

**UNTERSUCHUNGEN UEBER DIE FESTIGKEIT UND DAS  
DAUERSTANDVERHALTEN VON NADELVOLLHOLZ UND  
BRETTSCHICHTHOLZ BEI TORSIONSBEANSPRUCHUNG**

Untersuchungen  
durchgeführt im Auftrage  
des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau

von  
Karl Möhler und Klaus Hemmer

Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen  
an der Universität (TH) Karlsruhe

# B e r i c h t

Ermittlung von Festigkeit und Dauerstandverhalten von Nadelvollholz  
und Brettschichtholz bei Torsionsbeanspruchung.

## Inhaltsverzeichnis :

1. Zweck und Ziel der Forschungsaufgabe.
2. Literaturstudium und theoretische Grundlagen
  - 2.1 Allgemeines
  - 2.2 Holz als rhombisch kristalliner Werkstoff
  - 2.3 Anwendung der isotropen Betrachtungsweise auf den anisotropen Werkstoff Holz
3. Anlage und Durchführung der Versuche
  - 3.1 Abmessungen und Herstellung der Versuchskörper
  - 3.2 Durchführung der Versuche
4. Ergebnis der Versuche
  - 4.1 Vorversuche mit Rund- und Rechteckproben an fehlerfreiem Nadelholz
  - 4.2 Hauptversuche mit Rechteckproben mit  $36 \text{ cm}^2$  Querschnittsfläche aus fehlerfreiem Vollholz
  - 4.3 Hauptversuche mit Rechteckproben mit  $36 \text{ cm}^2$  Querschnittsfläche aus Vollholz der Güteklassen I und II
  - 4.4 Hauptversuche mit Rechteckproben mit  $6 \text{ cm} \times 24 \text{ cm}$  Querschnittsfläche aus Vollholz der Güteklassen I und II
  - 4.5 Dauerstandversuche mit fehlerfreien Vollholzrundproben von  $25 \text{ mm}$  Durchmesser
  - 4.6 Hauptversuche mit Rechteckproben von  $36 \text{ cm}^2$  Querschnittsfläche aus Brettschichtholz der Güteklasse I/II
  - 4.7 Hauptversuche mit Brettschichtholzträgern von  $6 \text{ cm} \times 24 \text{ cm}$  Querschnittsfläche unter zusätzlicher Einwirkung von Querlasten
  - 4.8 Dauerstandverhalten von Brettschichtholzträgern
5. Auswertung der Versuche
  - 5.1 Torsionsfestigkeit
  - 5.2 Torsionsmodul
6. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen
7. Literaturangabe

## 1. Zweck und Ziel der Forschungsaufgabe

Bei den neueren Konstruktionen des Ingenieurholzbaues, vor allem bei Trägerrostsystemen und Leimbauteilen, kann eine wirtschaftlichere Ausführung oft nur dann vorgenommen werden, wenn die Holzbauteile auch auf Torsion beansprucht und hierfür nachgewiesen werden können. Über Torsionsfestigkeit und Torsionsverformungsverhalten von größeren Holzbauteilen im statischen Bruchversuch und unter Dauerstandbeanspruchung stehen bisher aber kaum Werte zur Verfügung. So enthält die DIN 1052 keine Angaben über die zulässigen Torsionsbeanspruchungen und den Torsionsmodul von Vollholz und Brett-schichtholz oder über das Dauerstandverhalten. Auch die Holzbaubestimmungen anderer Länder, die teilweise neueren Datums sind, enthalten keine diesbezüglichen Unterlagen. Die Forschungsarbeit sollte daher Unterlagen über die Torsionsfestigkeit und das Torsionsverhalten (Torsionsmodul) von Nadelschnittholz und Nadelbrettschichtholz liefern, die als Grundlage für die Ergänzung der DIN 1052 dienen können.

## 2. Literaturstudium und theoretische Grundlagen

### 2.1 Allgemeines

Zu Beginn der Arbeit an dem obengenannten Forschungsvorhaben wurde die bisher über das gestellte Thema veröffentlichte Literatur durchgesehen. Eine Zusammenstellung darüber ist in Teil 7 "Literaturangabe" zu finden. Dabei stellte sich heraus, daß bisher fast stets fehlerfreie, kleine Holzprobekörper untersucht wurden, so daß eine unmittelbare

Anwendung der festgestellten Werte auf Bauholz nicht möglich ist. Zudem wurden immer Proben untersucht, bei denen neben der Fehlerfreiheit auch eine exakte Orientierung der Faser-, Radial- und Tangentialrichtung möglich war. Da diese Grundvoraussetzungen aber nicht auf das übliche Bauholz, schon garnicht auf Brettschichtholz zutreffen, war die Auswertung der Literatur bezüglich Werten wie Torsionsmodul oder Torsionsbruchspannungen nicht ergiebig. Mit Ausnahme der Arbeit von Madsen [21], die allerdings erst vor kurzem erschienen ist, lagen keinerlei Unterlagen über Torsionsdauerstandversuche vor. Als brauchbar erwiesen sich hingegen die beiden theoretischen Modelle zur Abhandlung des Torsionsproblems; allerdings müssen beide Modelle, bis eine praxisgerechte Anwendung möglich wird, ergänzt bzw. teilweise korrigiert werden. In diesem Bericht wird sowohl das älteste Modell nach de-Saint-Venant, welches in seiner Grundauführung nur für isotrope Stoffe Gültigkeit besitzt, als auch das Modell nach der Voigt'schen Kristalltheorie, welches Holz als rhombisch kristallinen Werkstoff ansieht, besprochen, um das für die Auswertung der Versuche auch im Hinblick auf die Anwendung in der Praxis, geeignete Verfahren auswählen zu können.

## 2.2 Holz als rhombisch kristalliner Werkstoff

Die von Voigt [3] hergeleiteten kristalltheoretischen Untersuchungen erscheinen auf den ersten Blick als die geeignetste Methode, um die Anisotropie des Holzes in eine Lösung des Torsionsproblems einzubauen. Holz würde in diesem Fall als ein rhombisch kristalliner Werkstoff angesehen, welcher in

Faserrichtung und senkrecht dazu in tangentialer und radialer Richtung ausgezeichnete Koordinatenachsen besitzt. Das als Grundlage dienende System der Abhängigkeiten zwischen den Dehnungen und den auftretenden Spannungen besteht im allgemeinen Fall aus einer Matrix, welche 36 Elastizitätszahlen  $s_{ik}$  enthält. Liegt die Beanspruchung eines solchen Stoffes unterhalb der Proportionalitätsgrenze und liegt ein elastisches Potential vor, so reduziert sich die Zahl der elastischen Konstanten durch die Symmetriebedingung  $s_{ik} = s_{ki}$  auf 21 Konstanten. Besitzt der Werkstoff wie das Holz zwei aufeinander senkrecht stehende Symmetrieebenen, so reduziert sich das erweiterte Hooke'sche Gesetz unter Beachtung, daß  $s_{ik} = s_{ki}$ , auf neun zahlenmäßig verschiedene Elastizitätszahlen.

Die Matrix reduziert sich also vom allgemeinen System

$$\epsilon_x = s_{11} \cdot \sigma_x + s_{12} \cdot \sigma_y + s_{13} \cdot \sigma_z + s_{14} \cdot \tau_{yz} + s_{15} \cdot \tau_{zx} + s_{16} \cdot \tau_{xy}$$

$$\epsilon_y = s_{21} \cdot \sigma_x + s_{22} \cdot \sigma_y + s_{23} \cdot \sigma_z + s_{24} \cdot \tau_{yz} + s_{25} \cdot \tau_{zx} + s_{26} \cdot \tau_{xy}$$

$$\epsilon_z = s_{31} \cdot \sigma_x + s_{32} \cdot \sigma_y + s_{33} \cdot \sigma_z + s_{34} \cdot \tau_{yz} + s_{35} \cdot \tau_{zx} + s_{36} \cdot \tau_{xy}$$

$$\gamma_{yz} = s_{41} \cdot \sigma_x + s_{42} \cdot \sigma_y + s_{43} \cdot \sigma_z + s_{44} \cdot \tau_{yz} + s_{45} \cdot \tau_{zx} + s_{46} \cdot \tau_{xy}$$

$$\gamma_{zx} = s_{51} \cdot \sigma_x + s_{52} \cdot \sigma_y + s_{53} \cdot \sigma_z + s_{54} \cdot \tau_{yz} + s_{55} \cdot \tau_{zx} + s_{56} \cdot \tau_{xy}$$

$$\gamma_{xy} = s_{61} \cdot \sigma_x + s_{62} \cdot \sigma_y + s_{63} \cdot \sigma_z + s_{64} \cdot \tau_{yz} + s_{65} \cdot \tau_{zx} + s_{66} \cdot \tau_{xy}$$

auf ein Restsystem.

Dieses Restsystem lautet:

$$\varepsilon_x = s_{11} \cdot \sigma_x + s_{12} \cdot \sigma_y + s_{13} \cdot \sigma_z$$

$$\varepsilon_y = s_{21} \cdot \sigma_x + s_{22} \cdot \sigma_y + s_{23} \cdot \sigma_z$$

$$\varepsilon_z = s_{31} \cdot \sigma_x + s_{32} \cdot \sigma_y + s_{33} \cdot \sigma_z$$

$$\gamma_{yz} = s_{44} \cdot \tau_{yz}$$

$$\gamma_{zx} = s_{55} \cdot \tau_{zx}$$

$$\gamma_{xy} = s_{66} \cdot \tau_{xy}$$

Wollte man die für diese Berechnungsart erforderlichen Gleit-  
zahlen jedoch für die verschiedenen Möglichkeiten der Voll-  
holz- und Brettschichtholzquerschnitte ermitteln, so wäre  
dieses ein so großer Aufwand, daß wohl nur ein Teil des  
Forschungsprogramms in der gegebenen Zeit und mit den vor-  
handenen Mitteln durchgeführt werden könnte. Allein die  
Tatsache, daß die Gleitzahlen  $s_{44}$ ,  $s_{55}$  und  $s_{66}$  (s. Bild 1, Anlage 1)  
auf die sich die Untersuchungen zum größten Teil erstrecken  
müßten, bei Torsionsbeanspruchung eines Stabes paarweise  
auftreten, bedingt, daß zur Bestimmung nur einer Gleitzahl  
automatisch auch die übrigen beiden ermittelt werden müssen,  
d.h. daß in jedem Fall drei Stäbe, deren Längsachse jeweils  
einmal mit der x-, y- und z-Achse zusammenfallen müßte, zu  
untersuchen sind. Da diese Stäbe nur im Falle der  
Orientierung parallel zur y-Achse des Koordinatensystems

direkt aus einem Stamm herausgearbeitet werden können, bedeutet die Herstellung eines x- oder z-Stabes nach Krabbe [4] einen sehr großen Arbeitsaufwand, wobei z.B. noch ungeklärt ist, ob die Leimflächen, welche die fehlerfreien, streng orientierten kleinen Holzwürfel, aus welchen solch ein Stab entsteht, zu einem Stab verbinden, einen Einfluß auf die gemessenen Verdrehungen haben. Die Ermittlung der Gleit Zahlen müßte zudem an total fehlerfreien Stäben unter Berücksichtigung der jeweiligen Parameter wie Rohdichte, Feuchtigkeitsgehalt, Lage und Breite der Jahrringe, usw. durchgeführt werden. Da zudem die Verdrehungen äußerst exakt gemessen werden müssen und da das benötigte Zahlenmaterial statistisch gesichert sein soll, müßte ein immenser Aufwand getrieben werden. Die dann erhaltenen Werte hätten zudem nur Gültigkeit für den exakt orientierten fehlerfreien Stab, bei dem z.B. die Breite so klein sein muß, daß die Jahrringflächen als Ebenen erscheinen. Berücksichtigt man jedoch diese gekrümmten Flächen und zudem solche Parameter wie Faserabweichung über die Stablänge oder Schrägfasrigkeit in Astbereichen, so muß anstatt mit den ermittelten  $s_{ik}$ -Werten mit, wie z.B. bei Voigt [3] oder Keylwerth [5] gezeigt wird, umgerechneten  $s'_{ik}$ -Werten gerechnet werden. Im Bauholz wechseln diese Werte jedoch schon auf sehr kurzen Entfernungen, so daß man für eine genaue Spannungs- und Verdrehungsberechnung den genauen Aufbau des später verwendeten Trägers kennen müßte und daß eine Bemessung in einer großen Zahl von Schnitten durchzuführen wäre. Weitere Schwierigkeiten

entstünden beim Übergang auf Brettschichtholz, bei dem sogar von Lamelle zu Lamelle unabhängig von der Längenkoordinate ein verschiedenes Koordinatensystem einzusetzen wäre, das sich dann zusätzlich abhängig von der Längenkoordinate ändern müßte. Da beim Konstruieren jedoch noch nicht das Aussehen des einzubauenden Trägers bekannt ist, treten bei solch einer reinen physikalischen Betrachtungsweise große Schwierigkeiten auf. Eine Berechnung der durchschnittlichen Spannungen mit der  $s_{ik}$ -Matrix wäre aber auch rein akademischer Natur, da die den Bruch erzeugende Spannung z.B. an einer Stelle starker Schrägfasrigkeit im Bereich eines Astes auftritt, wobei die Holzfestigkeit, welche für das fehlerfreie Versuchsholz ermittelt wurde, noch lange nicht erreicht ist. Somit würde bei diesem Verfahren ein Rechenwert als genaues Ergebnis vorgetäuscht, dessen Zutreffen an einer Stelle im Träger rein zufällig wäre. Wenn aber mit einem genauen Verfahren ein sehr großer Aufwand bei der Ermittlung von Grundwerten getrieben wird, so erwartet man von solch einem Verfahren im Gegensatz zu einer Näherungslösung auch genaue, bruchverursachende Ergebnisse. Ist das z.B. durch die starke Inhomogenität des Holzes nicht möglich, so scheint der Aufwand zum Erlangen der Grunddaten nicht vertretbar. Eine weitere große Schwierigkeit wäre bei dieser Berechnungsweise die umständliche Ermittlung von Spannungen und Verdrehungen, welche wie Hörig [6] zeigt, nur mit Hilfe von Tabellenwerten ermöglicht werden könnte. Zudem

weicht diese Methode stark von der **sonst** üblichen Berechnung von Spannungen ab. Da zusätzlich, wie oben erwähnt, die Genauigkeit bezüglich der brucherzeugenden Spannung oder bezüglich der auftretenden Verdrehungen bei Bauholz trotz eines großen Forschungsaufwandes relativ gering ist, empfiehlt sich diese Berechnungsmethode auch von dieser Seite her nicht. Das Modell nach der Voigt'schen Kristalltheorie ist damit für praktische Berechnungen im Holzbau unbrauchbar.

### 2.3 Anwendung der isotropen Betrachtungsweise auf den anisotropen Werkstoff Holz

Bei der Anwendung der isotropen Betrachtungsweise auf den anisotropen, inhomogenen Baustoff Holz ergibt sich ein Wert für den Torsionsmodul und ebenfalls ein Wert für die Torsionsbruchspannung. Da Holz jedoch ein anisotroper Stoff ist, für den im Prinzip zwei Gleitzahlen, welche die reziproken Schubmodulwerte darstellen, und zwei Bruchspannungen, nämlich parallel und senkrecht zum Jahrringverlauf, mit allen möglichen Zwischenkombinationen auftreten, muß diese Tatsache bei der Benutzung der isotropen Betrachtungsweise, die in diesem Zusammenhang nur eine Näherungslösung darstellt, Eingang in den Berechnungsgang finden. Wenn in dem folgenden Text von "dem Torsionsmodul" oder "der Torsionsspannung" gesprochen wird, so muß man sich darüber im klaren sein, daß diese Werte fiktive Werte darstellen, die unter Umständen an keiner Stelle eines auf Torsion beanspruchten Stabes genau auftreten.

Ermittelt man die bei Bruchversuchen auftretenden Spannungen jedoch ebenfalls nach der isotropen Theorie, so ergibt sich mit einer Einschränkung, auf welche später noch genauer eingegangen wird und unter Berücksichtigung einer geforderten Sicherheit gegenüber dem Bruchzustand eine "zulässige Spannung", mit der man eine auftretende Spannung vergleichen kann, auch wenn beide Vergleichswerte nur fiktive Rechengrößen darstellen. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt im Gegensatz zur komplizierten Berechnung nach der Kristalltheorie in einem vereinfachten Rechengang. Da zudem die effektiven Gleit Zahlen bei Bauholz infolge der starken Ungleichmäßigkeiten wie Äste, Risse und schrägem Faserlauf von Stelle zu Stelle wechseln, wäre die Angabe einer exakten Bruchspannung unsinnig, sodaß ein statistisch gesicherter mittlerer Wert vollkommen ausreichend ist. Allerdings muß man, wie oben bereits erwähnt wurde, eine Einschränkung in Kauf nehmen: hat man nämlich einen Torsionsstab mit rechteckigem Querschnitt, so erhält man bei der Berechnung der maximal auftretenden Torsionsschubspannung den Maximalwert in der Mittellinie der größeren Querschnittsseite, sofern man nach der isotropen Theorie rechnet. Wie jedoch bei den Versuchen beobachtet wurde, kann der Torsionsbruch aber auch auf der kleineren Querschnittsseite auftreten, was vom Verhältnis der Gleit Zahlen und der maßgebenden Seitenlängen abhängt. Da dieser Fall jedoch nur für Vollholzträger und weniger für Brettschichtholzträger mit ihren an den langen Querschnitts-

rändern laufend wechselnden Jahrringlagen in den Brettlamellen von Bedeutung ist, empfiehlt es sich, diesen Sonderfall mittels den Methoden der Statistik in das Gesamtprogramm zu integrieren.

Aufgrund der vorstehenden Überlegungen erscheint es zweckmäßig, die Torsion im Holzbau nach der isotropen Betrachtungsweise zu behandeln. Somit kam es vor allem darauf an, durch die Versuche den Einfluß des Querschnittsverhältnisses  $h/b$  und der Holzbeschaffenheit nach Güteklassen gegenüber der fehlerfreien Probe zu untersuchen, wobei die Feuchtigkeit des Holzes, die Jahrringlage und die Rohdichte bei den einzelnen Versuchsreihen zu beachten waren. Eine besondere Versuchsreihe war der Frage gewidmet, in welchem Maße eine gleichzeitig mit der Torsion wirkende Querkraft- und Biegebeanspruchung die "Torsionsbruchfestigkeit" beeinflusst.

Die Versuchsergebnisse, vornehmlich die bei den einzelnen Versuchsreihen festgestellten Bruchmomente  $M_{TB}$  und die Verdrehungszunahmen  $\Delta\varphi$  infolge  $\Delta M_T$  anhand der Last-Verdrehungslinien wurden in Torsionsfestigkeiten  $\tau_{TB}$  und Torsionsmoduln  $G_T$  unter Verwendung der für isotrope Baustoffe geltenden Beziehungen umgerechnet.

$$\max \tau_{TB} = \frac{M_{TB}}{W_T}$$
$$G_T = \frac{\Delta M_T \cdot L}{\Delta \varphi \cdot J_T}$$

Für das Torsionswiderstands- und-trägheitsmoment wurden dabei die nach der isotropen Theorie sich ergebenden Werte eingesetzt.

a) für den Kreisquerschnitt

$$W_T = \pi d^3/16 \qquad J_T = \pi d^4/32$$

b) für den Rechteckquerschnitt mit dem Seitenverhältnis

$$h/b = \alpha$$

$$W_T = \frac{\frac{1}{3}b^2h - \frac{64}{\pi^5} \cdot b^4 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^5} \cdot \operatorname{tgh} \frac{(2n+1) \cdot \pi \cdot \alpha}{2}}{1 - 8 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2 \pi^2 \cdot \cosh \frac{(2n+1) \cdot \pi \cdot \alpha}{2}}} = \frac{b^2 \cdot h}{3 \cdot \eta_2(\alpha)}$$

$$J_T = \frac{1}{3} b^3 h - \frac{64}{\pi^5} \cdot b^5 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^5} \cdot \operatorname{tgh} \frac{(2n+1) \cdot \pi \cdot \alpha}{2}$$

$$= \frac{1}{3} b^3 h \cdot \eta_1(\alpha)$$

Die  $\eta$ -Werte können Bild 2 (Anlage 2) oder z.B. bei [15] entnommen werden.

### 3. Anlage und Durchführung der Versuche

#### 3.1 Abmessungen und Herstellung der Versuchskörper

Da das Torsionsproblem bei Holz infolge der Anisotropie und Inhomogenität des Werkstoffes schwierig zu erfassen ist, wurde für die ersten Vorversuche zum Bestimmen des Trag- und Dauerstandverhaltens der Kreisquerschnitt gewählt, da bei diesem die geringsten Nebenwirkungen auftreten. Für diese Versuche wurden 43 fehlerfreie Rundholzproben mit einem Durchmesser von 25 mm und einer Meßlänge von 25 cm in einer Torsionsvorrichtung stufenweise bis zum Bruch belastet bzw. einer ständigen Belastung unterhalb der Bruchgrenze unterzogen. Parallellaufend dazu wurden 13 Stäbe mit Rechteckquer-

schnitt 10 mm x 35 mm mit der gleichen Versuchsvorrichtung statisch bis zum Bruch belastet. Für die Hauptversuche wurden nur Rechteckquerschnitte verwendet, wobei in einer ersten Reihe das h/b-Verhältnis variiert wurde. Diese Stäbe hatten jeweils eine Länge von 1.00 m und eine konstante Querschnittsfläche von 36 cm<sup>2</sup>. Geprüft wurden dabei die Querschnitte 6 cm/6 cm, 4 cm/9 cm, 3 cm/12 cm, 2.4 cm/15 cm und 2 cm/18 cm mit den Seitenverhältnissen 1:1, 1:2.25, 1:4, 1:6.25 und 1:9. Diese Körper wurden ebenso wie die zuvor erwähnten aus Fichtenblockware herausgearbeitet, in einer klimatisierten Halle gelagert und unmittelbar vor dem jeweiligen Versuch auf das Sollmaß gehobelt. Dabei handelte es sich um insgesamt 289 Probekörper. Eine Zusammenfassung dieser Meßreihen und des geprüften Trägermaterials ist in Tabelle 1 (Anlage 3) enthalten.

In einer weiteren Versuchsreihe mit Fichtenvollholz wurden 3 Vollstäbe mit den Querschnittsabmessungen 6 cm/24 cm und einer Stablänge von 3.2 m geprüft, welche aus dem gleichen Ausgangsmaterial wie die vorhergenannten Proben hergestellt waren. Dabei sollte neben einer Vergleichsmöglichkeit mit gleichgroßen Brettschichtholzträgern auch die Frage überprüft werden, welchen Einfluß die Stabgröße (Gesamtvolumen) bei gleichem h/b-Verhältnis auf das Torsionsverhalten hat.

Parallellaufend zu den Versuchen mit Vollstäben wurden Stäbe aus Brettschichtholz auf ihr Trag- und Verformungsverhalten unter Torsionsbelastung untersucht. Dabei hatte die erste Versuchsreihe als Vergleich zu den 1 m langen Vollholzproben die gleichen Abmessungen. Diese Versuchsreihe umfaßte insgesamt 19 Probekörper. In einer weiteren Reihe wurden 18 Brettschichtholzträger mit den Abmessun-

gen 6 cm/24 cm und einer Trägerlänge von 3.2 m getestet. Abschließend wurden jeweils noch ein 3.4 m langer Brettschichtholzträger von 36 cm Höhe und ein 4.3 m langer von 48 cm Höhe bis zum Bruch belastet; die Trägerbreite betrug in beiden Fällen 6 cm. Eine Zusammenstellung aller geprüften Träger ist in Bild 3 (Anlage 4) gegeben. Das verwendete Vollholz bestand aus Fichtenblockware, welche im Freien, aber wettergeschützt, gelagert war, bzw. aus Brettschichtholz, welches längere Zeit in einer Halle bei Normalklima lagerte. Die Holzfeuchtigkeit lag in beiden Fällen bei etwa 12 bis 14<sup>o</sup>/o, die Rohdichte betrug im Mittel  $0.47 \div 0.48 \text{ g/cm}^3$ . Zusätzlich wurden zur Erfassung des Einflusses der Rohdichte und der Feuchtigkeit noch Träger mit vom Mittel abweichenden Werten geprüft.

