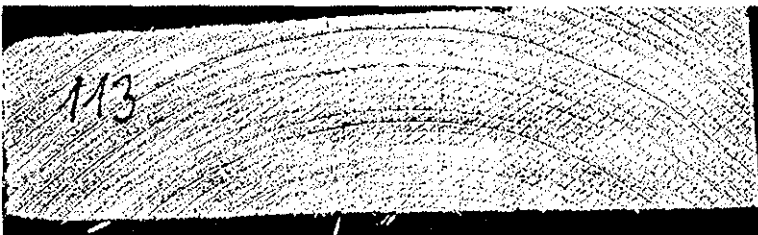
**Bild A158:** Bruchbild bsh110



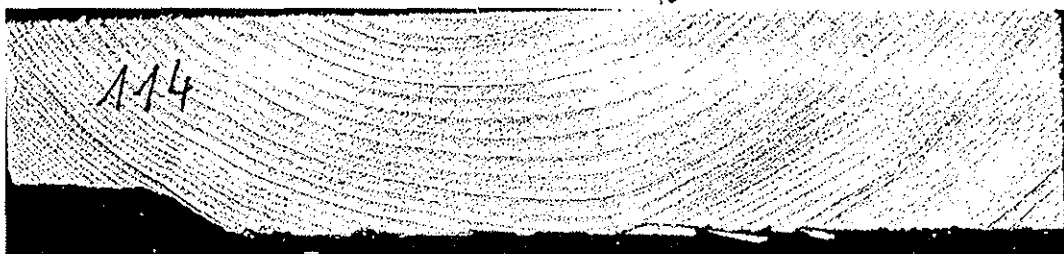
**Bild A159:** Bruchbild bsh111



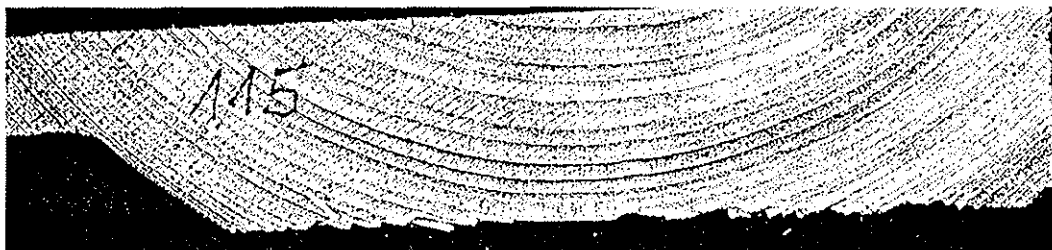
**Bild A160:** Bruchbild bsh112



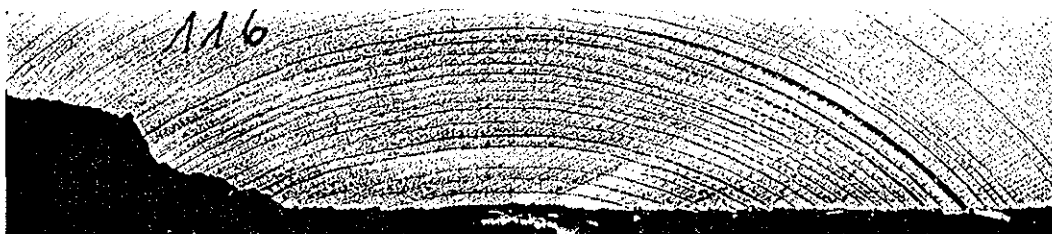
**Bild A161:** Bruchbild bsh113



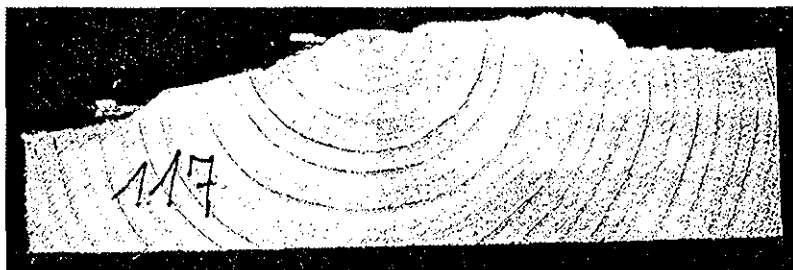
**Bild A162:** Bruchbild bsh114



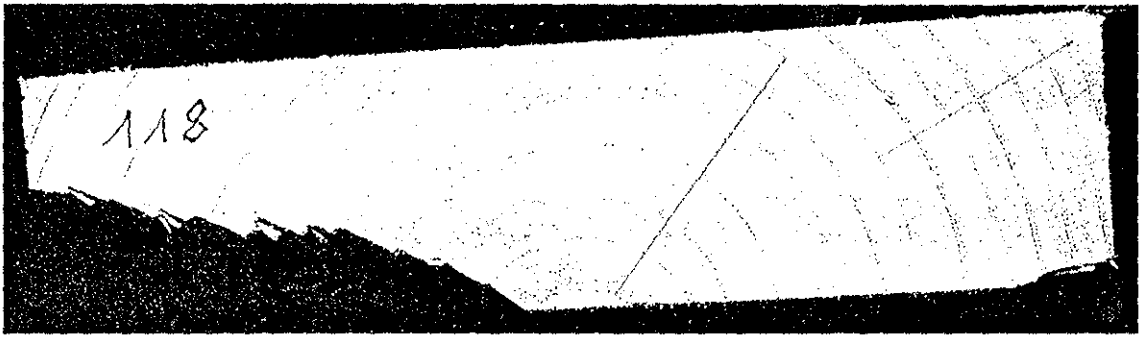
**Bild A163:** Bruchbild bsh115



**Bild A164:** Bruchbild bsh116



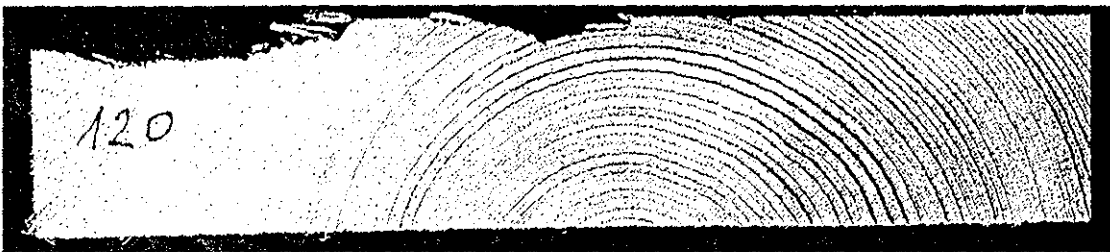