### 3.2 Durchführung der Versuche

Bei der Durchführung der Torsionsversuche wurden im Prinzip drei Aufbau- und Meßschemen verwendet. Alle drei Verfahren basierten auf der gleichen Belastungsgrundlage: in jedem Fall wurde das eine Stabende eingespannt, während am anderen Ende das Torsionsmoment eingeleitet wurde. Der Unterschied zwischen den Verfahren bestand hauptsächlich darin, daß dieser Vorgang auf verschiedenen Belastungsvorrichtungen durchgeführt wurde. Zusätzliche Abweichungen ergaben sich durch die Verwendung verschiedener Meßvorrichtungen und in dem zusätzlichen Aufbringen von Querlasten bei einigen Stäben. Im einzelnen wurden folgende Versuchsaufbauten verwendet.

Beim ersten Verfahren wurde eine Vorrichtung nach Bild 4 (Anlage 5) verwendet. Dabei wird das Torsionsmoment mittels Gewichten, welche an einem Faden angehängt werden, über eine Sperrholzscheibe von 30 cm Durchmesser eingeleitet. Die Versuchsvorrichtung war so konstruiert, daß auf den eingespannten Stab nur das Torsionsmoment wirken konnte. Da es sich bei den kleinen Probekörpern nur um verhältnismäßig geringe Lasten handelte, welche zum Bruch der Stäbe erforderlich waren, wurde ein möglichst reibungsfreier Lauf der Sperrholzscheibe durch Einbau von Kugellagern in den sich drehenden Einspannkopf realisiert. Bei stufenweiser Belastung wurde mit dieser Vorrichtung die Verdrehung des Stabes auf einer genau definierten Meßlänge mittels Zeigerablesung gegenüber einer fest mit den Prüfkörpern verbundenen Meßskala gemessen.

Für die Hauptversuche wurde eine Torsionsmaschine verwendet, bei der das Torsionsmoment stufenlos aufgebracht werden konnte. Dabei konnte sowohl das aufgebrachte Torsionsmoment als auch die gegenseitige Verdrehung der Einspannenden elektronisch auf einem X-Y-Schreiber aufgetragen werden. Den Versuchsaufbau zeigt Bild 5 (Anlage 6). Bei diesem Verfahren mußten die gemessenen Verdrehungen mit einem aus Eichversuchen ermittelten Korrekturwert umgerechnet werden, um die Einflüsse der Einspannbereiche auf die Gesamtverdrehung zu eliminieren.

Beim dritten Verfahren sollte es bei größeren Trägern möglich sein, neben der reinen Torsionsbelastung noch zusätzliche Querlasten in die Träger einzuleiten. Zu dieser Probereihe wurde deshalb ein Belastungssystem verwendet, bei welchem das Torsionsmoment wie bei der ersten Versuchsreihe wieder mittels an einer Scheibe angebrachter

Gewichte an einem Trägerende eingeleitet wird, während das andere Trägerende eingespannt ist. Zur Einleitung der Querlasten wurden Vorrichtungen verwendet, die garantieren, daß die Resultierenden der seitlich angehängten Lasten durch den Querschnittsmittelpunkt des Versuchsträgers gehen, unabhängig von der Schrägstellung des Trägers. Dieser Versuchsaufbau ist in Bild 6 (Anlage 7) dargestellt. Gemessen wurden die Verdrehungen in 4 Querschnitten. Bei den Trägern mit Querlasten wurden zur Kontrolle gegen plötzliches Versagen aus Biegung noch die Durchbiegungen in drei Punkten gemessen. Während die Absenkungen mittels 1/100mm-Meßuhren ermittelt wurden, erfolgte die Verdrehungsmessung mittels Fernrohr. Daraus konnten neben der Gesamtverdrehung des Trägers auch noch die einzelnen Verdrehungen eines jeden Trägerdrittels bestimmt werden.

#### 4. Ergebnis der Versuche

##### 4.1 Vorversuche mit Rund- und Rechteckproben an fehlerfreiem Nadelholz

Die bei der 1. Vorversuchsreihe statistisch ausgewerteten Torsionsbruchspannungen  $\tau_{TB}$  und Torsionsmoduln  $G_T$  sind in Tabelle 2 enthalten.

Tabelle 2:  $\tau_{TB}$ - und  $G_T$ -Werte

Abmessungen mm	$h/b = 35/10$	$\phi 25$
Zahl der Versuche	13	10
$\bar{\tau}_{TB}$ kp/cm <sup>2</sup>	200.2	103.1
$v$ o/o	14.8	7.4
$p$ kp/cm <sup>2</sup>	18.0	5.5
$\tau_{TB5}$ kp/cm <sup>2</sup>	147.2	89.1
$\bar{G}_T$ kp/cm <sup>2</sup>	8553	5635
$v$ o/o	25.7	3.2
$p$ kp/cm <sup>2</sup>	1331	129
$G_{T5}$ kp/cm <sup>2</sup>	4628	5304

Die vergleichsweise zu den Rundproben an Kreuzscherproben nach DIN 52187 ermittelten Scherfestigkeiten ergaben folgende Werte:

$$\bar{\tau}_B = 68,0 \text{ kp/cm}^2, \nu = 7,9 \text{ }^\circ\text{/o}, p = 3,9 \text{ kp/cm}^2 \text{ und } \tau_{B5} = 58,1 \text{ kp/cm}^2.$$

An Zugscherkörpern mit  $10/20 \text{ mm}^2$  Scherfläche wurden mittlere Scherfestigkeiten von  $93,8 \text{ kp/cm}^2$  (Jahrringel zur Scherfläche) und  $88,0 \text{ ko/cm}^2$  (Jahrringel || zur Scherfläche) festgestellt.

Der gegenüber den Rundholzproben deutlich höhere Variationskoeffizient bei den Rechteckproben resultiert aus der Tatsache, daß bei den Proben  $10 \text{ mm} / 35 \text{ mm}$  die Rohdichte von  $0,37 \text{ g/cm}^3$  bis  $0,45 \text{ g/cm}^3$  schwankte, was bei den Rundholzproben nicht der Fall war. Da die beiden Probereihen nicht aus demselben Holz entnommen waren, läßt sich über die absoluten Beträge der Mittelwerte noch keine eindeutige Aussage machen. Eine Zusammenstellung aller Last-Verformungslinien für die beiden Versuchsreihen ist in den Bildern 7 und 8 (Anlagen 8 u. 9) gegeben. Die Versuchsdauer betrug etwa 5 Minuten.

#### 4.2 Hauptversuche mit Rechteckproben mit $36 \text{ cm}^2$ Querschnittsfläche aus fehlerfreiem Vollholz

Die bei der Hauptversuchsreihe mit fehlerfreiem Fichtenholz statistisch ausgewerteten  $\tau_{TB}$ - und  $G_T$ -Werte sind in Tabelle 3 enthalten.

Tabelle 3:  $\tau_{TB}$ - und  $G_T$ -Werte

h/b cm	6/6	9/4	12/3	18/2
Zahl der Versuche	20	30	30	6
$\bar{\tau}_{TB}$ kp/cm <sup>2</sup>	125.8	143.0	155.3	244.5
$\nu$ %	11.6	16.8	15.7	16.8
p kp/cm <sup>2</sup>	6.8	9.0	9.1	43.1
$\tau_{TB5}$ kp/cm <sup>2</sup>	100.5	102.2	114.0	161.6
$\bar{G}_T$ kp/cm <sup>2</sup>	5564	6161	7240	10026
$\nu$ %	13.1	16.9	15.4	5.3
p kp/cm <sup>2</sup>	341	389	418	563
$G_{T5}$ kp/cm <sup>2</sup>	4306	4389	5339	8946

Die mittels X-Y-Schreiber festgestellten Last-Verdrehungslinien sind in den Bildern 9 und 10 (Anlage 10 u. 11) dargestellt. Dabei betrug die Versuchsdauer ca. 1 Sekunde. Wie man aus der obenstehenden Tabelle ersieht, steigen mit wachsendem h/b-Verhältnis sowohl die Torsionsbruchspannung als auch der Torsionsmodul, wenn man diese Werte nach der isotropen Theorie aus den Versuchen berechnet. Bei einer Verwendung der Voigt'schen Theorie unter Benützung der in [4] angegebenen Gleitzahlen war allerdings derselbe Effekt zu verzeichnen.

#### 4.3 Hauptversuche mit Rechteckproben mit 36 cm<sup>2</sup> Querschnittsfläche aus Vollholz der Güteklassen I und II

Bei den durchgeführten Untersuchungen ergaben sich die in Tabelle 4 zusammengestellten statistisch ermittelten Werte.

Tabelle 4:  $\tau_{TB}$ - und  $G_T$ -Werte

h/b cm	6/6	9/4	12/3	15/2.4
Zahl der Versuche	43	62	68	15
$\bar{\tau}_{TB}$ kp/cm <sup>2</sup>	74.6	98.3	81.4	136.2
v %	23.5	32.4	34.2	34.7
p kp/cm <sup>2</sup>	5.4	8.1	6.7	26.2
$\tau_{TB5}$ kp/cm <sup>2</sup>	45.0	45.1	35.2	55.0
$\bar{G}_T$ kp/cm <sup>2</sup>	4105	5251	4999	7124
v %	19.4	20.8	28.2	25.9
p kp/cm <sup>2</sup>	245	277	341	1022
$G_{T5}$ kp/cm <sup>2</sup>	2767	3429	2656	3875

Wie bei den unter 4.2 beschriebenen Versuchen betrug auch hier die Zeitdauer vom Belastungsbeginn bis zum Eintreten des Bruches ca. 1 Sekunde. Gegenüber dem fehlerfreien Material ergab sich eine

erheblich stärkere Streuung. Eine Zusammenstellung der gemessenen Last-Verformungslinien ist in den Bildern 11 und 12 (Anlage 12 u. 13) gegeben. Eine Gegenüberstellung für die Güteklasse 0, I und II beim Querschnitt  $4 \times 9 \text{ cm}^2$  zeigt Bild 13 (Anlage 14).

Weitere 13 Probekörper wurden mit stark unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt geprüft, um den Einfluß der Holzfeuchtigkeit auf die Torsionsfestigkeit und den Torsionsmodul zu ermitteln. Der Feuchtigkeitsgehalt betrug dabei zwischen  $6.2\%$  und  $28.6\%$ . Die erhaltenen Last-Verdrehungslinien sind in Bild 14 (Anlage 15) dargestellt. Auffällig ist dabei, daß die Bruchfestigkeit mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt ansteigt, während im allgemeinen beim Werkstoff Holz eine Abnahme der Festigkeiten erwartet wird. Der Torsionsmodul dagegen nahm mit steigender Holzfeuchte ab, wie aus Bild 15 (Anlage 16) hervorgeht.

#### 4.4 Hauptversuche mit Rechteckproben mit 6 cm x 24 cm Querschnittsfläche aus Vollholz der Güteklassen I und II

Die Zusammenstellung der aus den Versuchen errechneten Grundwerte ist in Tabelle 5 gegeben.

Tabelle 5: Grundwerte der Vollholzträger 6 cm x 24 cm

Träger	$E_B$ kp/cm <sup>2</sup>	$G_T$ kp/cm <sup>2</sup>	$\tau_{TB}$ kp/cm <sup>2</sup>
V 1	107700	9300	85.7
V 2	146700	5140	>69.3 *)
V 3	131200	7140	82.4

\*) Beim Träger V 2 wurde das Bruchversagen nicht erreicht, da ein weiteres Verdrehen der Torsionsmaschine nicht möglich war.

Die Versuchsdauer betrug ca. 30 Minuten. Mit diesen Versuchen sollte ein möglicher Einfluß der Trägergröße ermittelt werden können.

4.5 Dauerstandversuche mit fehlerfreien Vollholzrundproben von 25 mm Durchmesser

Bei den mit  $\tau_{TD}$  von 59 bis 98 kp/cm<sup>2</sup> dauerbeanspruchten Proben wurden Dauerstandzeiten  $t_D$  zwischen 2 Sekunden und 24 663 Stunden erreicht. Eine Zusammenstellung der Versuchsergebnisse der gebrochenen Träger ist in den Bildern 16 und 17 (Anlage 17 u. 18) gegeben. Hieraus ist die Zunahme der Verdrehung mit der Zeit und die Dauer bis zum Bruch zu erkennen. Da diese Versuche in einem normklimatisierten Raum durchgeführt wurden, wiesen alle Proben nahezu den gleichen Feuchtigkeitsgehalt auf, zumal sie schon ausreichend lange vor Versuchsbeginn dort gelagert waren.

4.6 Hauptversuche mit Rechteckproben von 36 cm<sup>2</sup> Querschnittsfläche aus Brettschichtholz der Güteklasse I/II

Bei den 19 geprüften Probekörpern ergaben sich die folgenden statistisch ausgewerteten  $\tau_{TB}$ - und  $G_T$ -Werte

Tabelle 6:  $\tau_{TB}$ - und  $G_T$ -Werte

n/b cm	6/6	9/4	12/3	15/2.4
Zahl der Versuche	4	5	5	5
$\bar{\tau}_{TB}$ kp/cm <sup>2</sup>	64.1	61.4	76.5	80.0
v %	8.1	6.0	5.2	8.1
p kp/cm <sup>2</sup>	8.3	4.6	4.9	8.1
$\tau_{TB5}$ kp/cm <sup>2</sup>	51.8	53.6	68.1	66.1
$\bar{G}_T$ kp/cm <sup>2</sup>	4915	5329	6055	6468
v %	7.9	5.7	6.9	5.6
p kp/cm <sup>2</sup>	621	376	517	449
$G_{T5}$ kp/cm <sup>2</sup>	3997	4683	5166	5698

Die Versuchsdauer betrug bei dieser Versuchsreihe etwa 1 Sekunde. Wie man durch einen Vergleich mit den Tabellen 3 und 4 erkennen kann, sind die Streuungen bei Brettschichtholz bei weitem nicht so stark wie beim Vollholz. Die erreichten Bruchspannungen liegen bei den 5<sup>o</sup>/o-Fraktilen-Werten **über** dem Niveau vom fehlerbehafteten Fichtenvollholz, der Torsionsmodul dagegen erreicht etwa die Werte des fehlerfreien Materials. Die erhaltenen Last-Verformungslinien sind in Bild 18 (Anlage 19) aufgezeichnet.

4.7 Hauptversuche mit Brettschichtholzträgern von 6 cm x 24 cm Querschnittsfläche unter zusätzlicher Einwirkung von Querlasten

Bei dieser Versuchsreihe wurden Träger, die nur einem Torsionsmoment ausgesetzt waren und Träger unter einer Belastungskombination, bestehend aus Torsionsbelastung und Querlasten, geprüft. Eine Zusammenstellung der dabei erhaltenen Werte ist in Tabelle 7 gegeben.

Tabelle 7:  $\tau_{TB}$ - und  $G_T$ -Werte bei verschiedener Höhe von  $\tau_Q$  und  $\sigma_B$  aus Querlasten

Träger Nr.	$\tau_Q/\sigma_B$ kp/cm <sup>2</sup>	$\tau_{TB}$ kp/cm <sup>2</sup>	E kp/cm <sup>2</sup>	$G_T$ kp/cm <sup>2</sup>	$G_{T1}$ kp/cm <sup>2</sup>	$G_{T2}$ kp/cm <sup>2</sup>
1	0	63,2	-	7770	7035	7188
2	0	69,5	134600	7140	6879	6733
3	0	65,5	123800	7530	6934	7594
4	0	73,0	120000	7430	7192	7534
5	0	63,9	104200	7720	7527	7025
6	2,6/43,8	74,1	145900	7640	6859	7337
7	4,7/78,9	69,8	151300	7950	6362	7397
8	6,0/99,9	73,6	126700	7550	7534	7359
9	7,2/119,7	62,3	123800	8320	6002	7669
10	8,9/147,6	71,5	149100	6920	4574	6260
11	12,0/199,5	53,2	124000	5630	3667	4673
12	18,0/300,0	41,3	123800	7750	4168	7919
13	18,0/299,8)	48,1	111200	6460	4074	6443
14	30,7/508	-	159000	-	-	-

1) Biegebruch ( $\sigma_B = 508 \text{ kp/cm}^2$ ). Schubbrüche traten bei 2 Vergleichsträgern mit den Abmessungen  $L = 3,00 \text{ m}$ ,  $h = 66 \text{ cm}$  und  $b = 12 \text{ cm}$  bei  $\tau = 49,6 \text{ kp/cm}^2$  und  $51,3 \text{ kp/cm}^2$  auf.

Die Versuchsdauer betrug nach Anbringen der vollen Querlasten bei stufenweiser Steigerung des Torsionsmomentes ca. 30 Minuten. Der Torsionsbruch erfolgte jeweils im querkraftbeanspruchten Abschnitt 1. Ein deutlicher Abfall der Torsionsfestigkeit war in diesem durch Schub und Biegung zusätzlich beanspruchten Abschnitt erst bei  $\tau_Q$  größer  $9 \text{ kp/cm}^2$  festzustellen (Bild 19). Hier nahm auch der Schubmodul  $G_{T1}$  gegenüber dem vorwiegend auf Biegung beanspruchten Abschnitt 2 schon etwas früher ab. Die Verdrehungszunahme des Gesamtträgers blieb dagegen praktisch konstant, da im Abschnitt 3 durch die Einspannwirkung in der Torsionsscheibe eine Verformungsbehinderung wirksam wurde.

Zusätzlich wurde je 1 Brettschichtträger 6/36 cm und 6/48 cm bis zum Bruch einem reinen Torsionsversuch unterworfen. Der Träger 6/36 mit  $E = 114500 \text{ kp/cm}^2$  hatte einen Schubmodul von  $G_T = 7000 \text{ kp/cm}^2$  bei einer Torsionsfestigkeit von  $72,4 \text{ kp/cm}^2$ , während der Träger 6/48 mit  $E = 118700 \text{ kp/cm}^2$  ein  $G_T$  von  $8870 \text{ kp/cm}^2$  und einer Bruchfestigkeit von  $\tau_{TB} = 91,2 \text{ kp/cm}^2$  ergab. Auch hier läßt sich eine Zunahme der Torsionsfestigkeit und des Torsionsmoduls mit größer werdender Querschnittsschlankheit erkennen.

#### 4.8 Dauerstandverhalten von Brettschichtholzträgern

Analog zu den unter 4.5 geprüften Rundholzproben wurden 3 Brettschichtholzträger auf ihr Dauerstandverhalten hin untersucht. Die dabei erhaltenen Lastdauer-Verformungslinien sind in Bild 20 (Anlage 21) dargestellt. Bei der Versuchsdurchführung wurden die Träger einer konstanten Belastung ausgesetzt, wobei die Zunahme der Verdrehungen in Abhängigkeit von der Belastungsdauer gemessen wurde. Wenn die Verformungen über längere Zeit nahezu konstant blieben, wurde die Belastung gesteigert. Der mit  $53,1$  bis  $61,1 \text{ kp/cm}^2$  beanspruchte Träger brach nach 864 Stunden (36 Tagen), während bei den beiden restlichen Trägern, die bei  $\tau_T = 13,2$  und  $18,8 \text{ kp/cm}^2$  nach 110 Stunden nur eine

geringe Verdrehungszunahme aufwiesen, nach Verdopplung der Beanspruchung auch nach 11328 Stunden (472 Tagen) keine Anzeichen eines Versagens festzustellen waren. Die Versuche wurden daher mit einem Bruchversuch abgebrochen, zumal die Meßeinrichtung wegen Fremdeinwirkung (Erdbeben) nicht mehr einwandfrei arbeitete. Es scheint ab 4000 Stunden keine Verdrehungszunahme mehr aufgetreten zu sein. Der Träger 5/9, der Dauertorsionsbeanspruchungen von 13,2 und 26,4 kp/cm<sup>2</sup> ausgesetzt war, hatte im abschließenden statischen Versuch einen Schubmodul von 7467 kp/cm<sup>2</sup> und eine Torsionsbruchfestigkeit von 77,7 kp/cm<sup>2</sup>. Der Träger 5/12 mit 18,8 und 37,6 kp/cm<sup>2</sup> Dauertorsionsbeanspruchung ergab einen Torsionsmodul von 6517 kp/cm<sup>2</sup> und eine Torsionsbruchfestigkeit von 67,2 kp/cm<sup>2</sup>. Diese Werte lassen keinen abmindernden Einfluß der Dauerbeanspruchung auf die bei statischen Bruchversuchen zu erwartenden  $\tau_B$ - und  $G_T$ -Werte erkennen.

#### 5. Auswertung der Versuche

Die Auswertung der Versuchsergebnisse zeigte, daß man beim Werkstoff Holz die Einflüsse der Güteklasse, der Rohdichte, der Trägergröße, des h/b-Verhältnisses, des Feuchtigkeitsgehaltes und der Zeitdauer der Lasteinwirkung berücksichtigen muß, wenn man einigermaßen vergleichbare Verformungs- und Bruchergebnisse nach der isotropen Theorie erhalten will. Einflüsse wie die Lage der Jahrringe im Querschnitt, Spätholzanteil usw., die sich sicherlich auch auf die Ergebnisse auswirken, aber in der Baupraxis nicht festgelegt werden können, wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Bei der rechnerischen Erfassung

der Meßwerte wurde als Grundlage ein Holz angenommen, welches einen Feuchtigkeitsgehalt von 12<sup>0</sup>/o und dabei eine Rohdichte von 0.38 g/cm<sup>3</sup> besitzt.

### 5.1 Torsionsfestigkeit

Bei Benutzung der isotropen Theorie und bei Berücksichtigung von Einflüssen wie der Zeit und eventuell vorhandene Querlasten stellt sich die Frage, welchen Wert zul  $\tau_T$  annehmen darf, wenn man den Torsionsspannungsnachweis nach den auf den Seiten 9 und 10 aufgeführten Formeln führt. Eine Lösung für die im Abschnitt 4 aufgezeigte Problematik würde eine zulässige Torsionsspannung in der Form

$$\text{zul } \tau_T = \frac{\tau_{TB}^0}{v} \cdot k_{r12} \cdot k_u \cdot k_{h/b} \cdot k_{Gkl} \cdot k_t \cdot k'_{\tau Q} \cdot k_{Gr}$$

darstellen. Darin bedeuten :

- $\tau_{TB}^0$  = 5<sup>0</sup>/o-Bruchfestigkeit bei reiner Torsionsbelastung, ermittelt an Probestäben von quadratischem Querschnitt durch statische Bruchversuche (Versuchsdauer t = 1 Stunde).
- v = Sicherheitszahl. Vorschlag : v = 2,5
- $k_{r12}$  = Einflußfaktor der Rohdichte
- $k_u$  = Einflußfaktor der Holzfeuchtigkeit
- $k_{h/b}$  = Einflußfaktor für das Höhen-Breiten-Verhältnis
- $k_{Gkl}$  = Einflußfaktor der Güteklasse nach DIN 4074
- $k_t$  = Einflußfaktor der Standzeit

$k_{\tau Q}$  = Einflußfaktor für eine gleichzeitig wirkende Schubspannung aus Querkraft

$k_{Gr}$  = Einflußfaktor der Trägergröße (Volumen)

Bei der Ermittlung des ersten Faktors, dem Einfluß der Rohdichte, wurden alle übrigen Werte konstant oder näherungsweise konstant gehalten. Beim Bestimmen des nächsten Faktors konnte dann der zuerst ermittelte durchaus variieren, da eine Korrektur der Meßwerte mit der zuvor gefundenen Abhängigkeit möglich war. Die so ermittelten Abhängigkeiten sind in den Bildern 21 bis 26 (Anlage 22 bis 27) und in Tabelle 3 (Seite 25) dargestellt, wobei die Versuchspunkte mit Näherungskurven zu Beziehungen zusammengefaßt wurden. Die daraus erhaltenen Funktionen sind in der folgenden Zusammenstellung gegeben:

$$k_{r_{12}} = 1 + 3 (r_{12} - 0,38) \quad \text{gültig für VH und BSH (siehe Bild 21)}$$

$$k_u = 0,9032 + 0,00807u \quad \text{gültig für VH und BSH (siehe Bild 22)}$$

$u$  in %

$$k_{h/b} = 1,4 - \frac{1}{2,5} \cdot e^{-\frac{[(h/b)-1]^2}{14,22}} \quad \text{gültig für VH und BSH (siehe Bild 23)}$$

$$k_{Gkl \text{ I}} = k_{Gkl \text{ II}} = 1 ; k_{Gkl \text{ 0}} = 1,75 \quad \text{gültig für VH und BSH (siehe Bild 24)}$$

$$k_t = 1 - 0,0562 \cdot \lg(t) \quad \text{gültig für VH und BSH (siehe Bild 25)}$$

$t$  in Stunden

$$k_{\tau Q} = 1 - (\tau_Q/30)^2 \text{ [Bruchzustand]} \quad \text{gültig für VH und BSH (siehe Bild 26)}$$

$$k'_{\tau Q} = 1 - (\tau_Q/12)^2 \text{ [Gebrauchszustand]}$$

$k_{Gr}$  Hierfür liegen noch nicht genügend Versuchswerte vor, so daß bei VH und BSH mit  $k_{Gr} = 1$  gerechnet wird.