**Bild A165:** Bruchbild bsh117



**Bild A166:** Bruchbild bsh118



**Bild A167:** Bruchbild bsh119



**Bild A168:** Bruchbild bsh120



**Bild A169:** Bruchbild bsh121

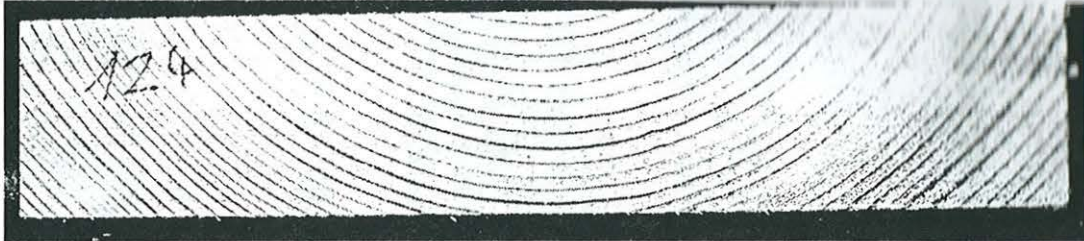


**Bild A170:** Bruchbild bsh122

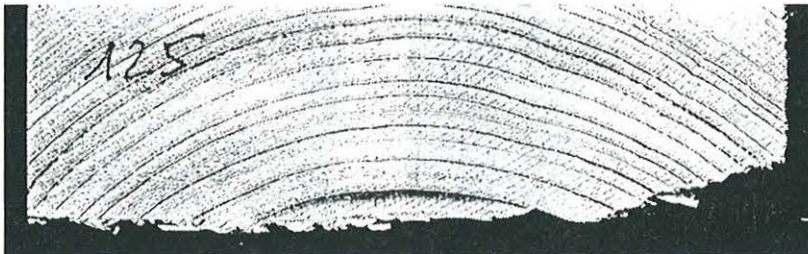




**Bild A171:** Bruchbild bsh123



**Bild A172:** Bruchbild bsh124



**Bild A173:** Bruchbild bsh125



**Bild A174:** Bruchbild bsh126

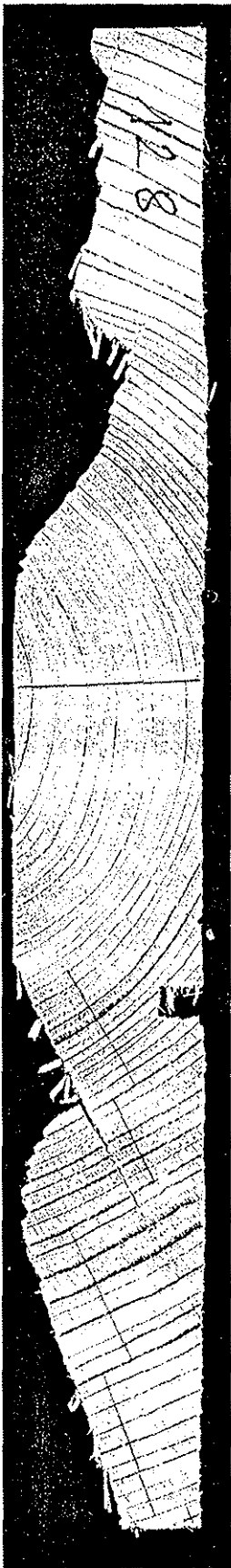
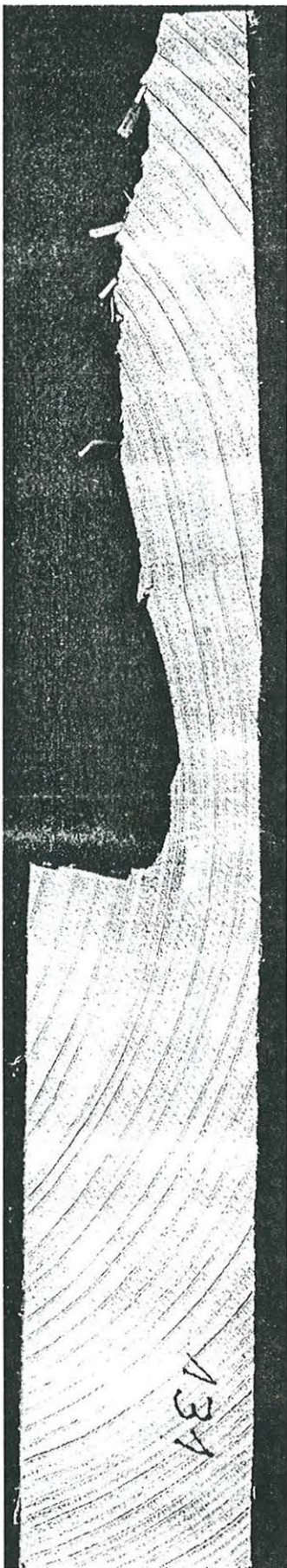


Bild A175: Bruchbild bsh128





**Bild A176:** Bruchbild  
bsh131

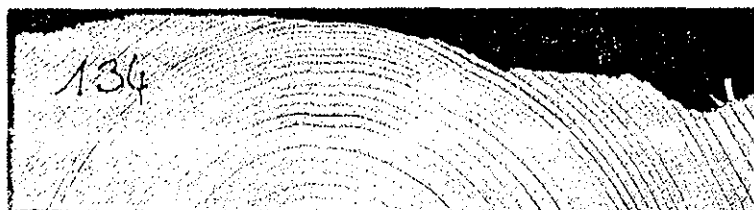


bsh132



bsh133

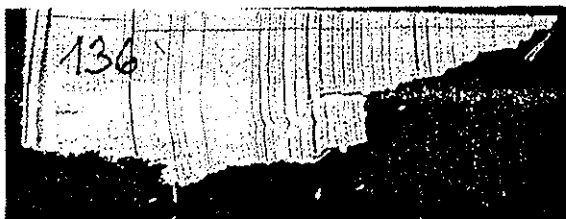




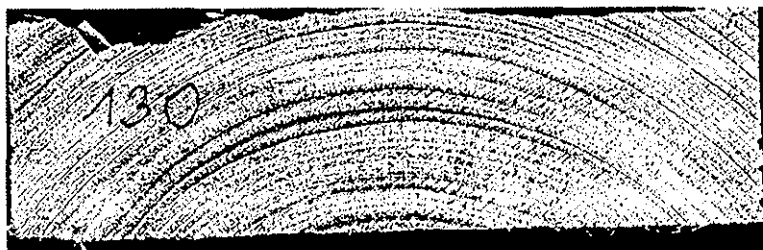
**Bild A177:** Bruchbild bsh134



**Bild A178:** Bruchbild bsh135



**Bild A179:** Bruchbild bsh136



**Bild A180:** Bruchbild bsh130



**Bild A181:** Bruchbild  
bsh137



bsh138

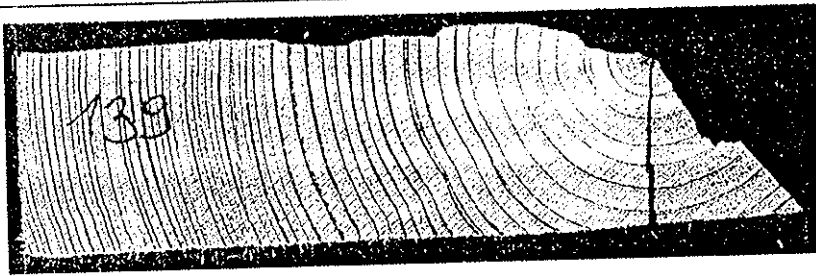


Bild A182: Bruchbild bsh139

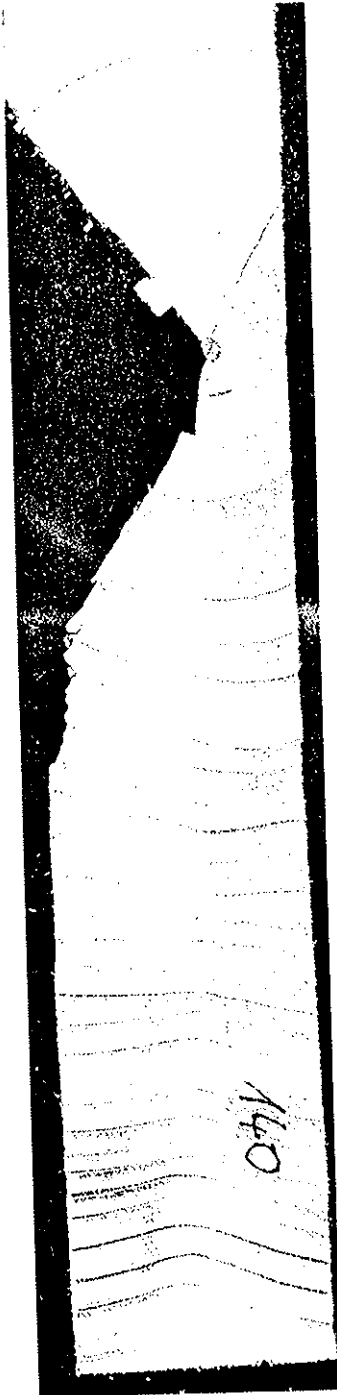
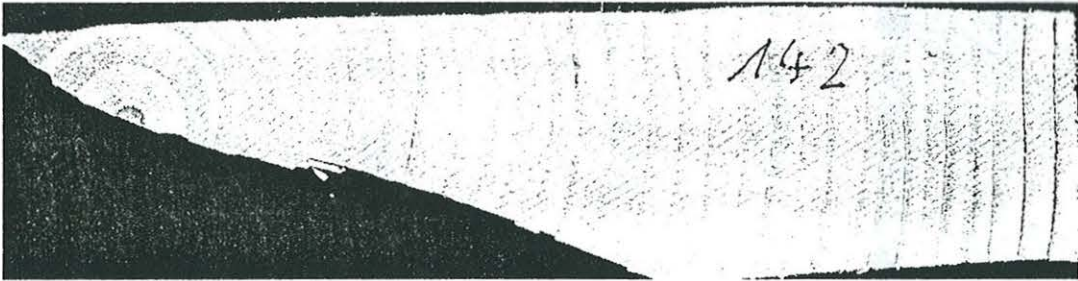