Die Auswertung der Hauptversuchsreihen mit Voll- und Brett-schichtholz der Güteklasse I/II ergab folgende Werte  $\tau_{TB}^0$  :

Für Vollholz (VH):  $\tau_{TB}^0 = 25,7 \text{ kp/cm}^2$

Für Brettschichtholz (BSH):  $\tau_{TB}^0 = 34,8 \text{ kp/cm}^2$

## 5.2 Torsionsmodul

In der gleichen Weise wie die Torsionsfestigkeit bei einer Be-rechnung nach der isotropen Theorie dem Werkstoff Holz angegli-chen werden mußte, muß auch die Ermittlung eines statistisch gesicherten Grundwertes für einen Torsionsmodul vorgenommen werden.

Bei Annahme einer **Abhängigkeit** nach der Beziehung

$$G_T = G_T^0 \cdot m_{r_{12}} \cdot m_u \cdot m_{h/b} \cdot m_{Gkl} \cdot m_t \cdot m_{\tau Q} \cdot m_{Gr}$$

bedeuten

- $G_T^0$  = Mittelwert des Torsionsmoduls festgestellt an Probestäben mit quadratischem Querschnitt.
- $m_{r_{12}}$  = Einflußfaktor der Rohdichte bezogen auf  $r_{12} = 0,38 \text{ g/cm}^3$
- $m_u$  = Einflußfaktor der Holzfeuchtigkeit
- $m_{h/b}$  = Einflußfaktor des Höhen-Breiten-Verhältnisses
- $m_{Gkl}$  = Einflußfaktor der Güteklasse nach DIN 4074
- $m_t$  = Einflußfaktor der Standzeit
- $m_{\tau Q}$  = Einflußfaktor für eine gleichzeitig wirkende Schubspannung aus Querkraft
- $m_{Gr}$  = Einflußfaktor der Trägergröße (Volumen)

Die Ermittlung der einzelnen Faktoren wurde in derselben Weise vor-genommen, wie sie unter 5.1 für die Torsionsfestigkeit beschrieben

Material	Querschnitts- abmessungen b/h in cm	$\tau_5$ °/° kp/cm <sup>2</sup>	$r_{12}$ g/cm <sup>3</sup>	u °/°	t h	$k_{r12}$	$k_u$	$k_{h/b}$	$k_t$	$\tau_{TB}^0$ kp/cm <sup>2</sup>
Voll- holz (Fichte)	6/6	45,0	0,442	13,7	4,0	1,186	1,0138	1,0000	1,2	31,2
	4/9	45,1	0,474	13,7	4,0	1,282	1,0138	1,0416	1,2	27,8
	3/12	35,2	0,457	13,8	4,0	1,231	1,0146	1,1876	1,2	19,8
	2,4/15	53,0	0,492	14,0	4,0	1,336	1,0162	1,3424	1,2	24,2
Mittelwert		44,6								25,7
Brett- schicht- holz (Fichte)	6/6	51,8	0,480	12,9	4,0	1,300	1,0073	1,0000	1,2	33,0
	4/9	53,6	0,479	11,4	4,0	1,297	0,9952	1,0416	1,2	33,2
	3/12	68,1	0,457	11,3	4,0	1,231	0,9944	1,1878	1,2	39,0
	2,4/15	66,1	0,450	11,4	4,0	1,210	0,9952	1,3424	1,2	34,1
Mittelwert		59,9								34,8

**Tabelle 8:** Bestimmung der Grundwerte der Torsionsfestigkeit für Fichtenvollholz und Brettschichtholz der Güteklasse I/II

wurde. Die Festsetzung der Beziehungen aus den Meßpunkten ist in den Bildern 27 bis 33 (Anlagen 28 bis 34) und in Tabelle 9 (Seite 27) dargestellt. Die dabei erhaltenen Abhängigkeiten lauten:

$$\begin{aligned}
 m_{r_{12}} &= 1 + 5,56 (r_{12} - 0,38) && \text{gültig für VH und BSH} \\
 & && \text{(siehe Bild 27 und 28)} \\
 m_u &= 1 - 0,01242 (u - 12) && \text{gültig für VH und BSH} \\
 & \quad u \text{ in } \text{‰} && \text{(siehe Bild 29)} \\
 m_{b/h} &= 0,0835 (h/b) + 0,9165 && \text{gültig für VH und BSH} \\
 & \quad h/b \geq 1 && \text{(siehe Bild 30)} \\
 m_{\text{Gkl I}} = m_{\text{Gkl II}} &= 1,0 ; m_{\text{Gkl 0}} = 1,77 && \text{gültig für VH und BSH} \\
 & && \text{(siehe Bild 31)} \\
 m_t^{\text{Vt}} &= \frac{1,1167}{1 + 0,1167 \cdot t^{0,257}} && \text{gültig für VH} \\
 & \quad t \text{ in Stunden} && \text{(siehe Bild 32)} \\
 m_t^{\text{BSH}} &= \frac{1,0495}{1 + 0,0495 \cdot t^{0,261}} && \text{gültig für BSH} \\
 & && \text{(siehe Bild 33)} \\
 m_{\tau Q} & && \text{Hierfür liegen noch nicht genügend Versuchswerte vor,} \\
 m_{\text{Gr}} & && \text{so daß bei VH und BSH mit "1" gerechnet wird.}
 \end{aligned}$$

Ein eindeutiger Einfluß der Trägergröße auf den Torsionsmodul konnte nicht festgestellt werden. Bei gleichzeitig auf Querkraftschub beanspruchten Trägerabschnitten ist nach Tabelle 7 mit einer Abnahme des Torsionsmoduls zu rechnen, wenn die Schubspannungen aus den Querlasten über den Wert von  $6 \text{ kp/cm}^2$  hinausgehen. Bei vorwiegend auf Torsion beanspruchten Stäben kann man davon ausgehen, daß im Bereich der zulässigen Spannungen mit einem gleichbleibenden Torsionsmodul für Kurzzeitbelastungen gerechnet werden kann, da die Proportionalitätsgrenze der Last-Verdrehungslinien meistens über 50 ‰ der Bruchfestigkeit lag.

Die Auswertung der Hauptversuchsreihen mit Voll- und Brettschichtholz der Güteklasse I/II ergab nach Tabelle 9 folgende  $G_{\text{T}}^{\text{0}}$ -Werte:

$$\begin{aligned}
 \text{Für Vollholz (VH) :} & \quad G_{\text{T}}^{\text{0}} = 2793 \text{ kp/cm}^2 \\
 \text{Für Brettschichtholz (BSH) :} & \quad G_{\text{T}}^{\text{0}} = 3081 \text{ kp/cm}^2
 \end{aligned}$$

Material	Querschnitts- abmessungen b/h in cm	$\bar{G}_T$ kp/cm <sup>2</sup>	$r_{12}$ g/cm <sup>3</sup>	u o/o	t h	$m_{r_{12}}$	$m_u$	$m_{h/b}$	$m_t$	$G_T^o$ kp/cm <sup>2</sup>
Voll- holz (Fichte)	6/6	4105	0,442	13,7	2,78 · 10 <sup>-4</sup>	1,3447	0,9789	1,0000	1,1010	2832
	4/9	5251	0,474	13,7	2,78 · 10 <sup>-4</sup>	1,5226	0,9789	1,1044	1,1010	2897
	3/12	4999	0,457	13,8	2,78 · 10 <sup>-4</sup>	1,4281	0,9776	1,2505	1,1010	2601
	2,4/15	7124	0,492	14,0	2,78 · 10 <sup>-4</sup>	1,6227	0,9752	1,4384	1,1010	2843
Mittelwert		5370								2793
Brett- schicht- holz (Fichte)	6/6	4915	0,480	12,9	2,78 · 10 <sup>-4</sup>	1,5560	0,9888	1,0000	1,0434	3062
	4/9	5329	0,479	11,4	2,78 · 10 <sup>-4</sup>	1,5504	1,0075	1,1044	1,0434	2961
	3/12	6055	0,457	11,3	2,78 · 10 <sup>-4</sup>	1,4281	1,0087	1,2505	1,0434	3221
	2,4/15	6468	0,450	11,4	2,78 · 10 <sup>-4</sup>	1,3892	1,0075	1,4384	1,0434	3079
Mittelwert		5692								3081

**Tabelle 9:** Bestimmung der Grundwerte des Torsionsmoduls für Fichtenvollholz und Brettschichtholz der Güteklasse I/II

### Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Die Auswertung von Torsionsversuchen an Vollholz- und Brettschichtholzstäben zwecks Ermittlung der wirklichen Torsionsbruchspannungen und Torsionsmoduln stößt auf unüberwindliche Schwierigkeiten, wenn man die Anisotropie und Inhomogenität der in der Praxis vorliegenden Holzkörper berücksichtigen wollte. Die für den idealen Holzstab als rhombisch kristalliner Körper aufgestellten Theorien versagen, da bei den in der Praxis stets vorliegenden größeren Holzquerschnitten und den durch die Wuchseigenschaften in Längs- und Querrichtung vorliegenden Änderungen die Orientierung der Einzelbereiche in Bezug auf ein anzunehmendes Koordinatensystem willkürlich wechseln und für den Gesamtstab nicht festgelegt werden kann. Die Versuche wurden daher auf der Grundlage der isotropen Betrachtungsweise angelegt und ausgewertet. Die angegebenen Festigkeitswerte  $\tau_{TB}$  (Torsionsbruchfestigkeit) und Torsionsmoduln  $G_T$  sind somit keine reellen Stoffeigenschaften, sondern können nur im Zusammenhang mit den angegebenen Querschnittswerten  $W_T$  und  $J_T$  für Festigkeits- und Verformungsberechnungen verwendet werden.

Die Versuche mit fehlerfreien Fichtenholzstäben haben gezeigt, daß sowohl die rechnerischen Festigkeiten  $\tau_{TB}$  als auch die Torsionsmoduln  $G_T$  über das durch  $W_T$  und  $J_T$  erfaßte Maß des Querschnittsverhältnisses  $h/b$  hinaus beim Rechteckquerschnitt mit der Querschnittsschlankheit zunehmen. Außerdem wurde festgestellt, daß die Größen  $\tau_{TB}$  und  $G_T$  von der Rohdichte und dem Feuchtigkeitsgehalt des Holzes abhängig sind. Es war daher erforderlich, diese Einflüsse bei der

Auswertung der Versuche zu berücksichtigen. Holzfehler, vor allem Schrägfaserlauf und Trockenrisse, setzen die Torsionsfestigkeit und den Torsionsmodul gegenüber fehlerfreiem Holz stark herab, wobei vor allem die Streuungen größer werden und damit die 5<sup>o</sup>/o-Fraktile-Werte stärker absinken als die Mittelwerte. Für die einzelnen vergleichbaren Querschnitte von fehlerbehaftetem gegenüber fehlerfreiem Vollholz ergaben sich Abnahmen der Mittelwerte von  $\tau_{TB}$  von 31 bis 48 <sup>o</sup>/o, bei  $G_T$  von 15 bis 31 <sup>o</sup>/o.

Bei den 5<sup>o</sup>/o-Fraktilen betrug die Abnahmen 55 bis 69 <sup>o</sup>/o bei den Torsionsfestigkeiten und 22 bis 50 <sup>o</sup>/o bei den Torsionsmoduln.

Bei Brettschichtholz wurden zwar noch um 6 bis 41 <sup>o</sup>/o geringere Torsionsbruchwerte als bei Konstruktionsvollholz festgestellt. Da aber die Streuung wesentlich geringer war, lagen die 5<sup>o</sup>/o-Fraktilen um 15 bis 25 <sup>o</sup>/o, beim Querschnitt 3/12 sogar um 93 <sup>o</sup>/o höher. Bei den  $G_T$ -Werten waren die Mittelwerte praktisch gleich, die 5<sup>o</sup>/o-Werte um 37 bis 47 <sup>o</sup>/o bzw. 95 <sup>o</sup>/o höher.

Während bei fehlerfreien Fichtenvollholzstäben bis 36 cm<sup>2</sup> Querschnittsfläche mittlere "Torsionsfestigkeiten" je nach Querschnittsform von 103 bis 244 kp/cm<sup>2</sup> festgestellt wurden, lagen die Werte für Vollholz der Güteklasse I/II bei 75 bis 136 kp/cm<sup>2</sup>. Bei Brettschichtholz der Güteklasse I/II ergaben sich Werte von 63 bis 91 kp/cm<sup>2</sup>. Beim "Torsionsmodul" lagen die Werte zwischen 4000 und 10 000 kp/cm<sup>2</sup>.

Um Rechenwerte festlegen zu können, wurden die Versuchswerte auf eine Rohdichte von  $r_{12} = 0,38$  g/cm<sup>3</sup> und eine Holzfeuchte von  $u = 12$  <sup>o</sup>/o für den quadratischen Stabquerschnitt umge-

rechnet. Diese Auswertung der Versuche ergab folgende Grundwerte :

Torsionsfestigkeit (aus 5<sup>o</sup>/o-Fraktilen) :

Für Vollholz :  $\tau_{TB}^o = 25,7 \text{ kp/cm}^2$

Für Brettschichtholz :  $\tau_{TB}^o = 34,8 \text{ kp/cm}^2$

Für rechteckige Querschnitte mit einem Seitenverhältnis von  $h/b \geq 2$  für Vollholz und Brettschichtholz können die Grundwerte um 20<sup>o</sup>/o erhöht werden. Damit ergäben sich bei einer 2,5fachen Sicherheit gegenüber der 5<sup>o</sup>/o-Fraktilen folgende zulässigen Spannungen :

Für Vollholz :  $\text{zul } \tau_T = 25,4 \cdot 1,2 / 2,5 = 12,2 \approx 12 \text{ kp/cm}^2$

Für Brettschichtholz :  $\text{zul } \tau_T = 34,8 \cdot 1,2 / 2,5 = 16,7 \approx 16 \text{ kp/cm}^2$

Bei gleichzeitiger Wirkung von Schub aus Querkraft wären diese Werte mit dem Faktor

$$k'_{\tau Q} = 1 - (\tau_Q / 12)^2$$

abzumindern.

Die Versuche mit Stäben größerer Querschnitte ergaben meist mehr als 4fache Bruchsicherheiten gegenüber den oben angegebenen zulässigen Werten.

Torsionsmodul (aus Mittelwerten)

Für Vollholz :  $G_T^o = 2793 \text{ kp/cm}^2$

Für Brettschichtholz :  $G_T^o = 3081 \text{ kp/cm}^2$

In Anbetracht der festgestellten Streuungen kann für beide Konstruktionsformen von einem Mittelwert des quadratischen

Querschnitte von

$$G_{\text{T}}^0 = 3000 \text{ kp/cm}^2$$

ausgegangen werden. Für rechteckige Querschnitte aus Vollholz mit einem Seitenverhältnis von  $h/b \geq 2$  ergäbe sich mit dem Erhöhungsfaktor  $m_{h/b} = 1,10$  ein Rechenwert von  $G_{\text{T}} = 3300 \text{ kp/cm}^2$ , für Brettschichtholz könnte für  $h/b \geq 4$  mit  $m_{h/b} = 1,25$  gerechnet werden. Da bei Brettschichtholz der Mittelwert der Rohdichte  $r_{12}$  mit Sicherheit über dem angenommenen unteren Grenzwert von  $0,38 \text{ g/cm}^3$  liegt, erscheint es gerechtfertigt, einen Rechenwert von

$$G_{\text{T}} = 5000 \text{ kp/cm}^2$$

vorzuschlagen, zumal bei den Versuchen mit größeren Brettschichtstäben keine Versuchswerte unter  $6300 \text{ kp/cm}^2$  festgestellt wurden.

Es erscheint wahrscheinlich, daß durch weitere Versuche, vor allem mit größeren Brettschichtquerschnitten, die vorgeschlagenen Rechenwerte für Brettschichtholz erhöht werden könnten. Insbesondere sollte der Einfluß des Querschnittsverhältnisses  $h/b$  durch Rechnung und Versuch weiter geklärt werden.

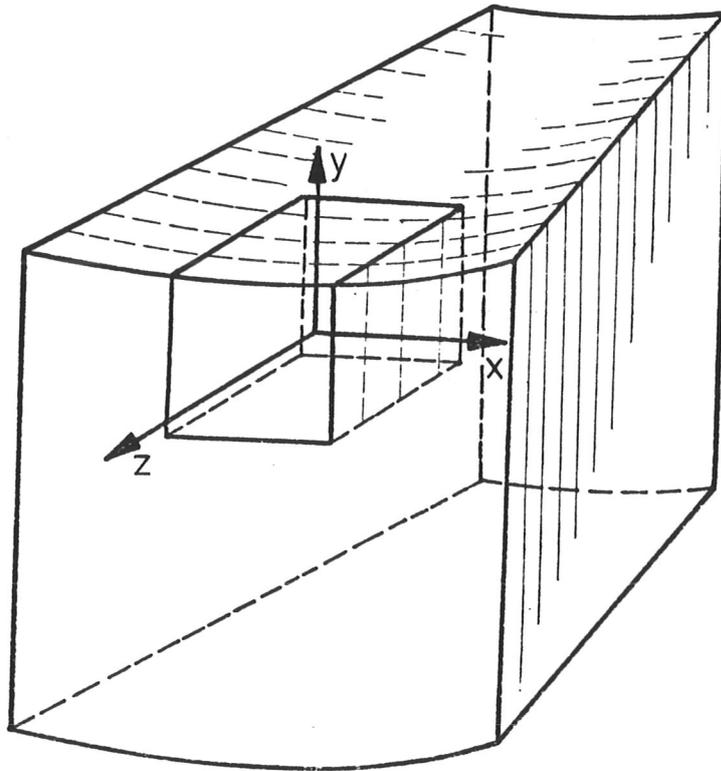
## 7. Literaturangabe

- [1] Kollmann, F.P.: Technologie des Holzes.  
Springer-Verlag, 1951
- [2] Kollmann, F.P., Coté, W.A.: Principles of Wood Science  
and Technology.  
Springer-Verlag, 1968
- [3] Voigt, W.: Lehrbuch der Kristallphysik.  
Leipzig 1928
- [4] Krabbe, E.: Messung von Gleit- und Dehnungszahlen an  
Holzstäben mit rechteckigem Querschnitt.  
Dissertation TH Hannover, 1960
- [5] Keylwerth, R.: Die anisotrope Elastizität des Holzes  
und der Lagenhölzer.  
VDI-Forschungsheft 430, Düsseldorf 1951
- [6] Hörig, H.: Tafeln  $R(p)$  und  $Q(p)$  zur Berechnung der  
Gleitzahlen  $S_{44}$ ,  $S_{55}$  und  $S_{66}$  und der maximalen  
Tangentialspannungen.  
Berlin, 1957
- [7] Wommelsdorff, O.: Dehnungs- und Querdehnungszahlen von  
Hölzern.  
Dissertation TH Hannover, 1966
- [8] Hörig, H.: Zur Elastizität des Fichtenholzes.  
Z.techn. Physik, Bd. 12 (1931), S. 369/70
- [9] ——— : Über die rechnerische Auswertung von Ver-  
drehrungsmessungen an Holzstäben.  
Ing.-Arch., Bd. 6 (1933), S. 570/76
- [10] ——— : Anwendung der Elastizitätstheorie anisotroper  
Körper auf Messungen an Holz.  
Ing.-Arch., Bd. 6 (1935), S. 8/14
- [11] ——— : Berechnung der Gleitzahlen  $S_{44}$ ,  $S_{55}$ ,  $S_{66}$   
aus den Verdrehungsmessungen von Stäben mit  
rechteckigen Querschnitten bei rhombischer Symmetrie.  
Ing.-Arch., Bd. 7 (1936), S. 165/70
- [12] ——— : Über Mittelwertkörper elastisch anisotroper  
Systeme und deren Anwendung auf Holz.  
Ing.-Arch., Bd. 8 (1937) S. 174/82
- [13] ——— : Über die unmittelbare Messung der Gleitzahlen  
 $S_{44}$ ,  $S_{55}$ ,  $S_{66}$  bei Stoffen von rhombischer Symmetrie und  
geringer Starrheit.  
Ann.Phys., Bd. 43 (1943) S. 285/95

- [14] ——— : Kritische Bemerkungen zu den auf dem DIN-DVM-Blatt 2190 angegebenen Formeln für die Berechnung des Drillungsmoduls und der sogenannten Verdrehungsfestigkeit von Holzstäben.  
Silvae orbis, Bd. 15 (1944) S. 90/99
- [15] Szabó, I. Höhere Technische Mechanik.  
Berlin, 1964
- [16] Brüninghoff, H.: Spannungen und Stabilität bei quergestützten Brettschichtträgern.  
Dissertation, TU Karlsruhe, 1972
- [17] Stamer, J.: Elastizitätsuntersuchungen an Hölzern.  
Ing.-Arch., Bd. 6 (1935), S. 1/8
- [18] ———, Sieglerschmidt, H.: Elastische Formänderungen der Hölzer.  
Z. VDI, Bd. 77 (1933), S. 503/05
- [19] Ylinen A.: Über den Einfluß der Probekörpergröße auf die Biegefestigkeit des Holzes.  
Holz als Roh- und Werkstoff, Bd. 5 (1942) S. 299/305
- [20] ——— : Über den Einfluß der Rohwichte und des Spätholzanteils auf die Brinellhärte des Holzes.  
Holz als Roh- und Werkstoff, Bd. 6 (1942), S. 125/27
- [21] Madsen, B.: Duration of load tests for lumber subjected to shear.  
Forest Products Journal, October 1975, S. 44/52
- [22] Mang, H. : Linear elastische Rotationskörper unter rotationssymmetrischer Belastung und Torsion.  
Der Bauingenieur 49 (1974) H 12, S. 470/481
- [23] Chu, K.-H., Johnson, R.B.: Torsion in beams with open sections.  
Journal of the structural division, July 1974, S. 1397/1419
- [24] Sawada, M. und Ishikawa, T.: Rigidity modulus of wood.
- [25] Beldie, I.P.: Die Bestimmung der Schubmoduln des Fichtenholzes.  
Holz als Roh- und Werkstoff, Juli 1968, S. 261/266
- [26] Becker, H.F. Messung der Schubmoduln von Vollholz mit akustischen Torsionsschwingungen.  
Holz als Roh- und Werkstoff, Mai 1973, S. 207/210
- [27] Huber, K.: Verdrehungselastizität und -festigkeit von Hölzern.  
Z. VDI, Bd. 72, 1928

- [28] Trayer, W. und March, W.: The torsion of members having sections common in aircraft constructions. Report: National Advisory Committee for Aeronautics, No 334
- [29] Bodig, J. und Goodman, J.R.: Prediction of elastic parameters for wood. Wood Science, Vol. 5, No 4, April 1973, S. 249/264
- [30] Carrington, H.: The elastic constants of Spruce. Phil. Mag. Bd. 45 (1923), S. 1055/57
- [31] Keenan, F.J.: Shear Strength of Wood Beams. Forest Products Journal, Vol. 24, No 9, Sept. 1974, S. 63/70
- [32] Elfren, L., Karlsson, I. und Losberg, A.: Torsion-Bending-Shear Interaction for Concrete Beams. Journal of the Structural Division, August 1974, S. 1657/1676
- [33] Lekhnitskij, S.G.: Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Body. Holden-Day Series in Mathematical Physics, San Francisco, Calif. 1963
- [34] Goodman, J.R. und Boodig, J.: Orthotropic Elastic Properties of Wood. Journal of the Structural Division, November 1970, S. 2301/2319
- [35] Vafai, A.: The Torsional and Bending Behavior of Wood Beams. Dissertation an der Universität Houston/Texas
- [36] ———, Pincus, G.: Torsional and Bending Behavior of Wood Beams. Journal of the Structural Division, June 1973, S. 1205/1221

Lage des Koordinatensystems im Stammquerschnitt



x-Stab

y-Stab

z - Stab

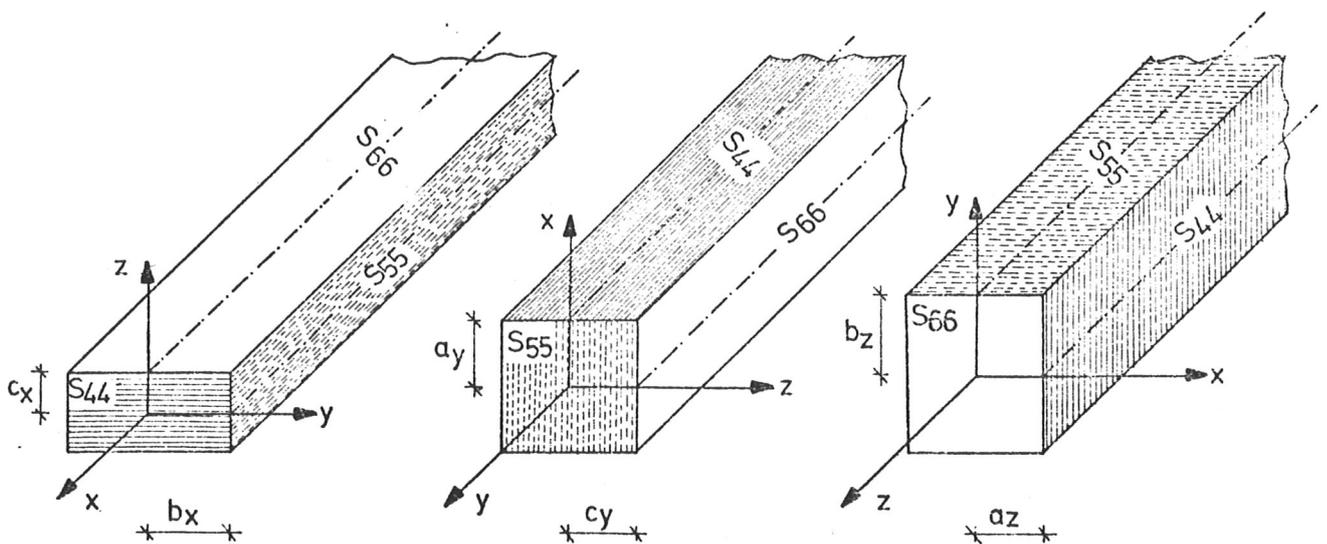


Bild 1: Definition eines Koordinatensystems beim Werkstoff Holz

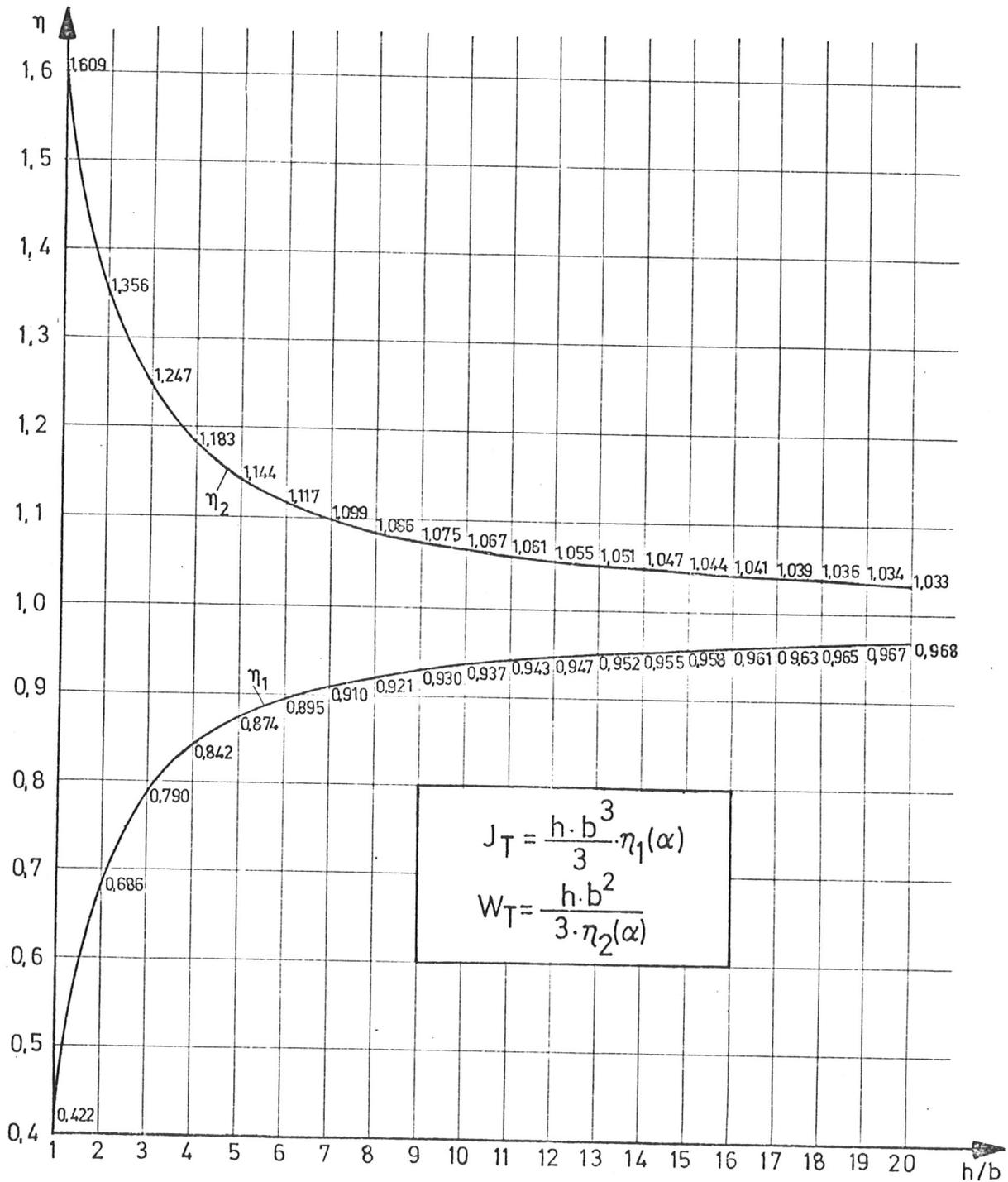


Bild 2: Beiwerte  $\eta_1$  und  $\eta_2$  zur Berechnung des Torsionsträgheitsmomentes und des Torsionswiderstandsmomentes von Rechteckquerschnitten.

**Tabelle 1:** Bezeichnung der Meßreihen bei den Vollholzproben mit 36 cm<sup>2</sup> Querschnittsfläche

Bezeichnung	b	h	Jahrringe	Material		
6/6 L 6/6 W	6	6	liegend unter 45°	fehlerfrei		
6/6-70L 6/6-70W			liegend unter 45°	70 mm Faserabweichung auf 1 m Länge		
6/6-120L 6/6-120W			liegend unter 45°	120 mm Faserabweichung auf 1 m Länge		
6/6-AL 6/6-AW			liegend unter 45°	Holz mit Ästen		
6/6-A70L 6/6-A70W			liegend unter 45°	Äste und 70 mm Faserabweichung		
6/6-A120L 6/6-A120W			liegend unter 45°	Äste und 120 mm Faserabweichung		
4/9 L 4/9 S 4/9 W			4	9	liegend stehend unter 45°	fehlerfrei
4/9-70L 4/9-70S 4/9-70W					liegend stehend unter 45°	70 mm Faserabweichung auf 1 m Länge
4/9-120L 4/9-120S 4/9-120W	liegend stehend unter 45°	120 mm Faserabweichung auf 1 m Länge				
4/9-AL 4/9-AS 4/9-AW	liegend stehend unter 45°	Holz mit Ästen				
4/9-A70L 4/9-A70S 4/9-A70W	liegend stehend unter 45°	Äste und 70 mm Faserabweichung				
4/9-A120L 4/9-A120S 4/9-A120W	liegend stehend unter 45°	Äste und 120 mm Faserabweichung				
3/12 L 3/12 S 3/12 W	3	12			liegend stehend unter 45°	fehlerfrei
3/12-AL 3/12-AS 3/12-AW					liegend stehend unter 45°	Holz mit Ästen
3/12-A70L 3/12-A70S 3/12-A70W			liegend stehend unter 45°	Äste und 70 mm Faserabweichung		
3/12-A120L 3/12-A120S 3/12-A120W			liegend stehend unter 45°	Äste und 120 mm Faserabweichung		
2.4/15 L 2.4/15 S 2.4/15 W	2.4	15	liegend stehend unter 45°	Holz der Güteklassen 0 bis II		
2/18 S 2/18 W	2	18	stehend unter 45°	fehlerfrei		

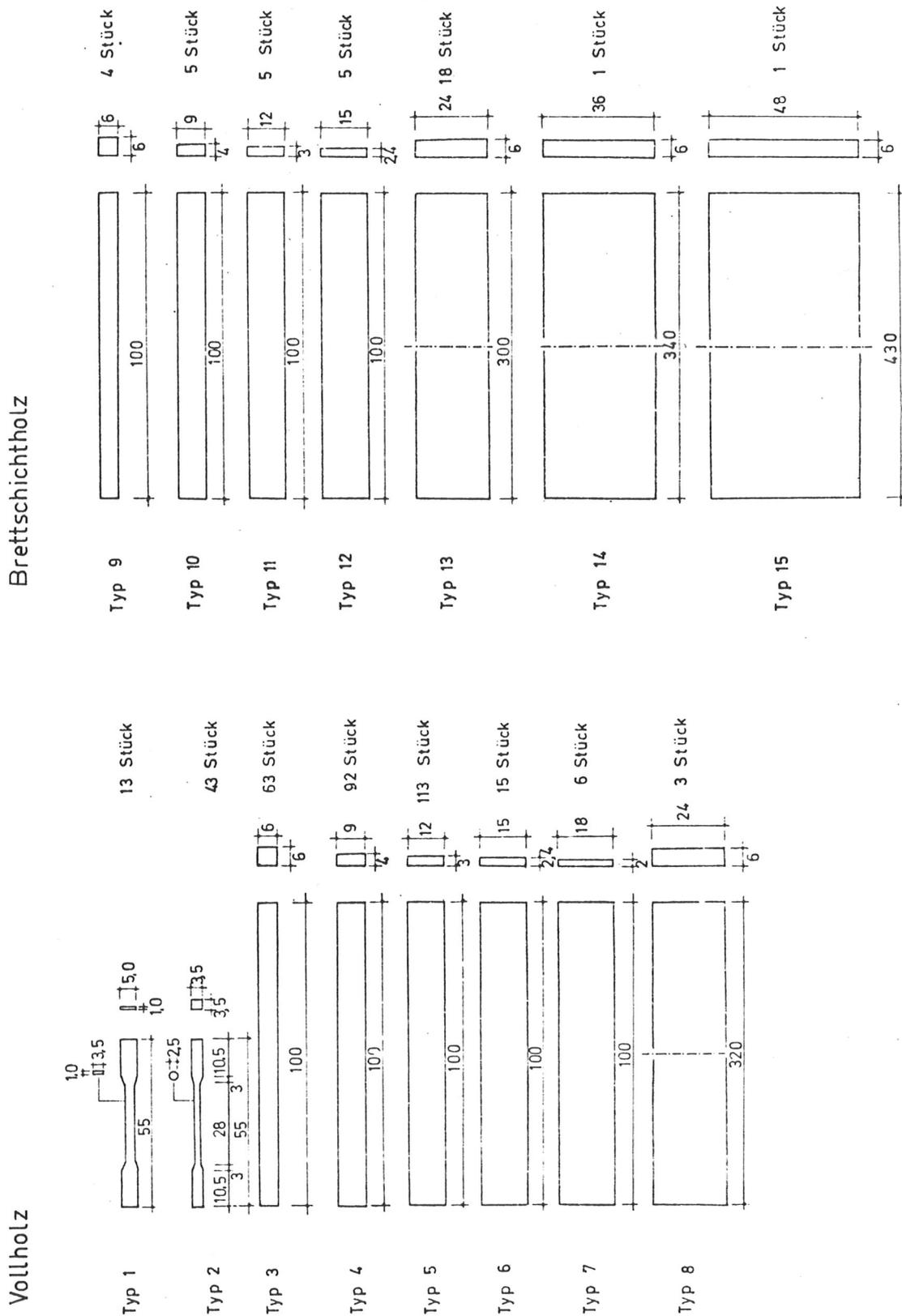


Bild 3: Zusammenstellung aller geprüften Träger

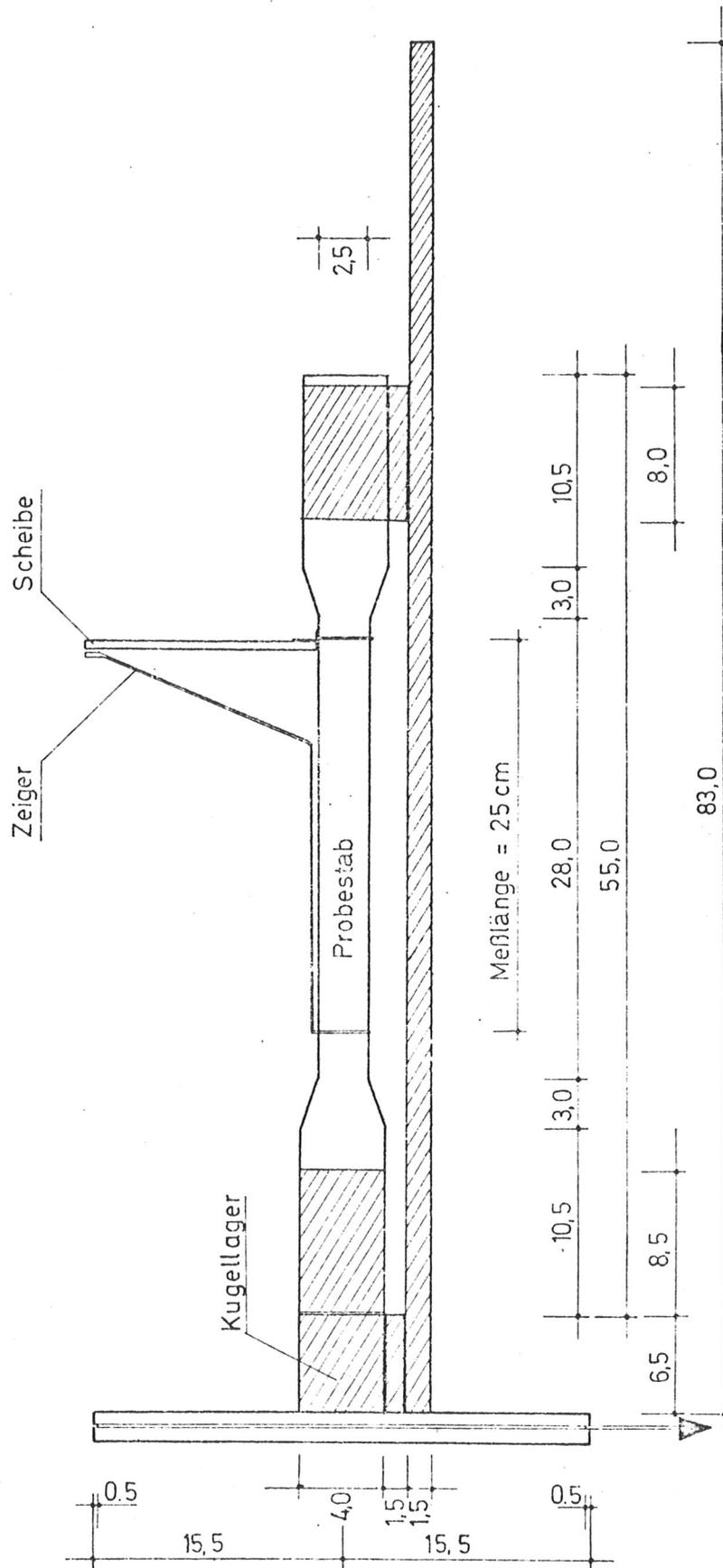


Bild 4: Versuchsvorrichtung für die fehlerfreien Rundholzproben mit 2,5 cm Durchmesser und die Rechteckproben mit 1,0 x 3,5 cm<sup>2</sup> Querschnittsfläche

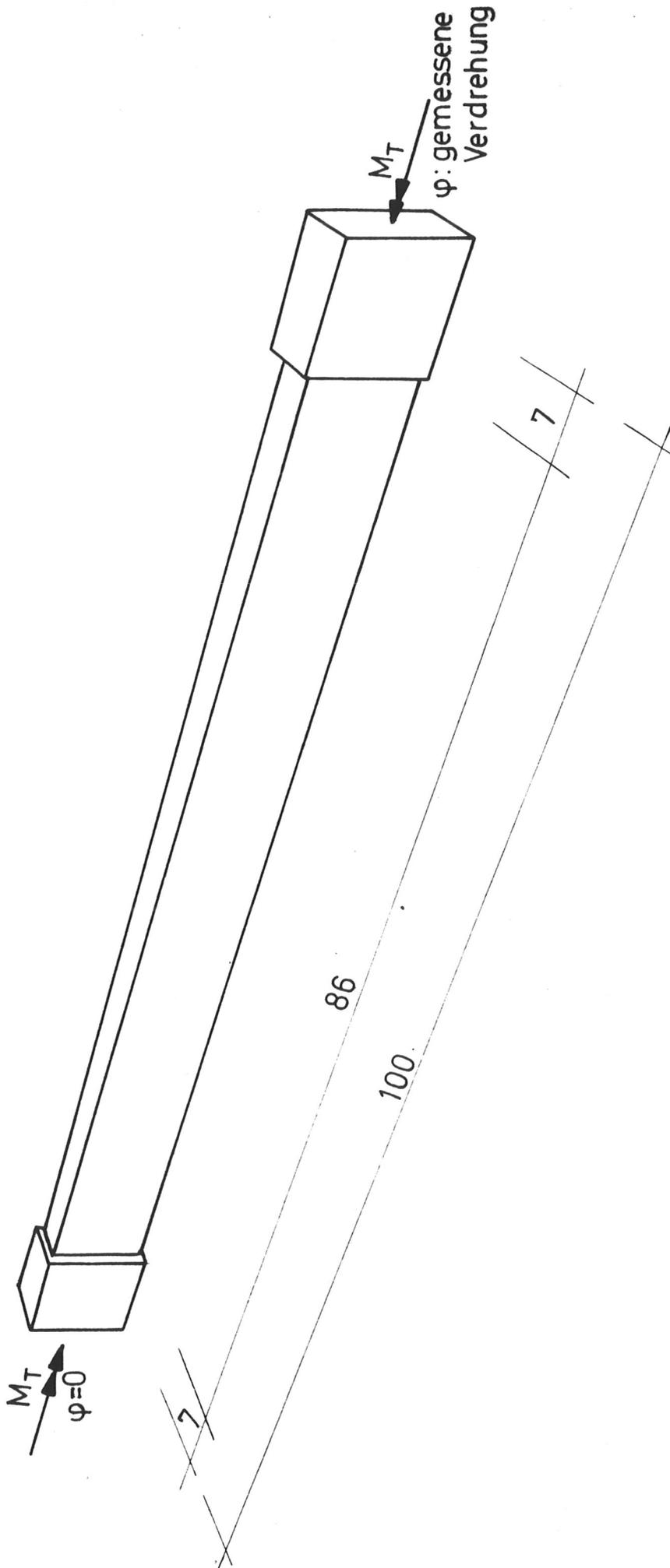


Bild 5: Versuchsaufbau für die Vollholz- und Brettschichtholzträger mit 36 cm<sup>2</sup> Querschnittsfläche

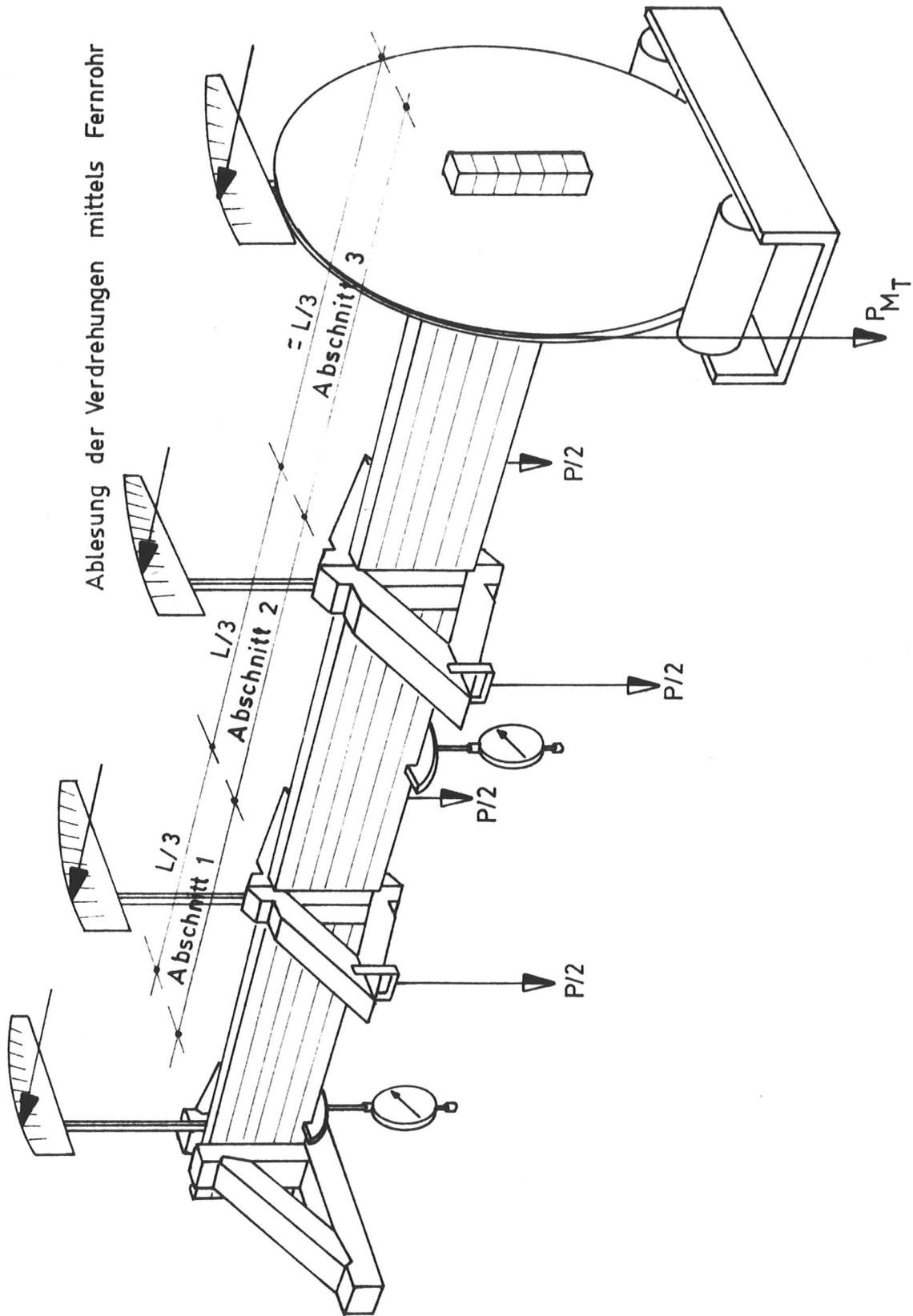


Bild 6: Versuchsvorrichtung für die  
 Träger mit  $6 \times 24 \text{ cm}^2$ ,  $6 \times 36 \text{ cm}^2$  und  $6 \times 48 \text{ cm}^2$   
 Querschnittsfläche