Bild A183: Bruchbild bsh140

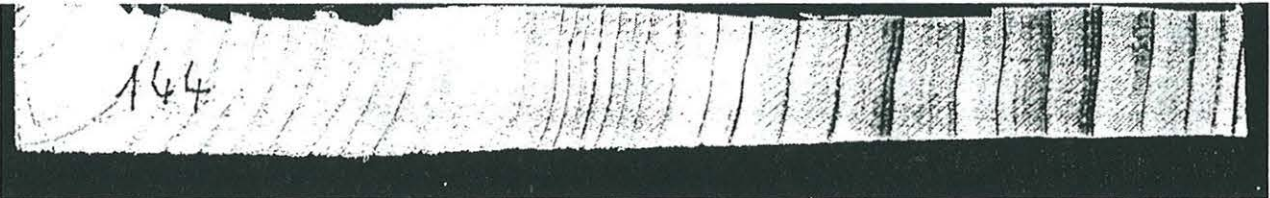




**Bild A184:** Bruchbild bsh141



**Bild A185:** Bruchbild bsh142

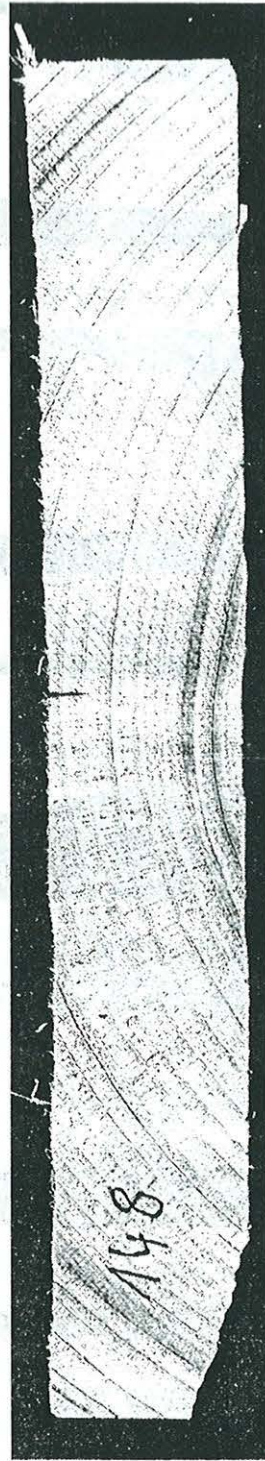
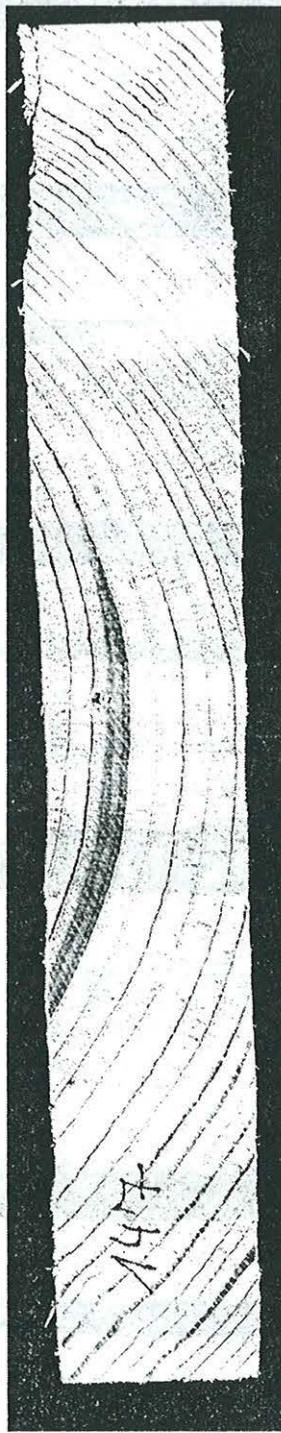
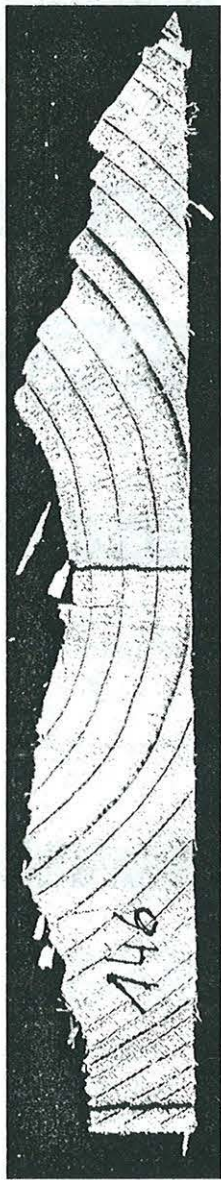