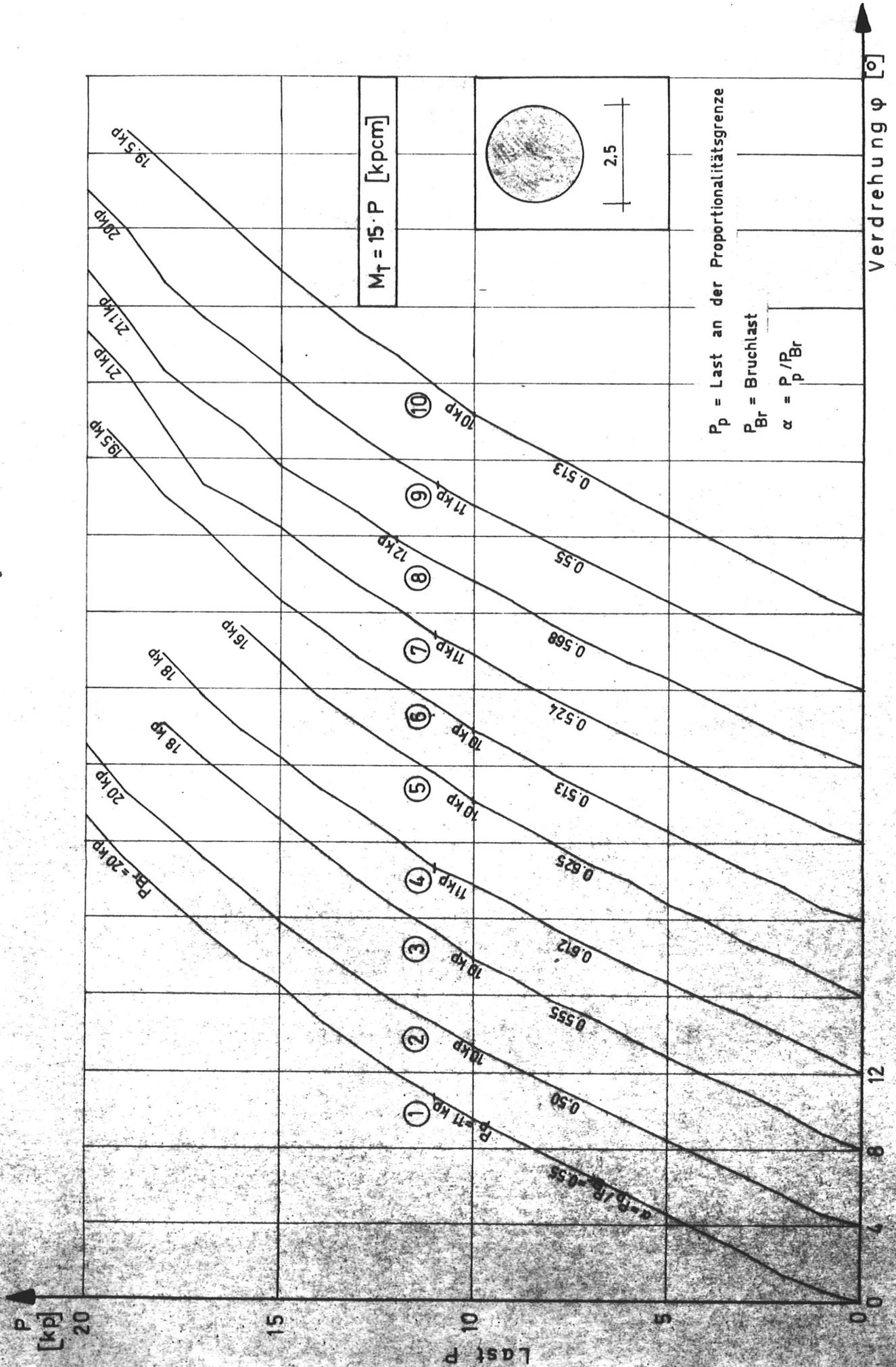


Bild 1: Last-Verformungslinien der Rundholzproben mit 2,5 cm Durchmesser

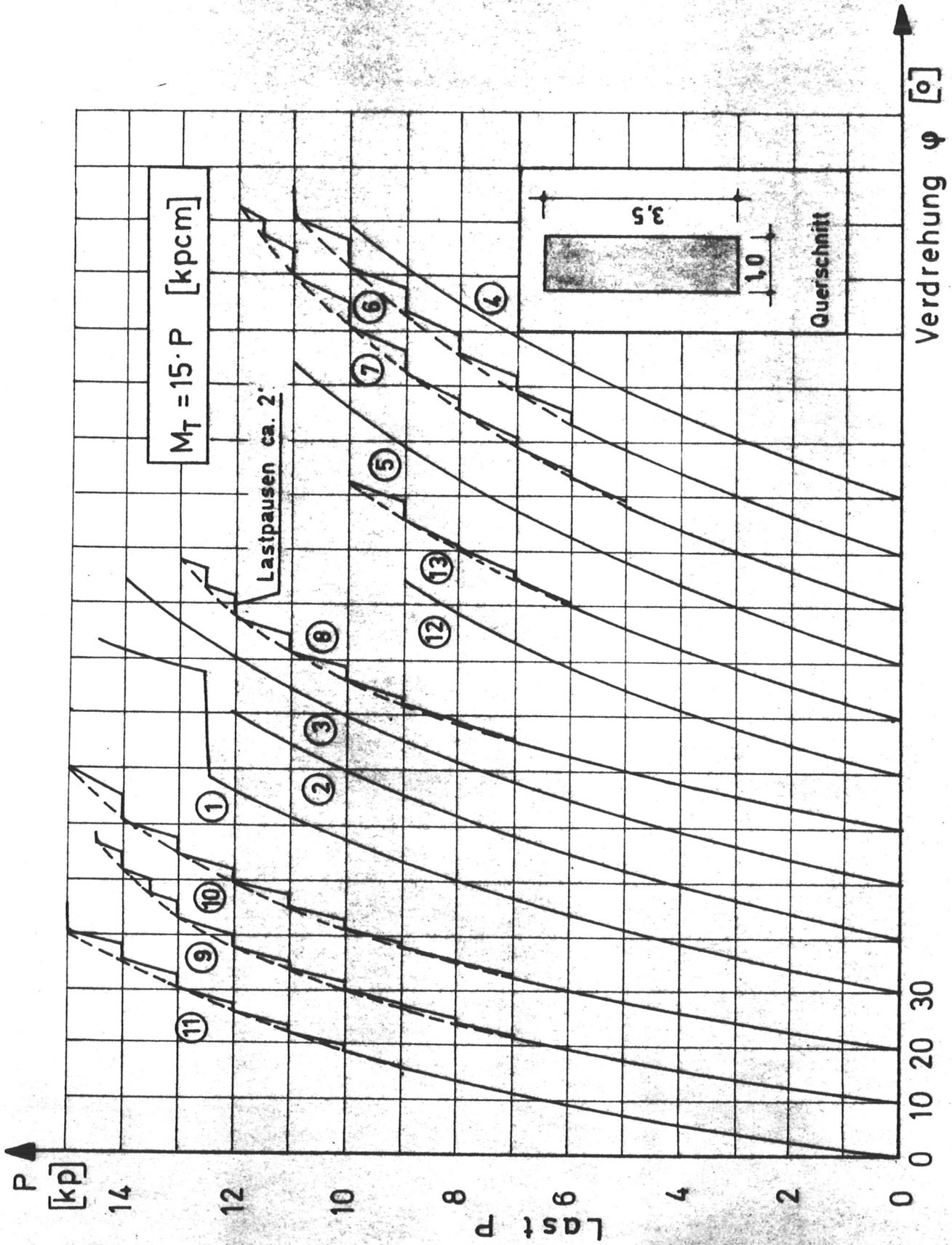


Bild 8 : Last-Verformungslinien der Rechteckproben mit 3,5 cm<sup>2</sup> Querschnittsfläche

$M_T$

[kpm]

70

60

50

40

30

20

10

0

Torsionsmoment  $M_T$

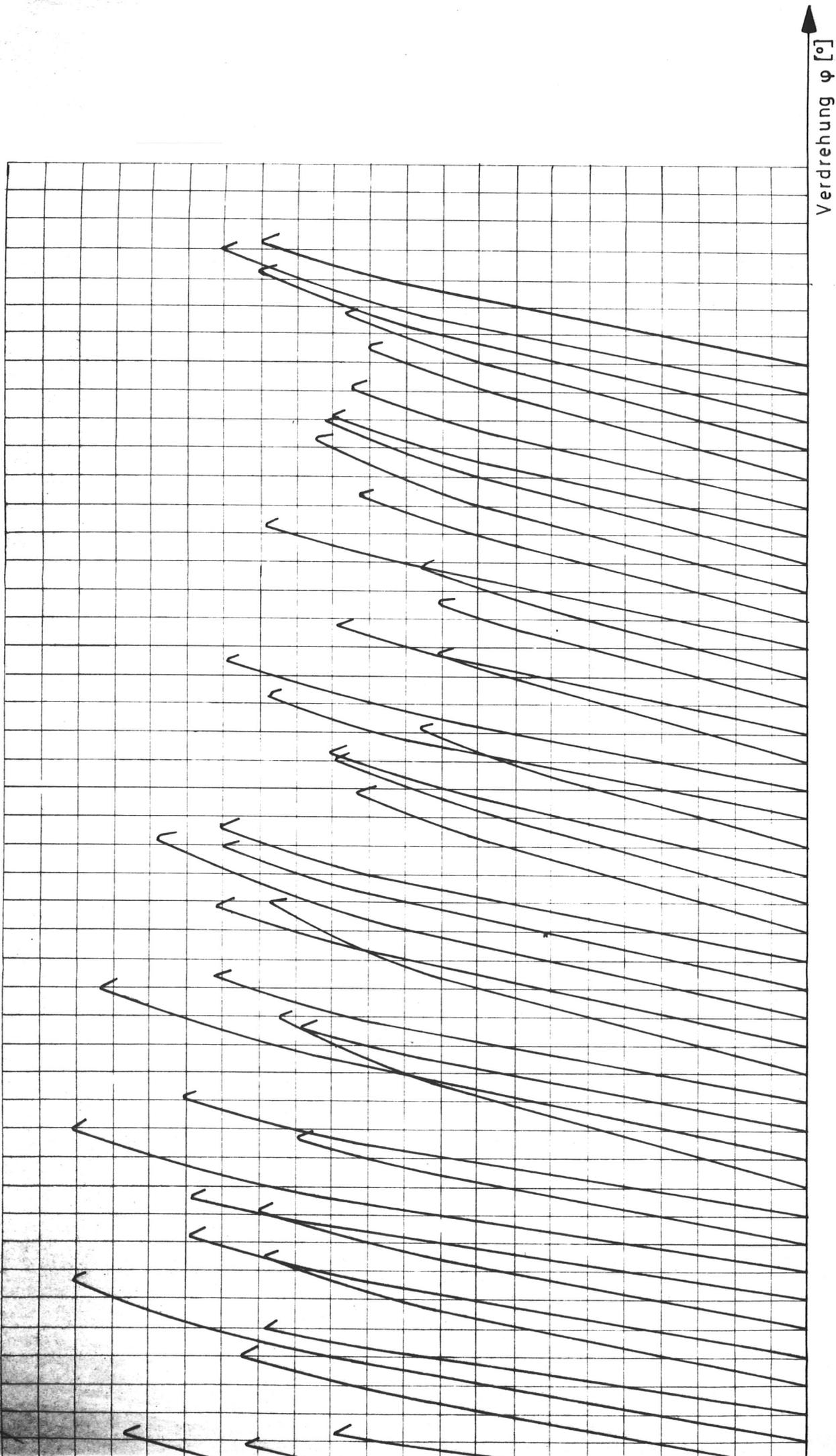
0 10 20 30 40 50

— liegende Jahrringe — | — Jahrringe unter  $45^\circ$  — | — stehende Jahrringe — | — Jahrringe unter  $45^\circ$  — | — liegende Jahrringe

Querschnitt 6 cm x 6 cm

Querschnitt 4 cm x 9 cm

Bild 9: Last - Verformungslinien der fehlerfreien Vollholzproben mit  $36 \text{ cm}^2$  Querschnittsfläche (6/6, 4/9, 3/12)



liegende Jahrringe    stehende Jahrringe    Jahrringe unter 45°  
Querschnitt 3 cm x 12 cm

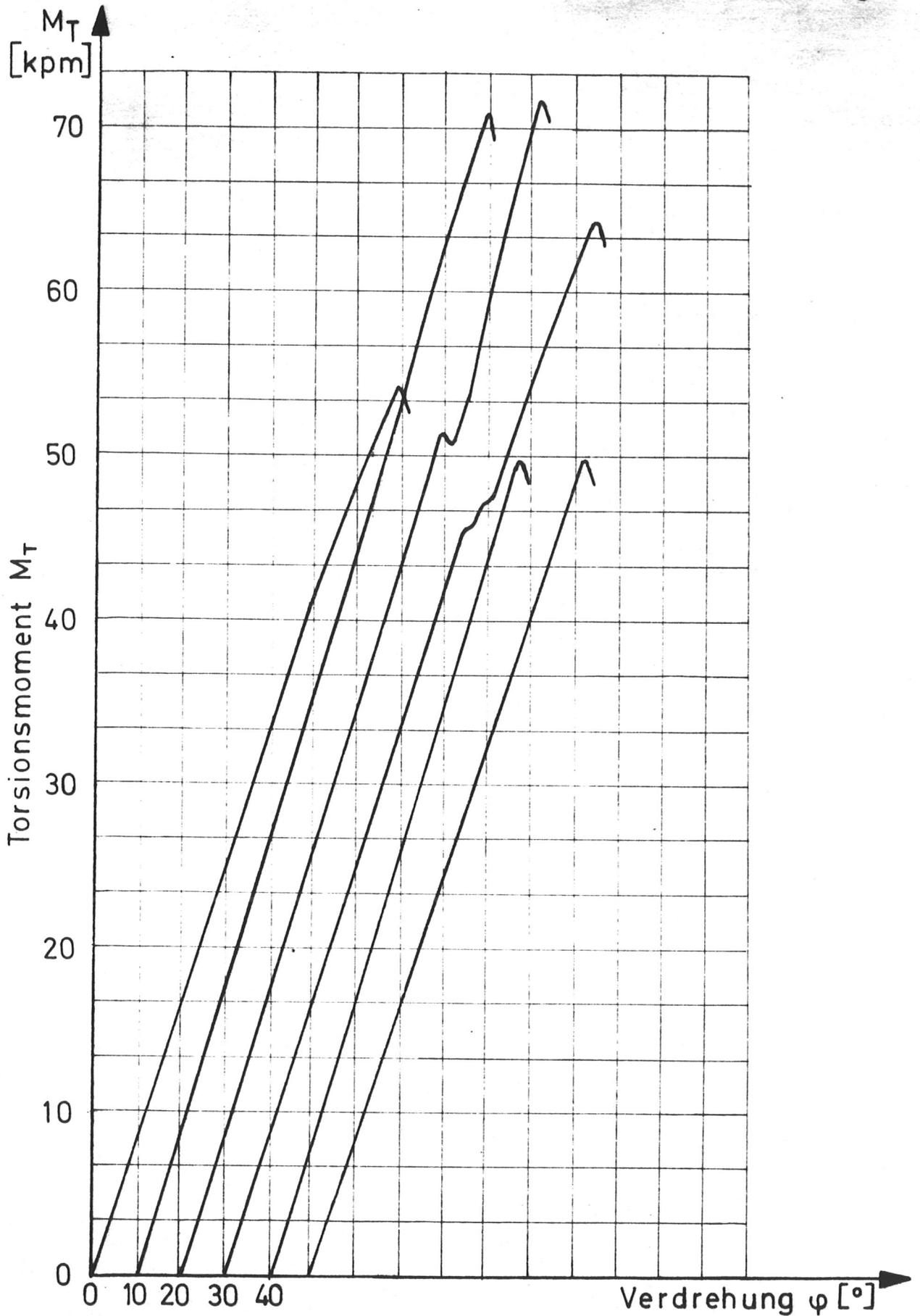


Bild 10: Last-Verformungslinien der fehlerfreien Vollholzproben mit  $2 \times 18 \text{ cm}^2$  Querschnittsfläche

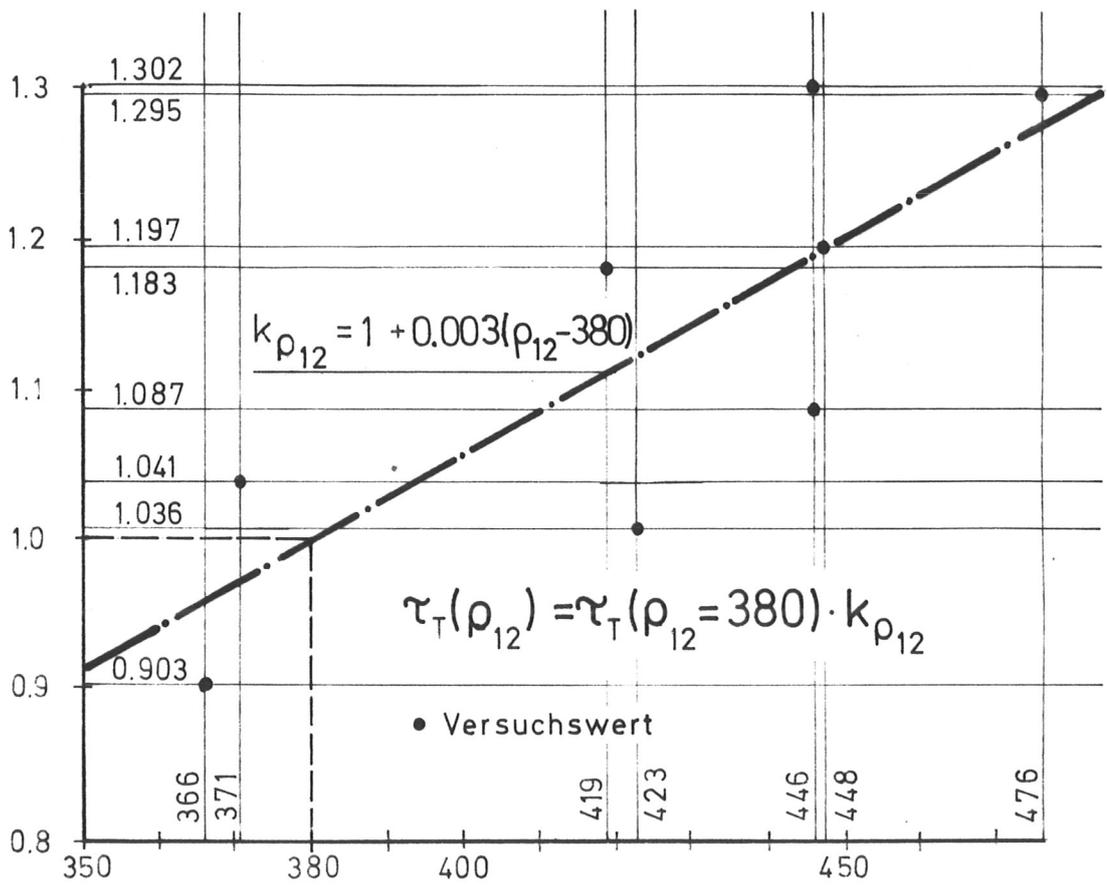


Bild 11

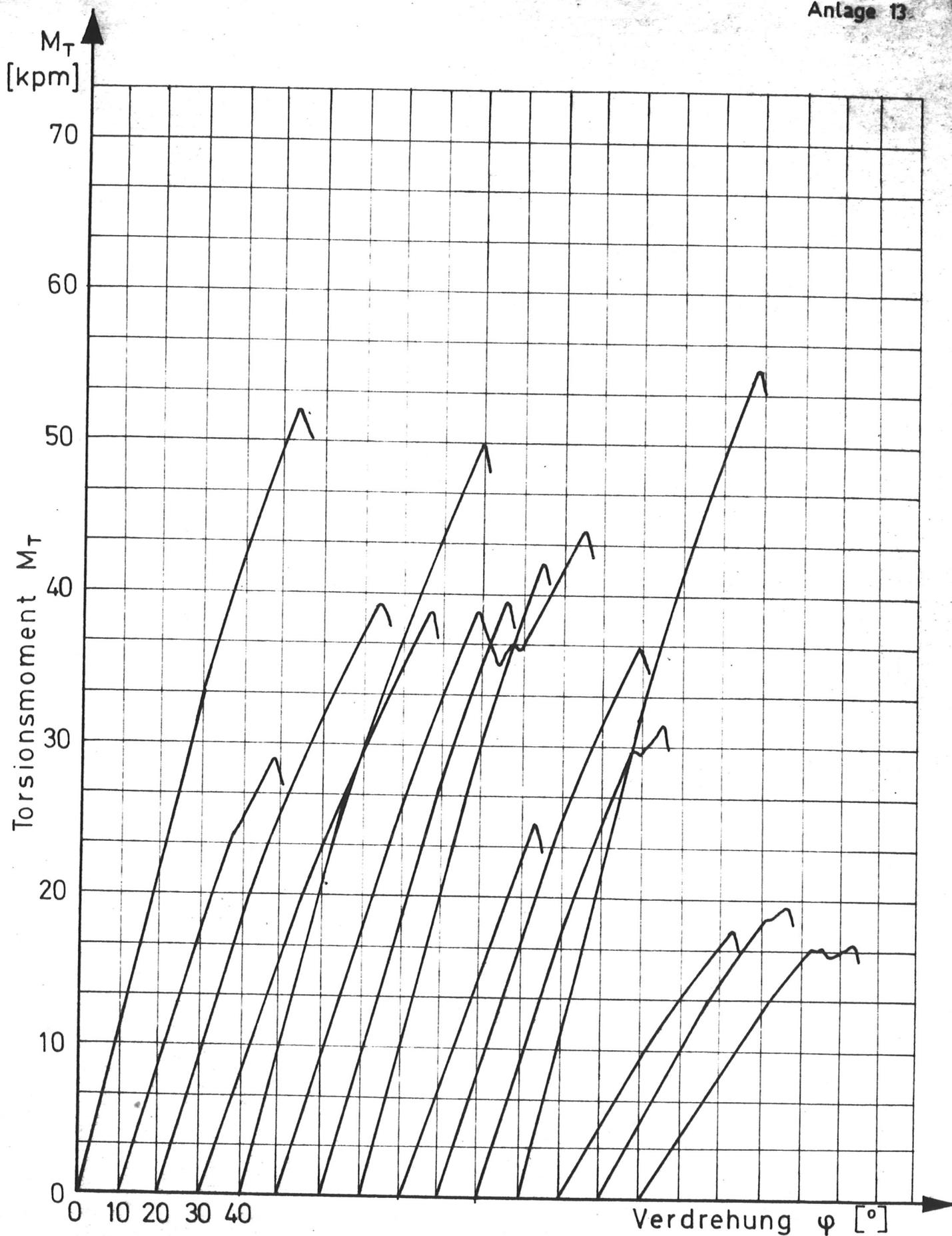


Bild 12: Last-Verformungslinien der fehlerbehafteten Vollholzproben mit  $2,4 \times 15 \text{ cm}^2$  Querschnittsfläche