**Bild A186:** Bruchbild bsh144



Bild A187: Bruchbild bsh145





**Bild A188:** Bruchbild

bsh146

bsh147

bsh148



**Bild A189:** Bruchbild bsh149



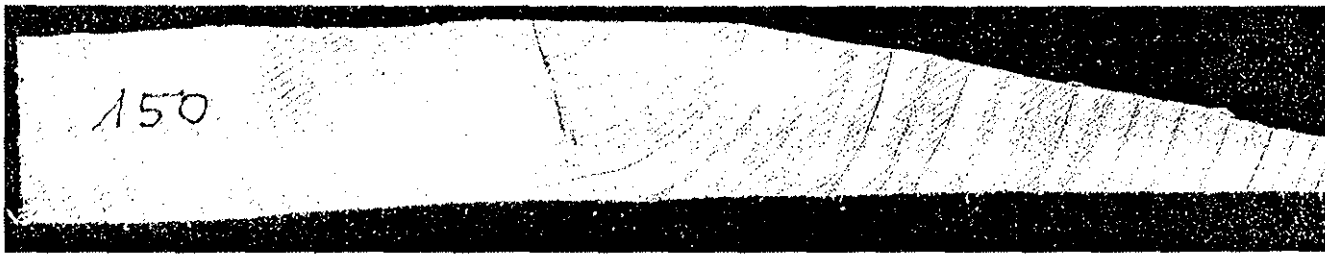


Bild A190: Bruchbild bsh150



Bild A191: Bruchbild bsh151



Bild A192: Bruchbild bsh152



Bild A193: Bruchbild bsh153

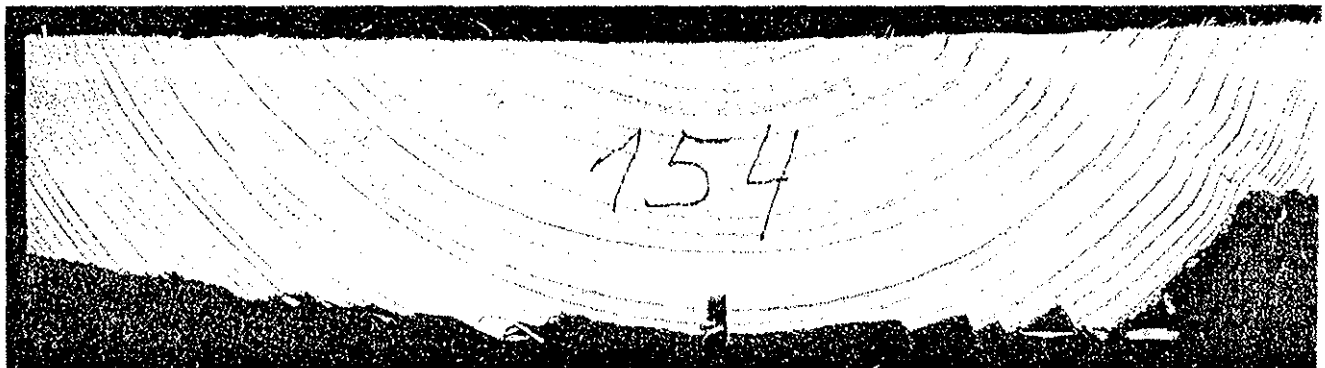
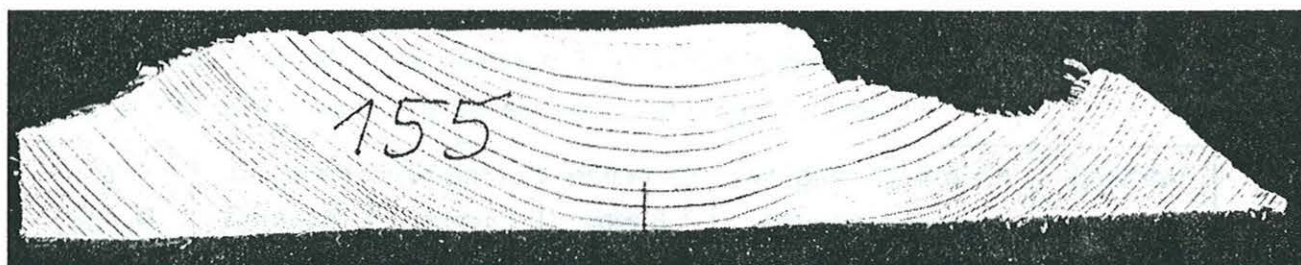