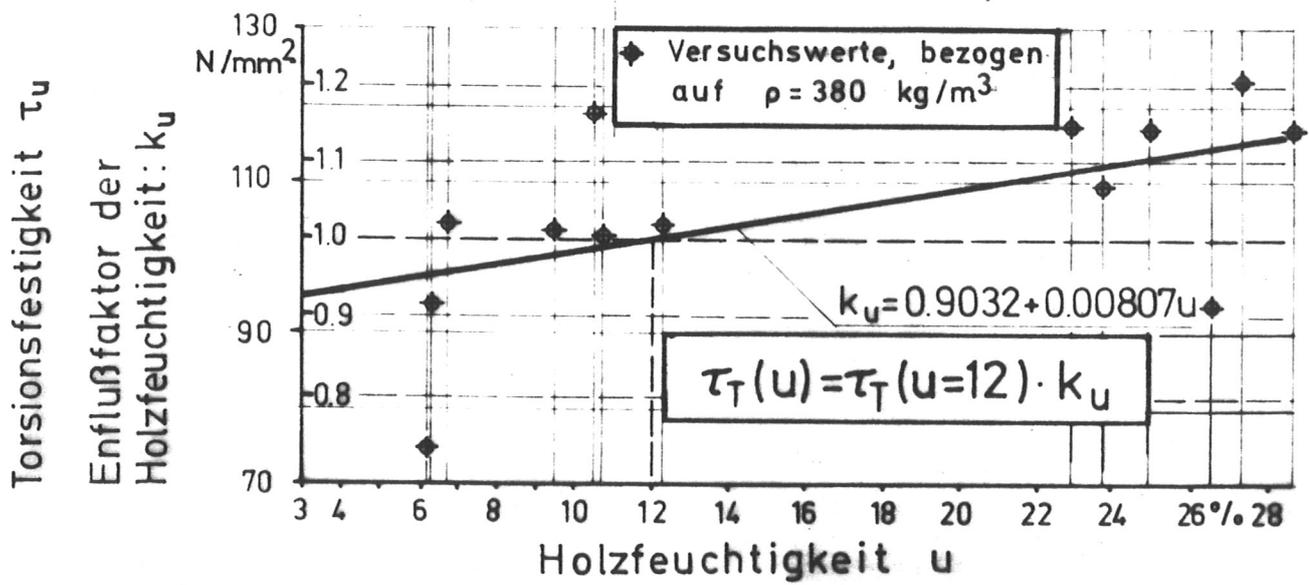
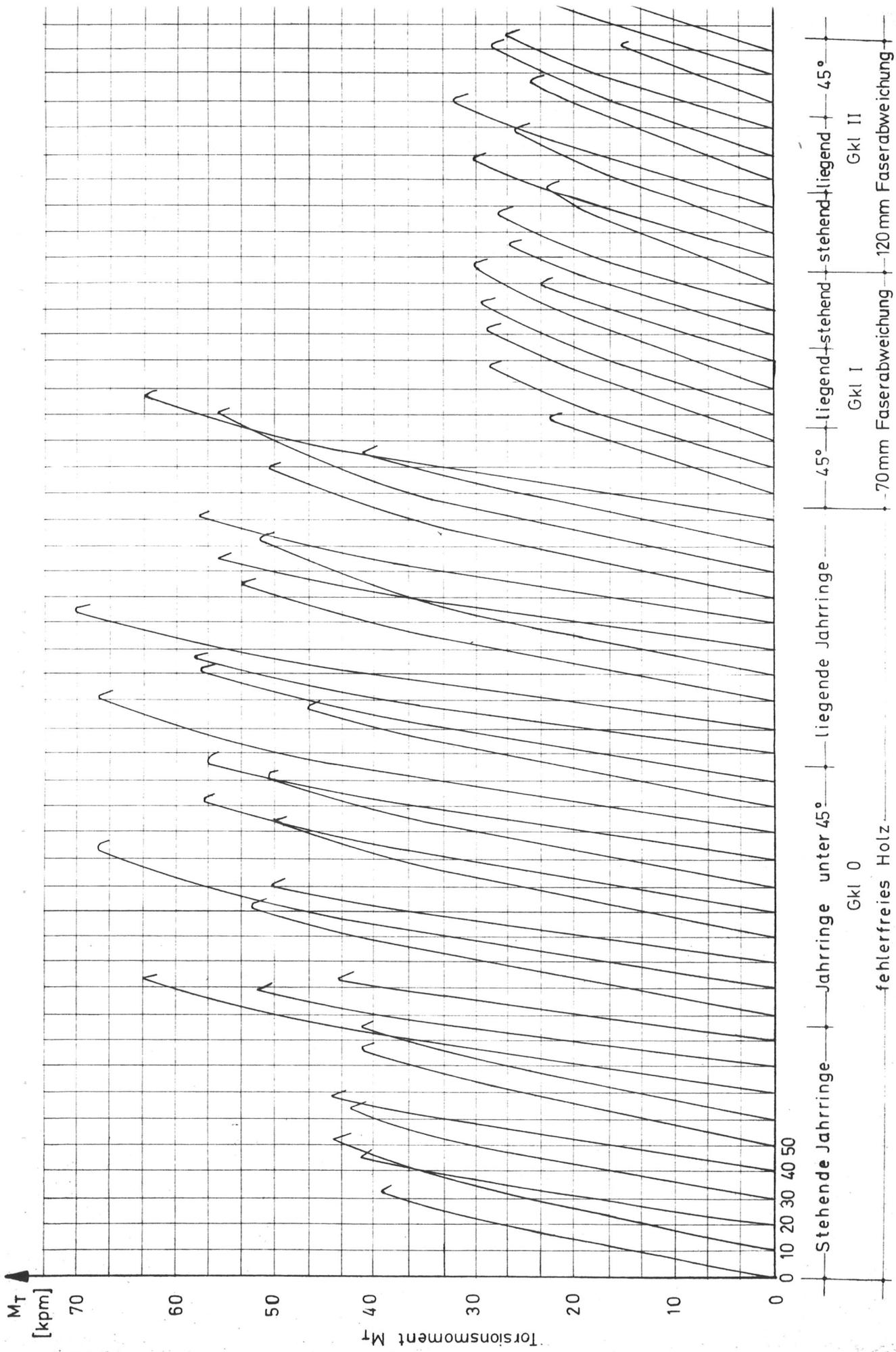
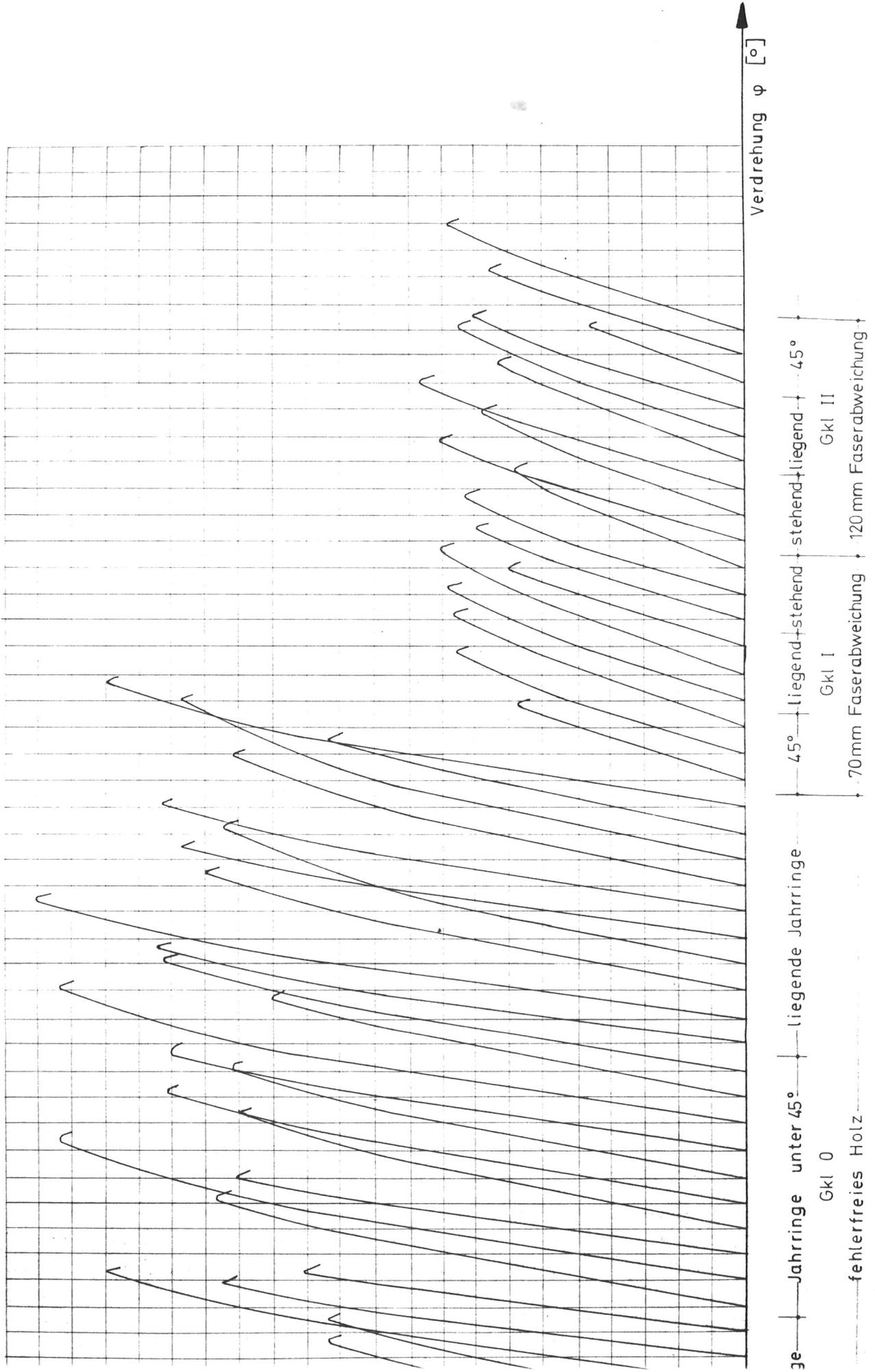


Bild 13



**Bild 13:** Einfluß der Güteklasse auf die Torsionsfestigkeit an astfreiem und rissefreiem Holz beim Querschnitt 4x9 cm



Güteklasse auf die Torsionsfestigkeit an astfreiem und rissefreiem Holz beim Querschnitt 4x9 cm<sup>2</sup>

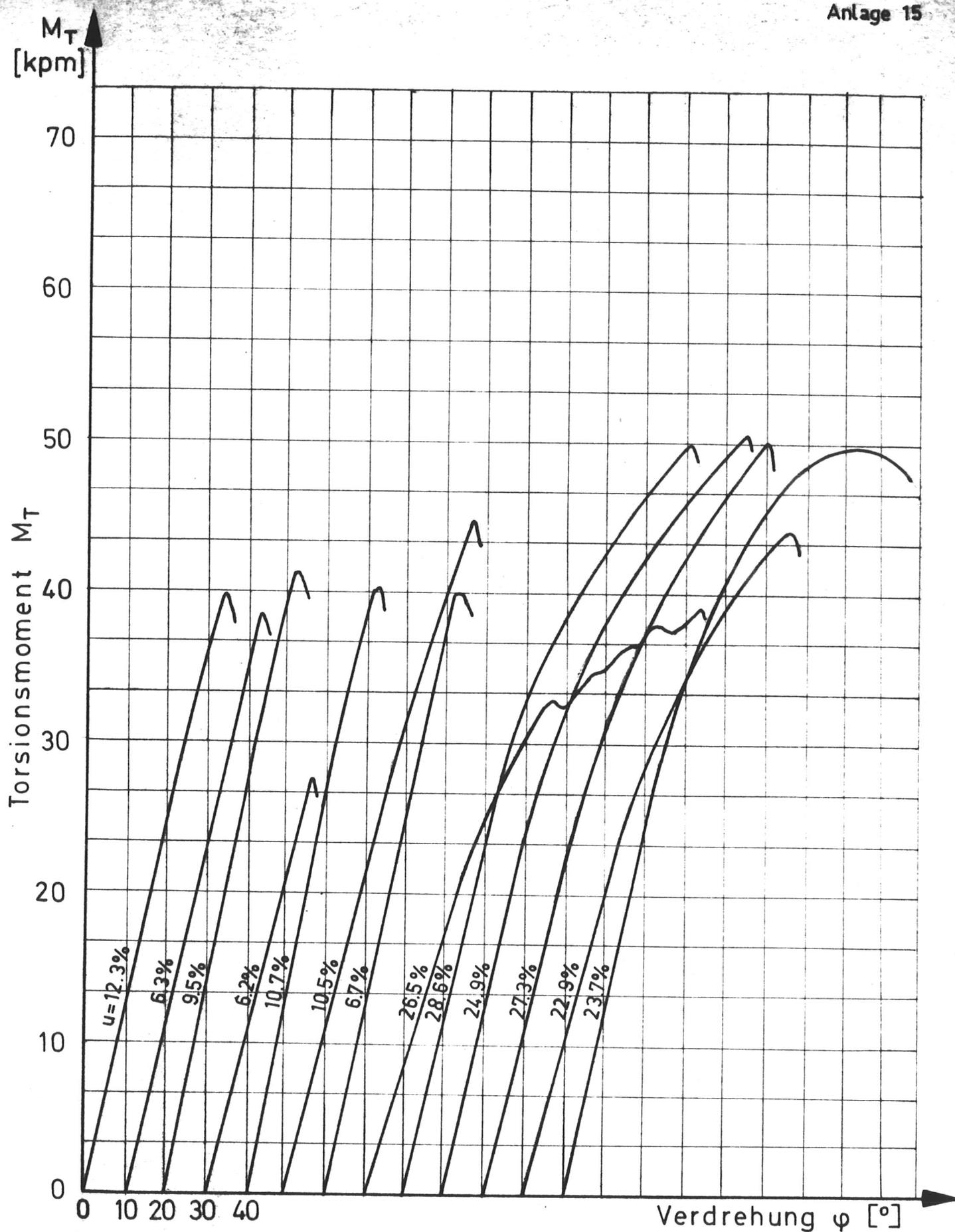


Bild 14: Last-Verformungslinien der fehlerfreien Vollholzproben mit  $3 \times 12 \text{ cm}^2$  Querschnittsfläche und mit unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt

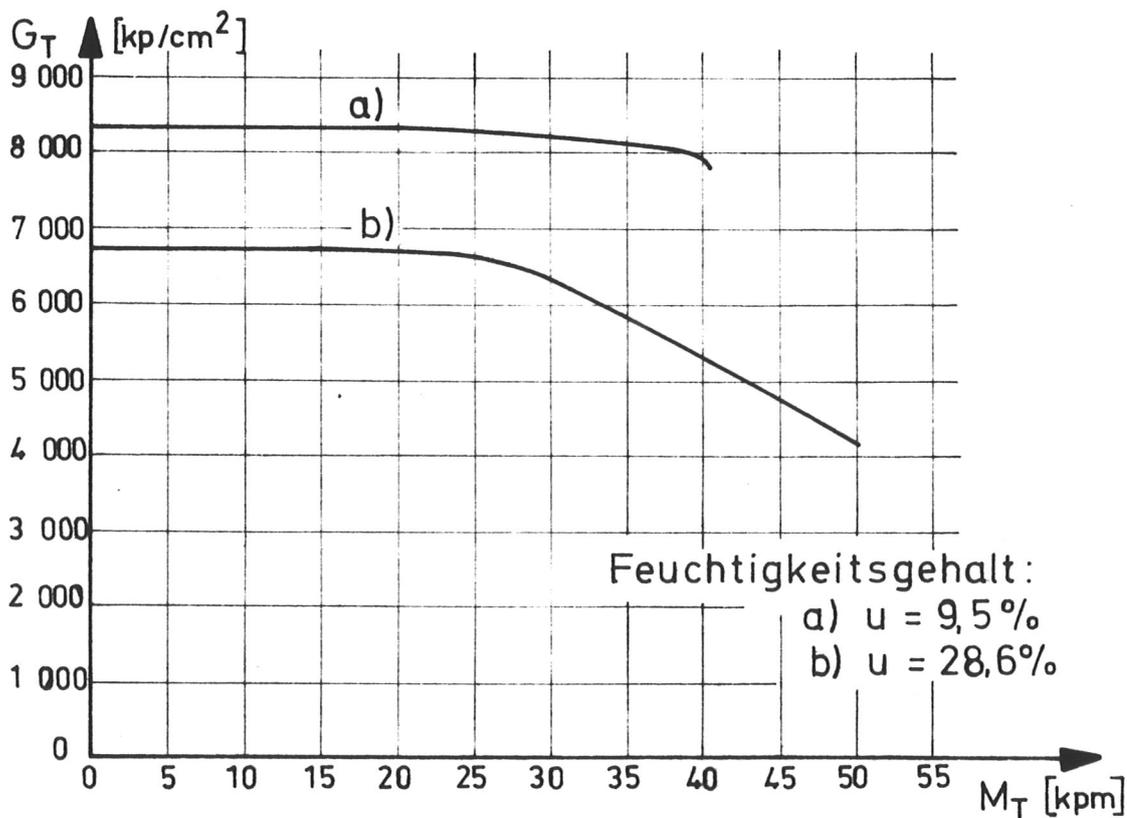
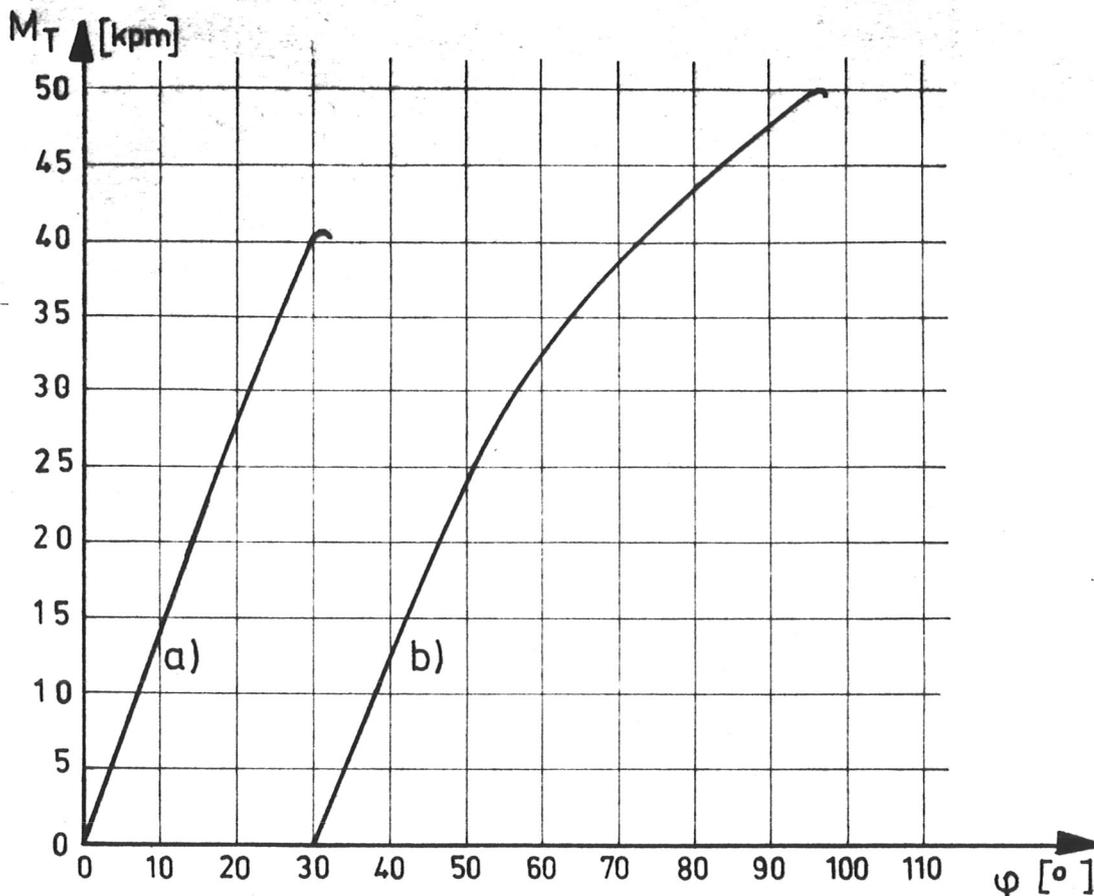


Bild 15: Einfluß des Feuchtigkeitsgehalts auf die Torsionseigenschaften von Fichtenvollholz mit  $3 \times 12 \text{ cm}^2$  Querschnittsfläche.

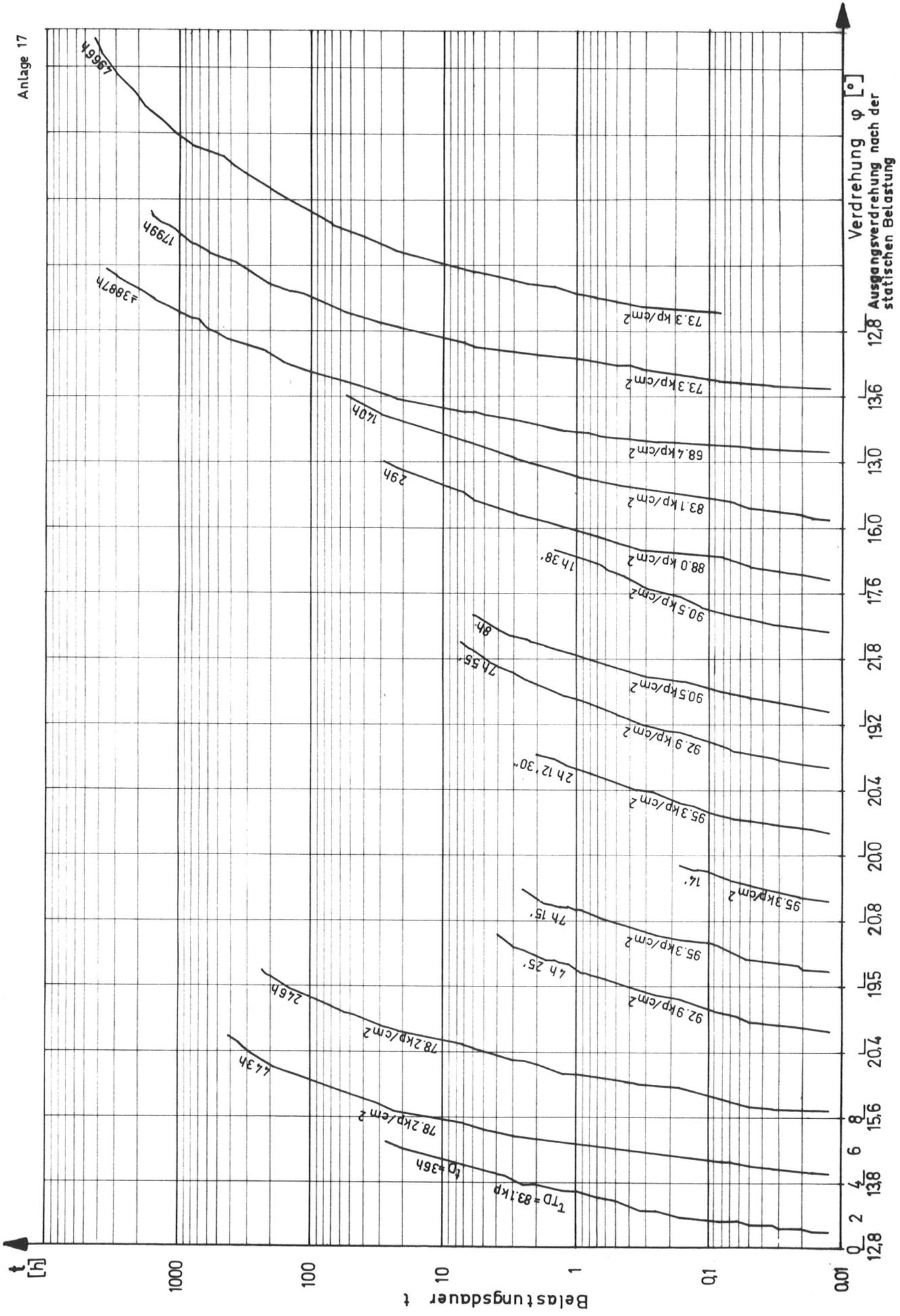


Bild 16: Dauerstandverhalten der Vollholzproben  $\phi$  25 mm (Teil 1)

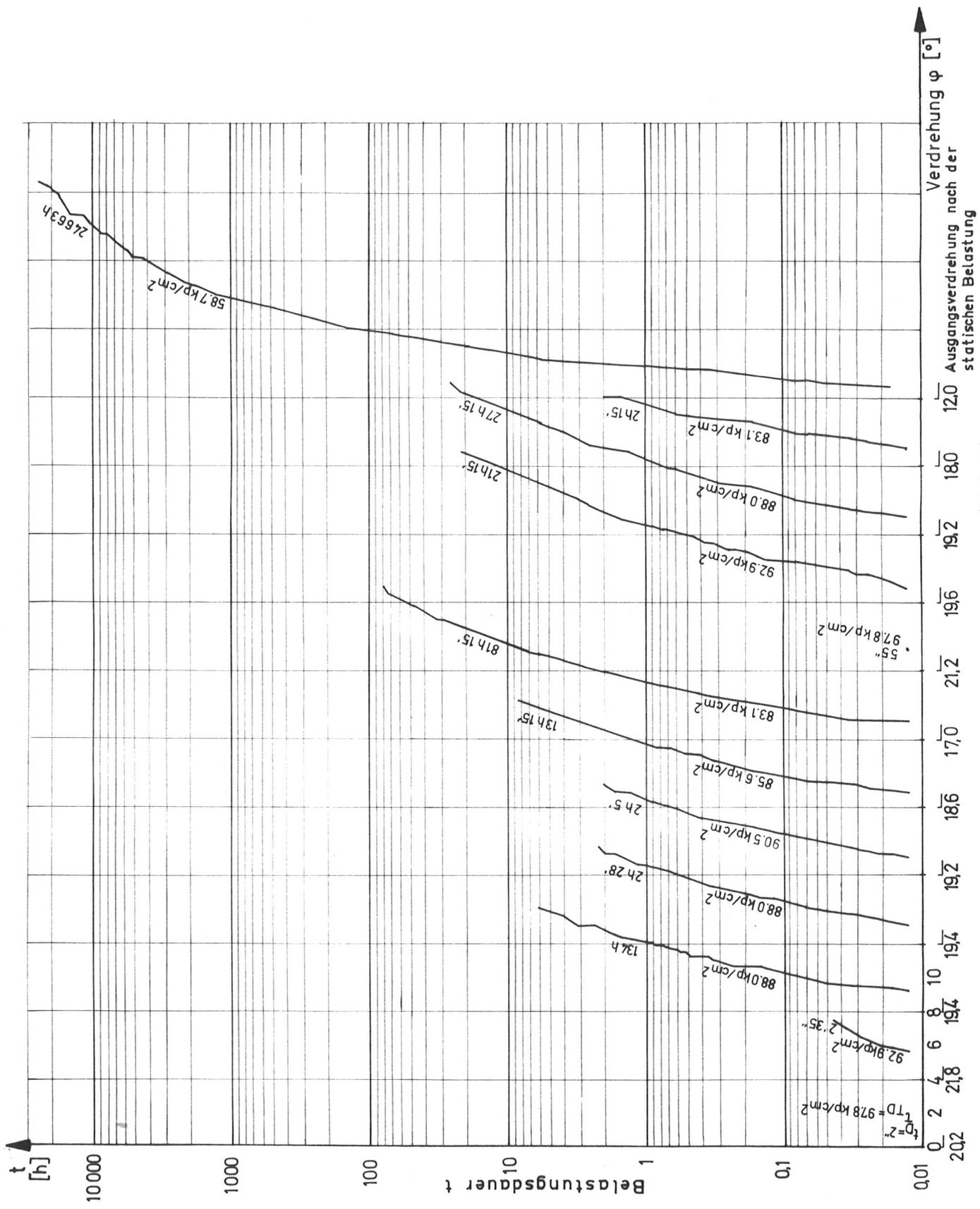


Bild 17 : Dauerstandverhalten der Vollholzproben  $\phi$  25 mm (Teil 2)

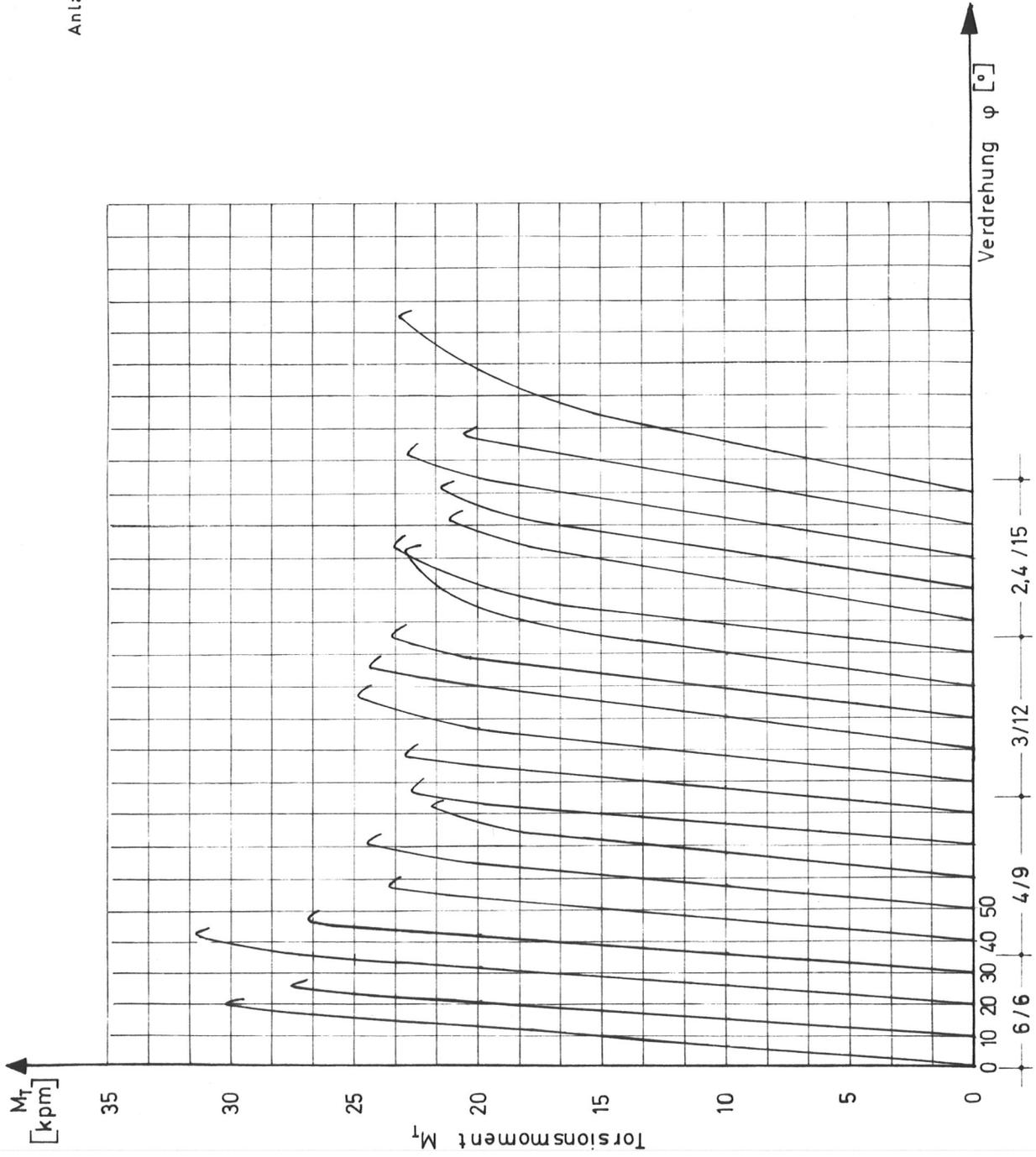


Bild 18: Last-Verformungslinien der Brettstichholzproben mit  $36 \text{ cm}^2$  Querschnittsfläche

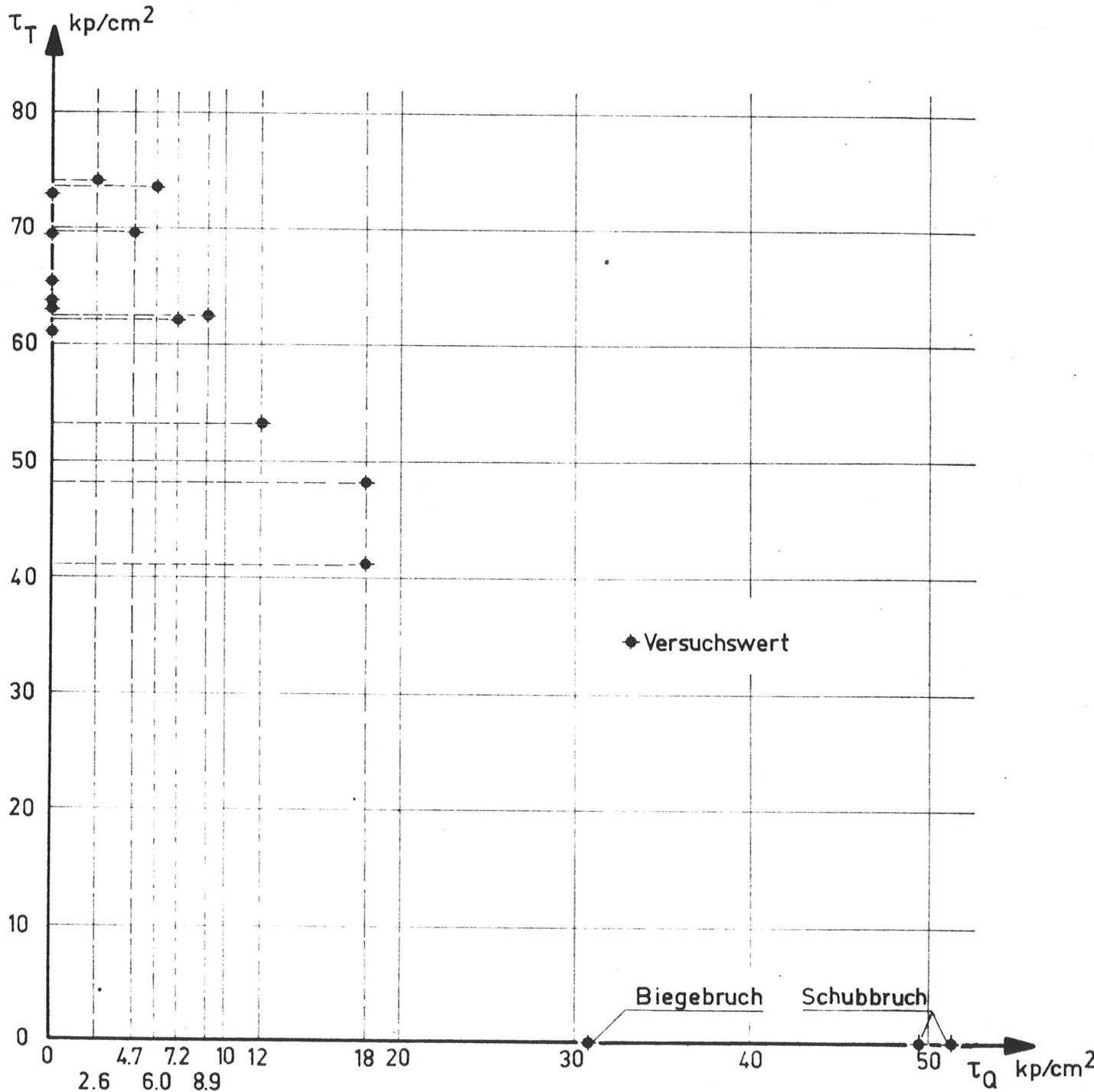
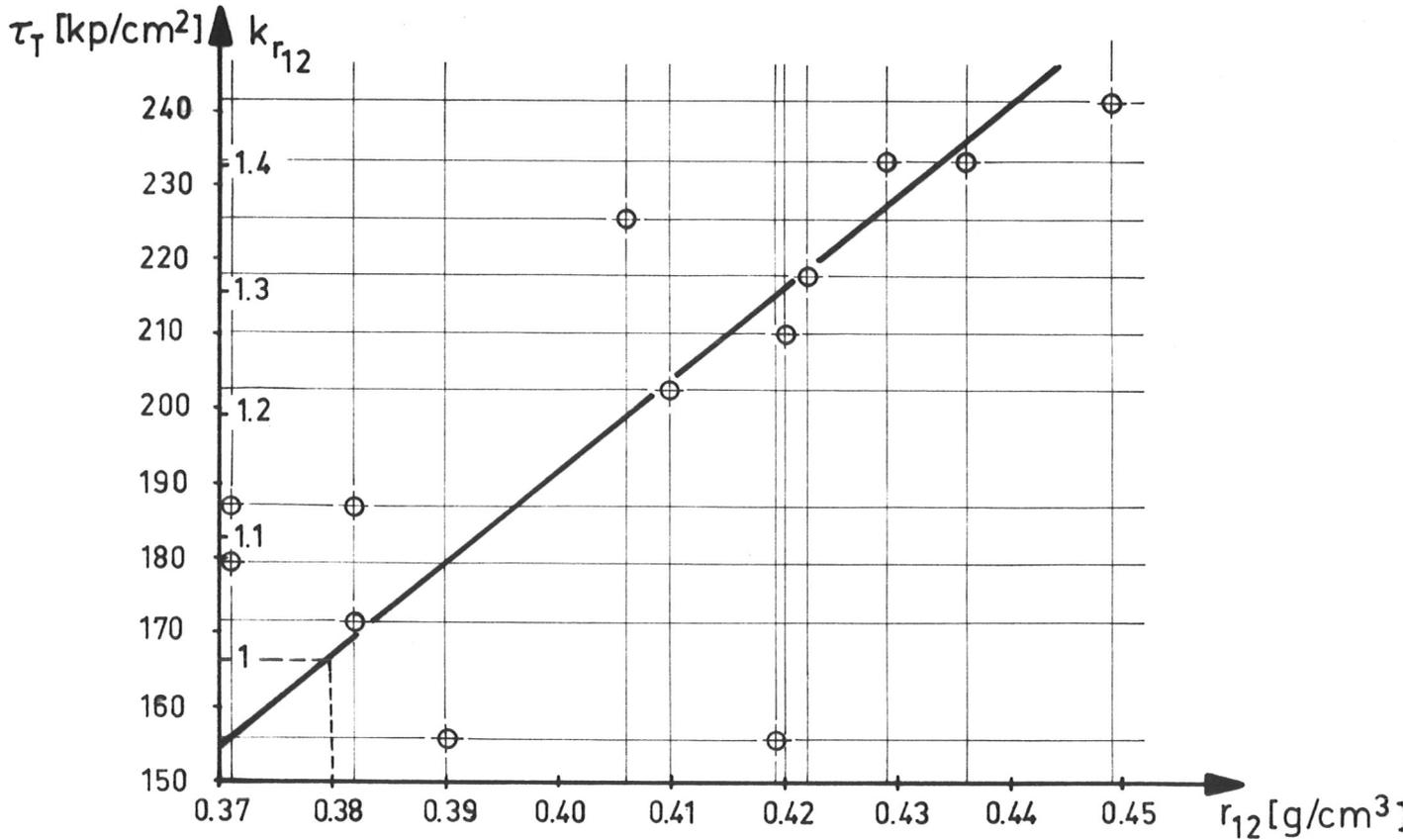


Bild 19: Abhängigkeit der Torsionsfestigkeit von einer gleichzeitig wirkenden Schubspannung aus einer Querkraft





Ermittlung der  $k_{r_{12}}$ -Beziehung aus Meßpunkten am Beispiel der Rechteckproben mit 1cm×3.5cm Querschnittsfläche

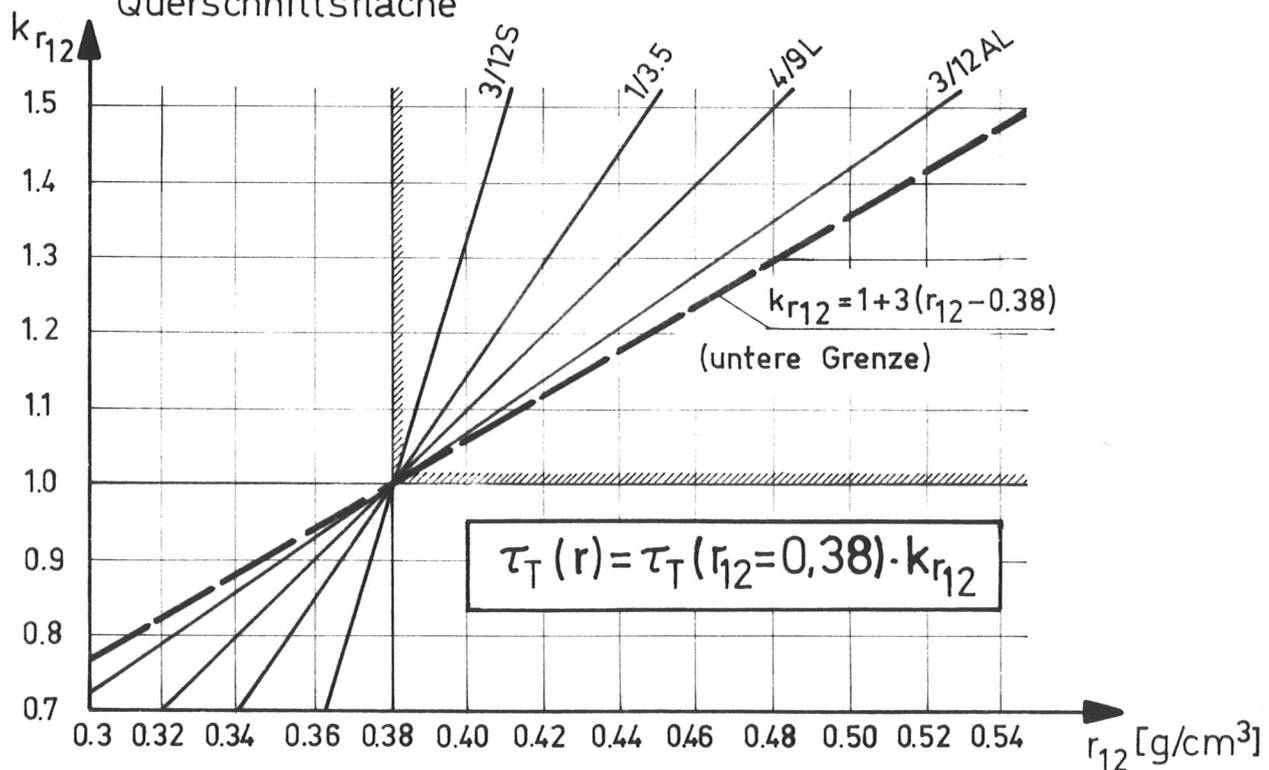


Bild 21 :  $k_{r_{12}}$  : Auswertung einiger Meßreihen und Festsetzung einer unteren Grenze für die Abhängigkeit der Torsionsfestigkeit von der Rohdichte bezogen auf  $r_{12} = 0.38 \text{ g/cm}^3$

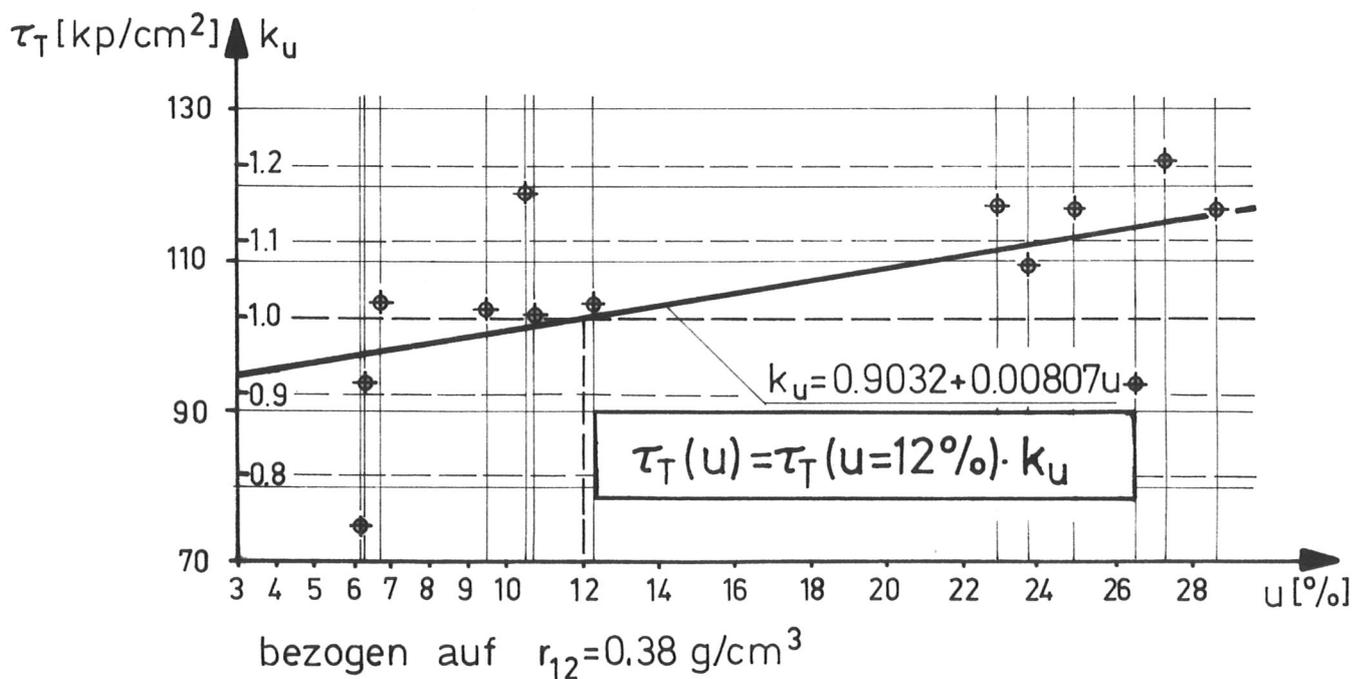
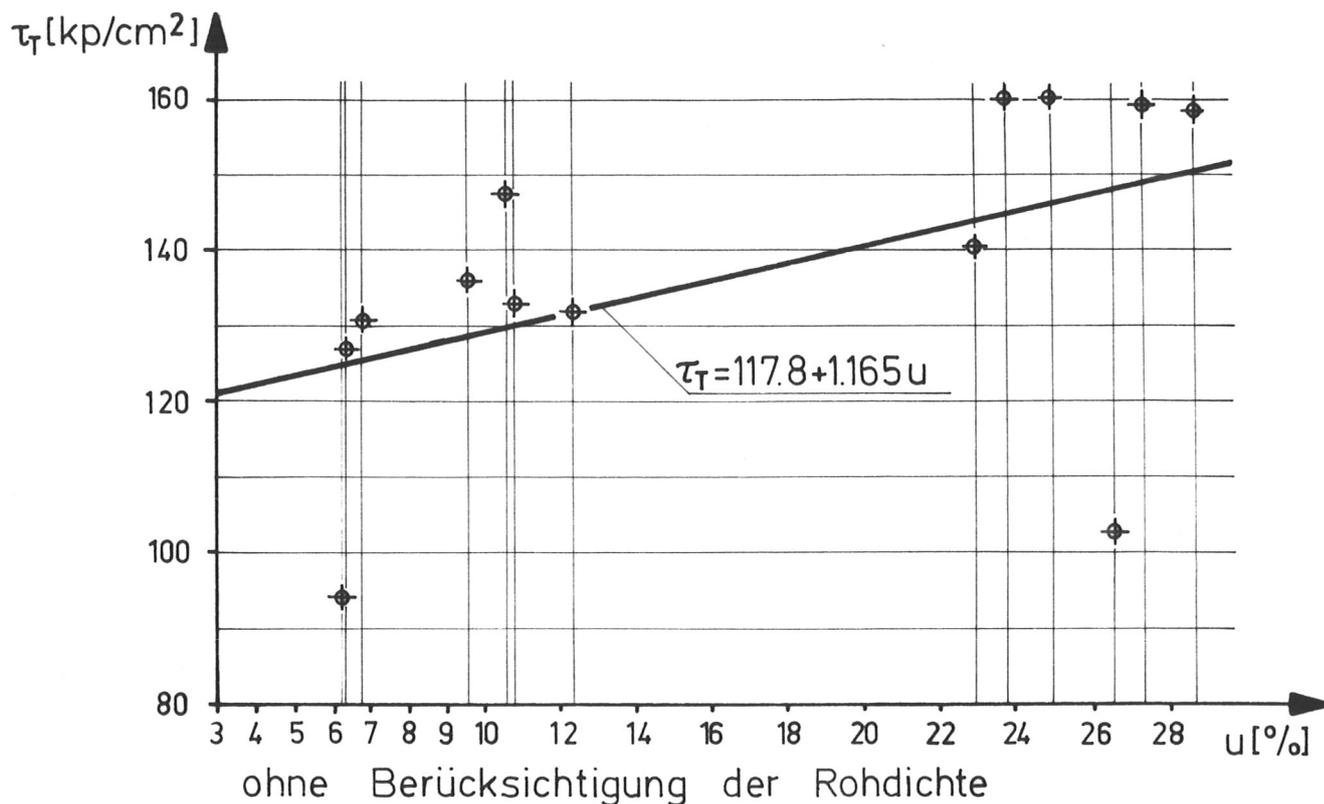


Bild 22 :  $k_u$  : Einfluß des Feuchtigkeitsgehalts auf die Torsionsfestigkeit bezogen auf  $u=12\%$