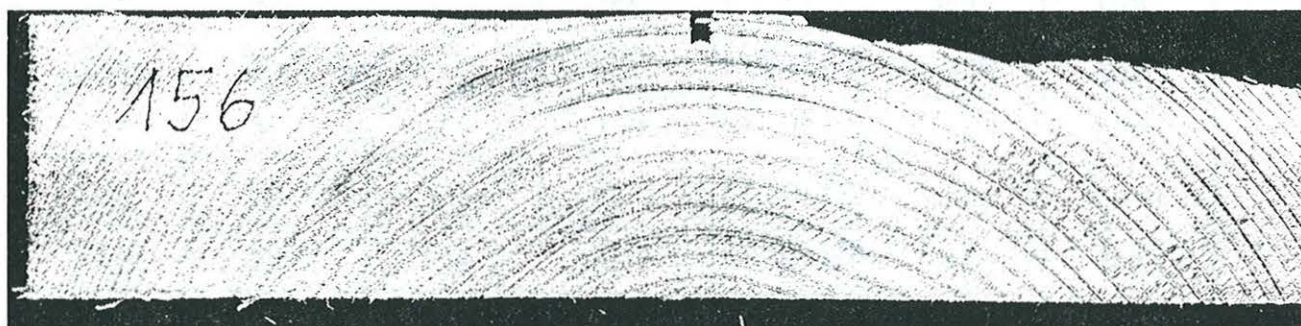


Bild A194: Bruchbild bsh154



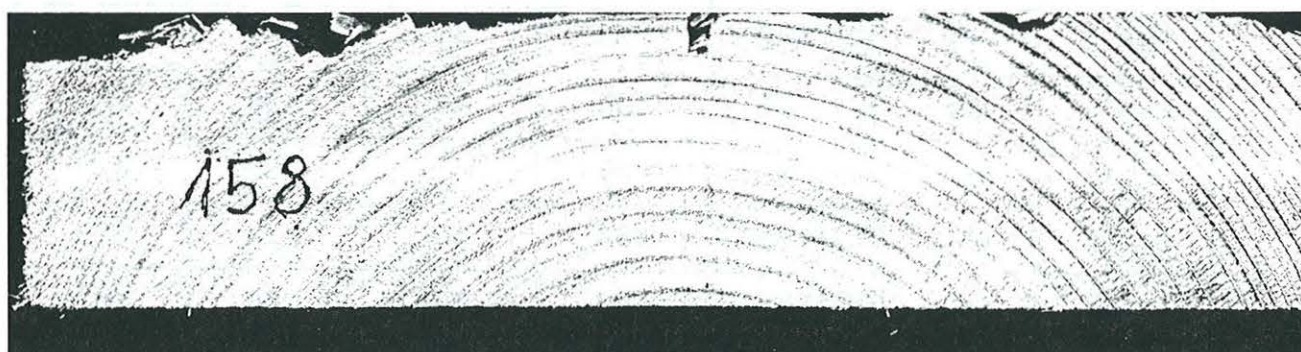
**Bild A195:** Bruchbild bsh155



**Bild A196:** Bruchbild bsh156



**Bild A197:** Bruchbild bsh157



**Bild A198:** Bruchbild bsh158

**Tabelle A3:** Zusammenstellung der Ergebnisse aller Versuche mit Brett-schichtholzprüfkörpern mit kleineren Volumen  $V < V_0 = 0,01 \text{ m}^3$

Versuch	Anzahl Lamellen	Festigkeits-klasse	Lamellen-breite [mm]	Lamellen-dicke [mm]	$f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
lam1	eine	BS11BS14	160	41	1,85	453
lam2	eine	BS11BS14	160	41	2,29	490
lam3	eine	BS11BS14	160	41	1,98	441
lam4	eine	BS11BS14	200	40	2,48	472
lam5	eine	BS11BS14	200	40	2,24	443
lam6	eine	BS11BS14	160	41	2,12	432
lam7	eine	BS11BS14	160	41	1,73	,
lam8	eine	BS11BS14	160	41	1,99	417
lam9	eine	BS11BS14	200	41	1,75	397
lam10	eine	BS11BS14	200	41	2,08	409
lam11	eine	BS11BS14	200	41	2,04	362
lam12	eine	BS11BS14	160	40	2,20	480
lam13	eine	BS11BS14	200	41	1,82	,
lam14	eine	BS11BS14	199	40	1,35	387
lam15	eine	BS11BS14	160	41	1,63	425
lam16	eine	BS11BS14	199	40	1,74	528
lam17	eine	BS11BS14	199	33	1,68	462
lam18	eine	BS11BS14	200	32	1,76	420
lam19	eine	BS11BS14	199	33	1,94	421
lam20	eine	BS11BS14	199	40	1,51	423
lam21	eine	BS11BS14	160	41	1,66	408
lam22	eine	BS11BS14	201	25	1,74	413
lam23	eine	BS11BS14	201	25	1,50	382
lam24	eine	BS11BS14	200	32	1,74	424



Tabelle A3 (Fortsetzung):

Versuch	Anzahl Lamellen	Festigkeitsklasse	Lamellenbreite [mm]	Lamellendicke [mm]	$f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
lam25	eine	BS11BS14	121	32	2,01	,
lam26	eine	BS11BS14	121	32	2,47	529
lam27	eine	BS11BS14	121	32	2,84	369
lam28	eine	BS11BS14	121	32	1,42	,
lam29	eine	BS11BS14	121	32	2,00	424
lam30	eine	BS11BS14	121	32	2,14	,
lam31	eine	BS11BS14	121	32	2,21	406
zlam1	zwei	BS18	120	32	1,81	448
zlam2	zwei	BS18	120	32	1,83	467
zlam3	zwei	BS18	120	32	1,81	434
zlam4	zwei	BS18	120	32	1,34	430
zlam5	zwei	BS18	119	32	1,22	481
zlam6	zwei	BS18	119	32	1,64	477
zlam7	zwei	BS18	118	32	1,33	419
zlam8	zwei	BS16	156	33	1,75	458
zlam9	zwei	BS18	119	32	1,49	499
zlam10	zwei	BS16	156	33	1,09	463
zlam11	zwei	BS18	121	33	1,54	485
zlam12	zwei	BS11BS14	200	40	0,97	367
zlam13	zwei	BS16	160	33	1,69	504
zlam14	zwei	BS11BS14	196	40	1,26	407
zlam15	zwei	BS18	200	32	1,88	437
zlam16	zwei	BS18	119	32	1,52	463
zlam17	zwei	BS11BS14	200	40	1,90	451
zlam18	zwei	BS11BS14	200	40	1,21	357

Tabelle A3 (Fortsetzung):

Versuch	Anzahl Lamellen	Festigkeitsklasse	Lamellenbreite [mm]	Lamellendicke [mm]	$f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
zlam19	zwei	BS16	160	33	1,50	445
zlam20	zwei	BS18	120	33	1,36	500
zlam21	zwei	BS18	119	32	1,30	518
zlam22	zwei	BS16	160	33	1,72	444
zlam23	zwei	BS18	200	32	1,57	423
zlam24	zwei	BS18	198	32	1,21	445
zlam25	zwei	BS16	160	33	1,56	509
zlam26	zwei	BS18	118	32	1,30	437
zlam27	zwei	BS18	207	32	1,52	480
zlam28	zwei	BS11BS14	160	31	1,10	512
zlam29	zwei	BS18	117	32	1,16	439
zlam30	zwei	BS18	119	32	1,59	464
zlam31	zwei	BS18	118	32	1,44	474
zlam32	zwei	BS11BS14	156	40	0,85	507
zlam33	zwei	BS18	199	32	1,78	419
zlam34	zwei	BS18	200	32	1,86	446
zlam35	zwei	BS11BS14	160	31	1,29	400
zlam36	zwei	BS16	198	32	1,94	447
zlam37	zwei	BS16	199	32	1,30	,
zlam38	zwei	BS18	199	32	1,32	434
zlam39	zwei	BS16	199	32	1,36	463
zlam40	zwei	BS18	200	32	1,54	421
zlam41	zwei	BS11BS14	155	40	0,77	440
zlam42	zwei	BS11BS14	155	40	1,13	393
zlam43	zwei	BS16	159	33	1,74	457

Tabelle A3 (Fortsetzung):

Versuch	Anzahl Lamellen	Festigkeitsklasse	Lamellenbreite [mm]	Lamellendicke [mm]	$f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
zlam44	zwei	BS16	160	33	1,37	423
zlam45	zwei	BS16	200	32	1,67	
zlam46	zwei	BS16	200	32	1,10	466
zlam47	zwei	BS16	200	32	0,82	435
zlam48	zwei	BS16	200	32	1,13	348
zlam49	zwei	BS16	200	32	1,26	390
zlam50	zwei	BS11BS14	195	40	1,09	436
zlam51	zwei	BS11BS14	196	40	1,76	473
zlam52	zwei	BS11BS14	196	40	1,89	421
zlam53	zwei	BS16	200	32	2,15	454
zlam54	zwei	BS11BS14	197	40	2,04	478
zlam55	zwei	BS11BS14	195	40	1,25	538
zlam56	zwei	BS11BS14	200	40	0,72	464
dlam1	drei	BS18	98	31	1,08	454
dlam2	drei	BS16	218	31	1,19	447
dlam3	drei	BS16	98	31	1,42	443
dlam4	drei	BS16	218	31	1,24	404
dlam5	drei	BS18	217	32	0,94	533
dlam6	drei	BS18	99	32	1,32	451
dlam7	drei	BS18	218	31	1,49	402
dlam8	drei	BS18	99	32	1,02	432
dlam9	drei	BS16	99	31	1,55	387
dlam10	drei	BS18	137	32	1,30	435
dlam11	drei	BS16	99	32	1,34	391
dlam12	drei	BS18	100	31	1,91	474



Tabelle A3 (Fortsetzung):

Versuch	Anzahl Lamellen	Festigkeitsklasse	Lamellenbreite [mm]	Lamellendicke [mm]	$f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
dlam13	drei	BS16	100	32	1,68	443
dlam14	drei	BS18	217	31	1,43	457
dlam15	drei	BS16	100	31	1,36	431
dlam16	drei	BS18	100	31	1,30	474
dlam17	drei	BS18	138	31	0,97	400
dlam18	drei	BS18	212	31	1,17	442
dlam19	drei	BS18	138	32	1,24	482
dlam20	drei	BS18	138	32	1,02	541
dlam21	drei	BS18	138	31	1,76	506
dlam22	drei	BS18	138	32	1,56	485
dlam23	drei	BS18	138	32	1,49	446
dlam24	drei	BS18	138	32	2,23	601
dlam25	drei	BS18	137	32	1,58	505
dlam26	drei	BS18	137	32	0,90	477
dlam27	drei	BS18	138	31	1,23	541
dlam28	drei	BS18	137	32	1,14	463
dlam29	drei	BS16	138	32	1,46	420
dlam30	drei	BS18	138	31	1,01	409
dlam31	drei	BS18	217	32	1,09	515
dlam32	drei	BS18	137	32	1,32	528
dlam33	drei	BS16	99	32	1,16	412
dlam34	drei	BS18	217	32	1,11	488
dlam35	drei	BS18	139	32	1,04	549
dlam36	drei	BS18	138	32	1,26	533
dlam37	drei	BS18	137	32	1,51	500

Tabelle A3 (Fortsetzung):

Versuch	Anzahl Lamellen	Festigkeitsklasse	Lamellenbreite [mm]	Lamellendicke [mm]	$f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
d1am38	drei	BS16	217	30	1,01	410
d1am39	drei	BS18	137	32	1,71	505
d1am40	drei	BS16	137	31	1,21	565
d1am41	drei	BS16	138	31	1,60	415
d1am42	drei	BS18	138	32	0,92	501
d1am43	drei	BS18	138	31	1,26	506
d1am44	drei	BS16	138	31	1,23	485
d1am45	drei	BS16	138	30	1,07	480
d1am46	drei	BS16	138	30	1,64	442
d1am47	drei	BS18	138	31	1,14	462
d1am48	drei	BS16	218	31	1,39	389
d1am49	drei	BS18	138	32	0,83	431
d1am50	drei	BS16	219	31	1,08	384
d1am51	drei	BS16	179	31	1,59	395
d1am52	drei	BS16	179	31	1,81	400
d1am53	drei	BS18	137	31	1,55	492
d1am54	drei	BS18	139	32	1,26	405
d1am55	drei	BS18	139	31	1,03	428
d1am56	drei	BS16	179	31	1,48	,
d1am57	drei	BS16	178	31	1,41	480
d1am58	drei	BS16	178	31	1,41	440
d1am59	drei	BS16	218	31	1,12	437
d1am60	drei	BS18	137	31	1,70	460
d1am61	drei	BS16	178	30	1,37	413
d1am62	drei	BS16	178	30	0,99	404

**Tabelle A3 (Fortsetzung):**

Versuch	Anzahl Lamellen	Festigkeits- klasse	Lamellen- breite [mm]	Lamellen- dicke [mm]	$f_{t,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
dlam63	drei	BS16	179	31	1,82	447
dlam64	drei	BS16	179	31	1,37	490
dlam65	drei	BS16	179	30	1,56	472
dlam66	drei	BS16	179	30	1,30	470
dlam67	drei	BS16	179	31	1,22	466