	Querschnitt b/h	$\tau_T 5\%$ kp/cm <sup>2</sup>	U %	$r_u$ g/cm <sup>3</sup>	$r_{12}$ g/cm <sup>3</sup>	$\tau_T^+$ kp/cm <sup>2</sup>	$k_{h/b}^+$
Brett- schichtholz	6/6	51.8	12.9	0.48	0.477	39.8	1.00
	4/9	53.6	11.4	0.48	0.482	41.2	1.04
	3/12	68.1	11.3	0.45	0.453	56.2	1.41
	2.4/15	66.1	11.4	0.45	0.452	54.6	1.37
Vollholz	6/6	42.1	13.8	0.47	0.464	33.1	1.00
	4/9	52.4	13.8	0.48	0.474	40.3	1.22
	3/12	34.8	13.8	0.47	0.464	27.4	0.83
	2.4/15	53.0	14.0	0.50	0.495	38.8	1.17
	2/18	67.7	13.9	0.49	0.485	50.7	1.53

$$\tau_T^+ = \frac{\tau_{5\%}}{k_{r_{12}} \cdot k_u}$$

$$k_{r_{12}} = 1 + 3(r_{12} - 0.38)$$

$$k_u = 0.9032 + 0.00807u$$

$$k_{h/b}^+ = \tau_{h/b}^+ / \tau_{6/6}^+$$

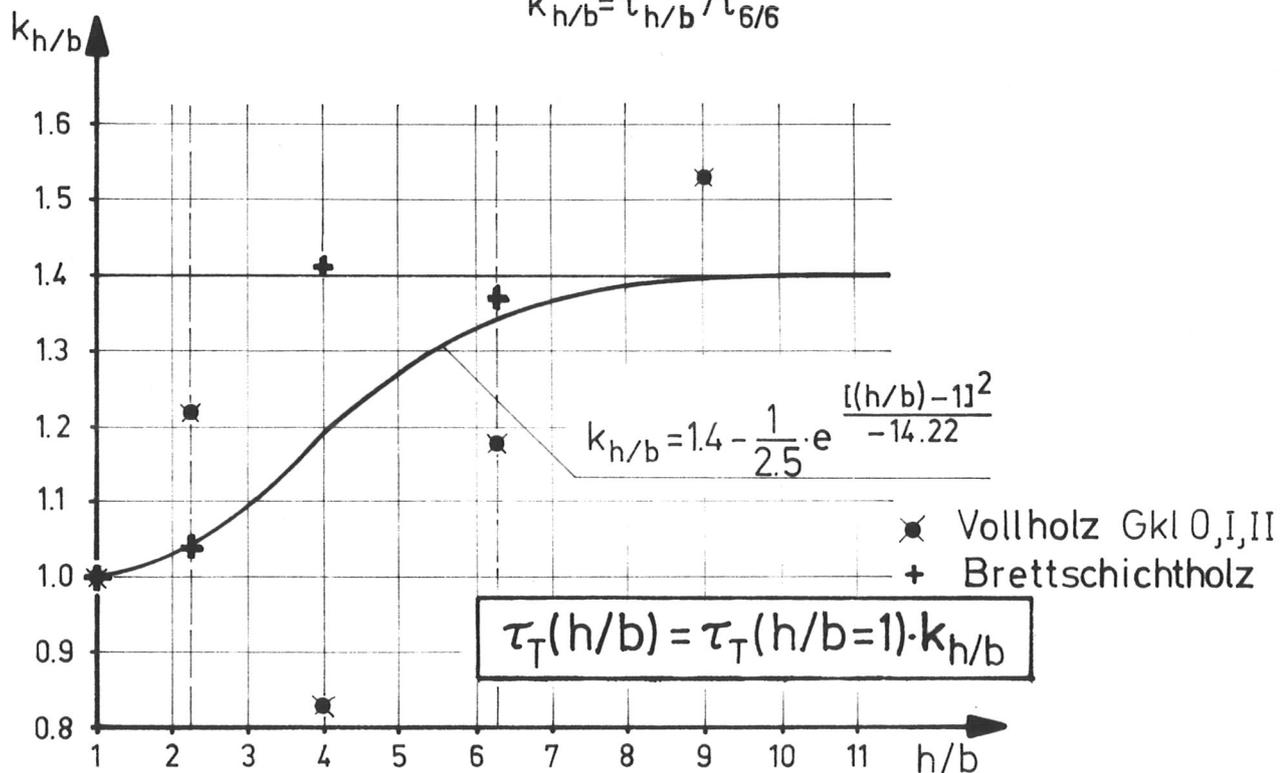


Bild 23:  $k_{h/b}$ : Abhängigkeit der Torsionsfestigkeit vom  $h/b$ -Verhältnis

Querschnitt	Güteklasse	u %	r <sub>12</sub> g/cm <sup>3</sup>	h/b	$\bar{\tau}_T$ kp/cm <sup>2</sup>	$\tau_T^+$ kp/cm <sup>2</sup>
6/6	0	14.0	0.503	1	125.8	90.4
	I	13.7	0.468	1	62.5	48.8
	II	13.9	0.464	1	70.0	55.1
4/9	0	14.0	0.476	2.25	143.0	104.9
	I	13.7	0.464	2.25	74.3	56.2
	II	13.5	0.506	2.25	73.4	50.5
3/12	0	13.8	0.490	4	155.3	96.9
	I	14.2	0.474	4	105.2	67.9
	II	13.6	0.476	4	86.6	55.9

$$k_{r_{12}} = 1 + 3(r_{12} - 0.38)$$

$$k_u = 0.9032 + 0.00807u$$

$$k_{h/b} = 1.4 - \frac{1}{2.5} \cdot e^{\frac{[(h/b)-1]^2}{-14.22}}$$

$$\tau_T^+ = \frac{\bar{\tau}_T}{k_{r_{12}} \cdot k_u \cdot k_{h/b}}$$

$$k_{Gkl}^x = \bar{\tau}_{Gkl}^+ / \bar{\tau}_{II}^+$$

$$k_{Gkl} = \bar{\tau}_{Gkl}^+ / \left( \frac{1}{2} (\bar{\tau}_I^+ + \bar{\tau}_{II}^+) \right)$$

$\bar{\tau}_0^+$ = 97.4	1.810	97.4	1.749
$\bar{\tau}_I^+$ = 57.6	1.071	55.7	1.000
$\bar{\tau}_{II}^+$ = 53.8	1.000		
$\tau_T^+$	$k_{Gkl}^x$	$\tau_T^+$	$k_{Gkl}$

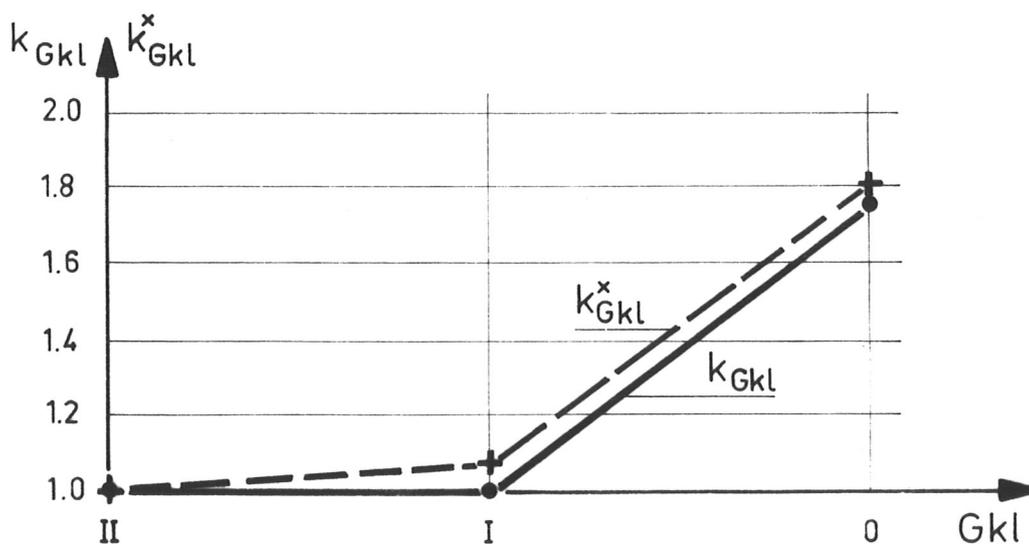
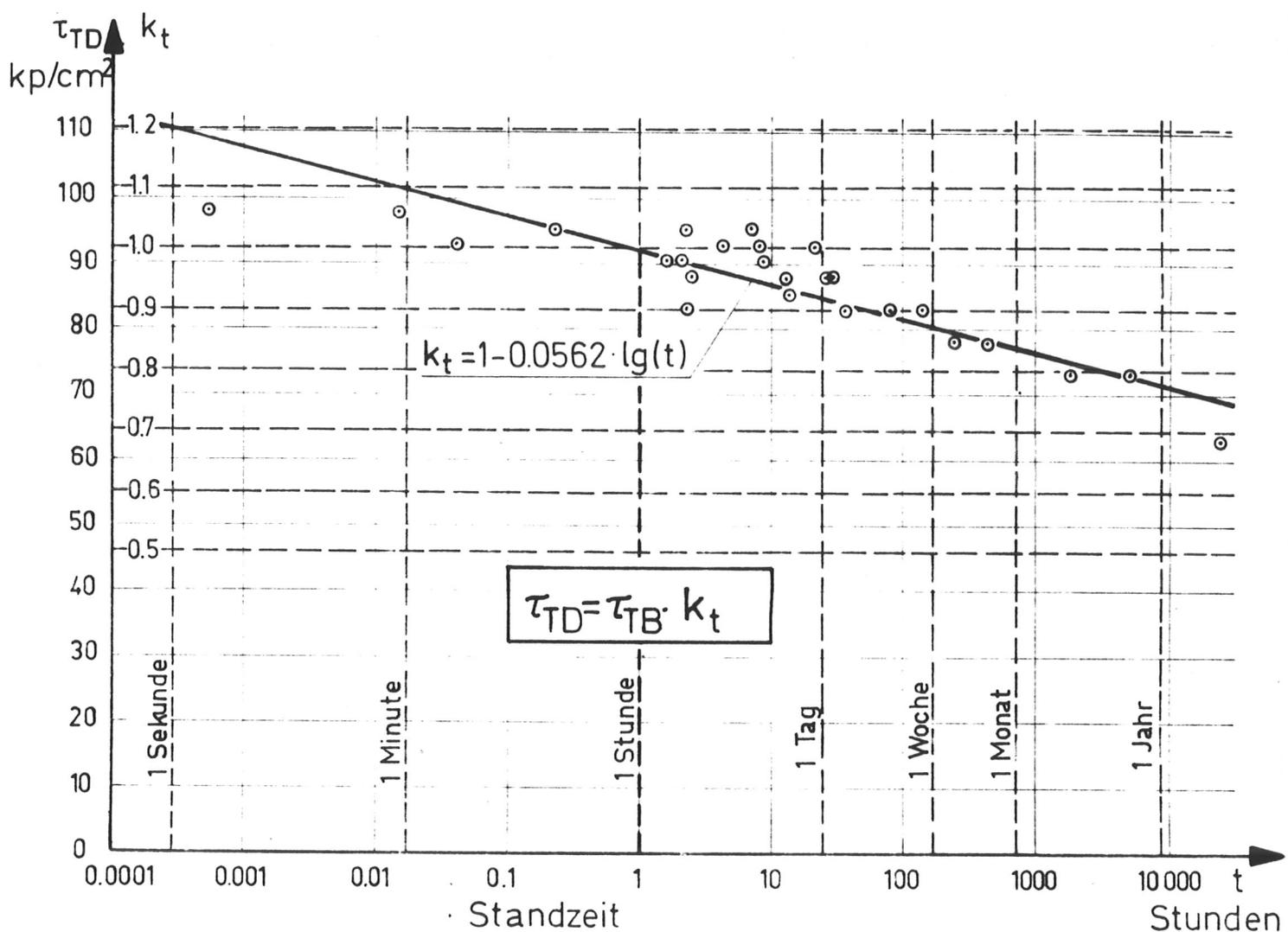


Bild 24:  $k_{Gkl}$  : Abhängigkeit der Torsionsfestigkeit von der Güteklasse nach DIN 4074



7  
 Bild 25:  $k_t$ : Abhängigkeit der Torsionsfestigkeit von der Dauer der Lasteinwirkung (Rundholzproben)

mittlere Torsionsfestigkeit bei  $\tau_Q = 0 \text{ kp/cm}^2$  (s. Bild 19):  $\bar{\tau}_T = 66.1 \text{ kp/cm}^2$

bei den Versuchsträger waren alle Einflußparameter mit Ausnahme der vorhandenen Querkraftschubspannung nahezu gleich

$$k_{\tau_Q} = \tau_{T \text{ vorh.}} / \bar{\tau}_T$$

$\tau_{Q \text{ vorh.}} \text{ (kp/cm}^2\text{)}$	0					2.6	4.7	6.0	7.2	8.9	12.0	18.0		
$\tau_{T \text{ vorh.}} \text{ (kp/cm}^2\text{)}$	61.3	63.2	63.9	65.5	69.5	73.0	74.1	69.8	73.6	62.3	62.6	53.2	48.1	41.3
$k_{\tau_Q}$	0.93	0.96	0.97	0.99	1.05	1.10	1.12	1.06	1.11	0.94	0.95	0.81	0.73	0.63

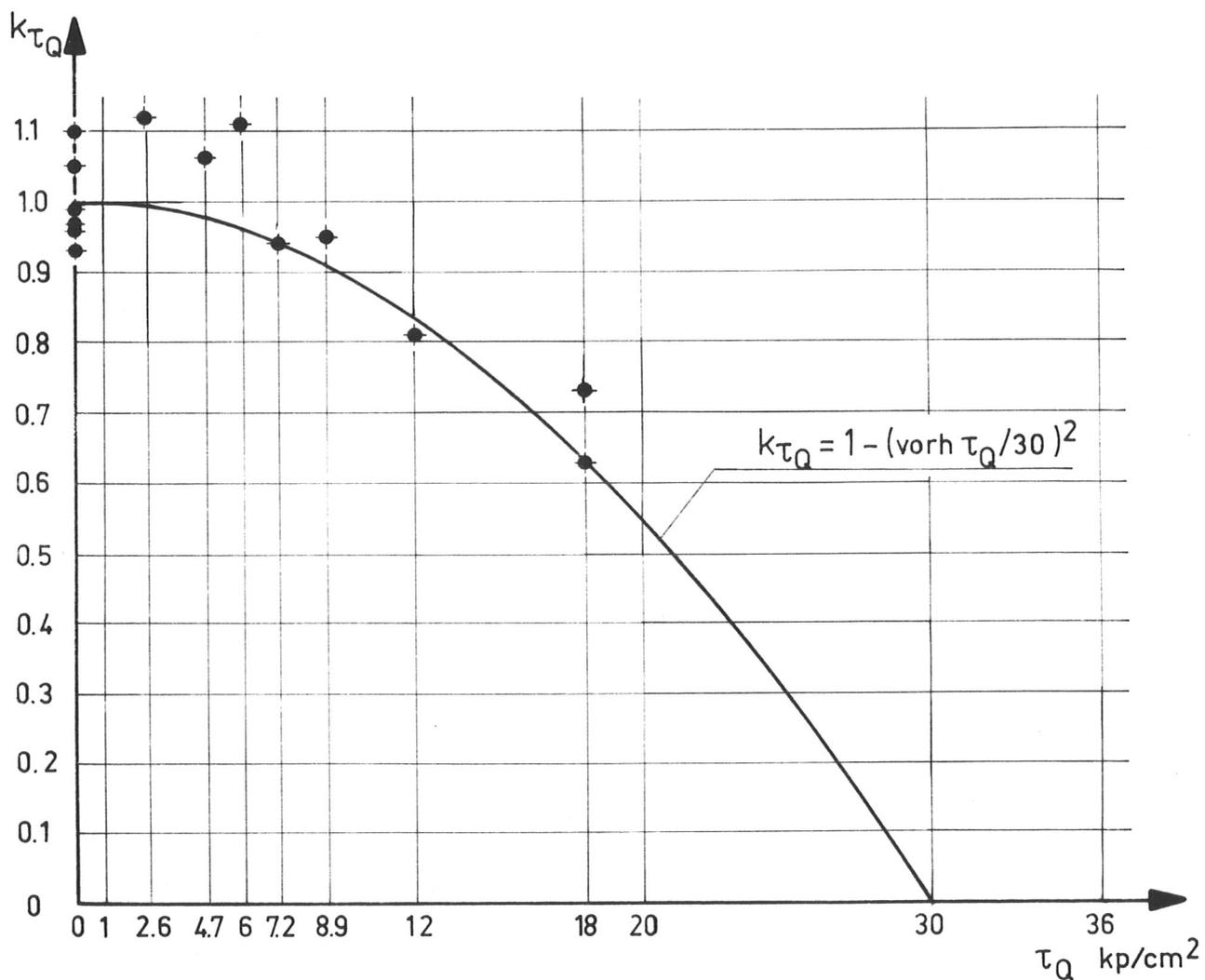


Bild 26:  $k_{\tau_Q}$ : Einfluß einer vorhandenen Schubspannung aus einer Querkraft auf die Torsionsfestigkeit

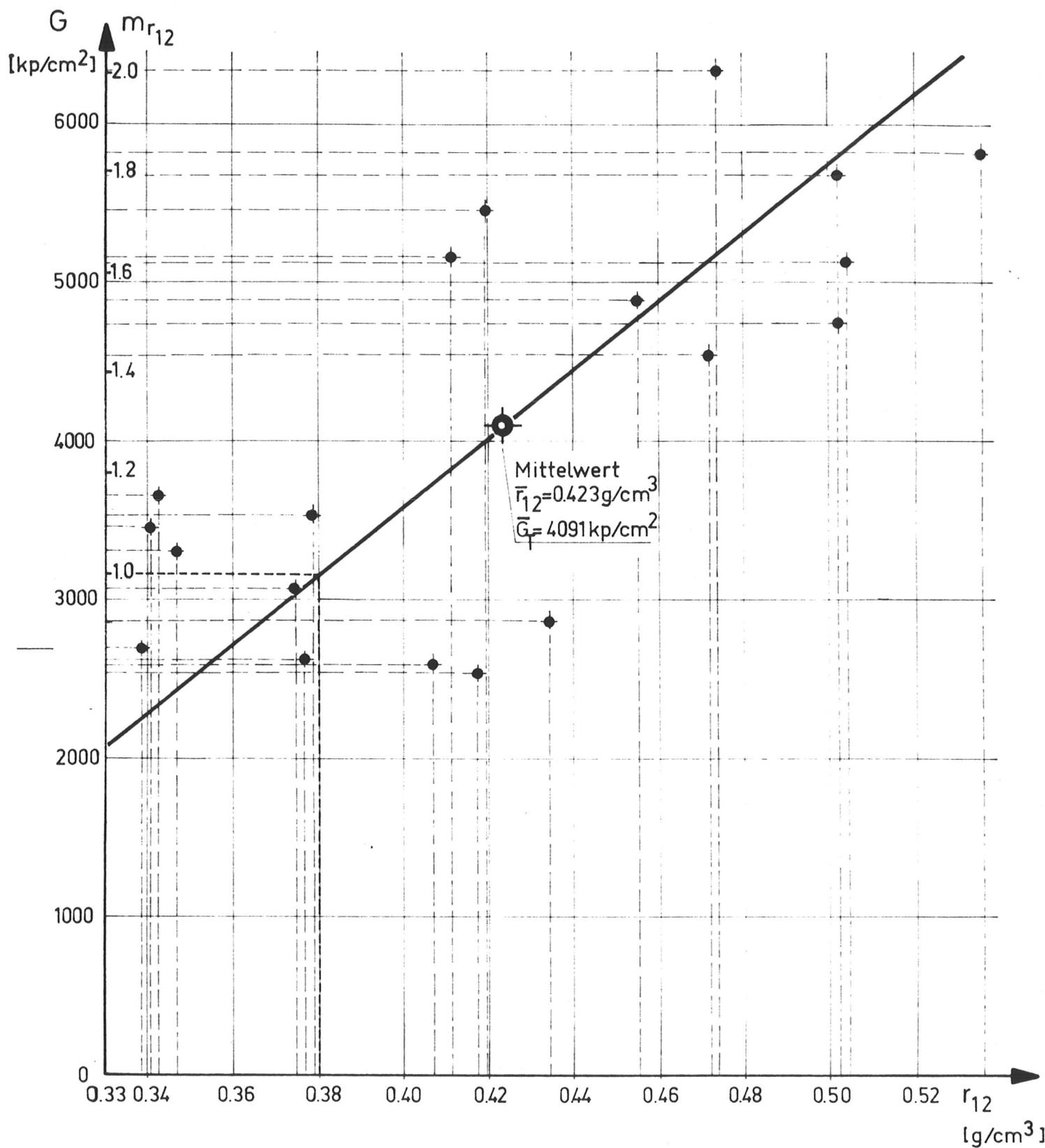


Bild 27 : Abhängigkeit des Torsionsmoduls von der Rohdichte am Beispiel der Reihe 3/12 AL

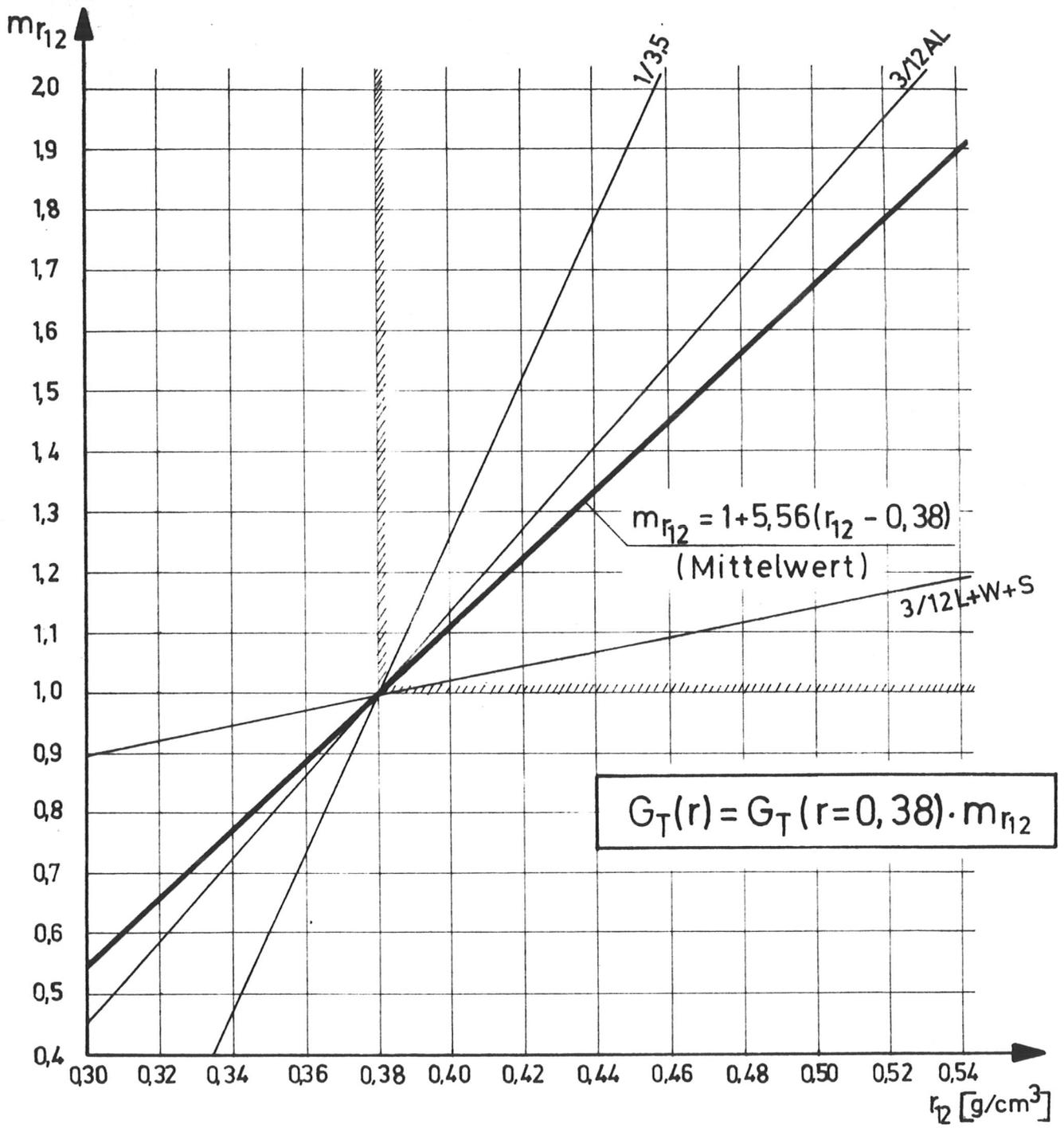


Bild 28:  $m_{r_{12}}$  : Einfluß der Rohdichte auf den Torsionsmodul

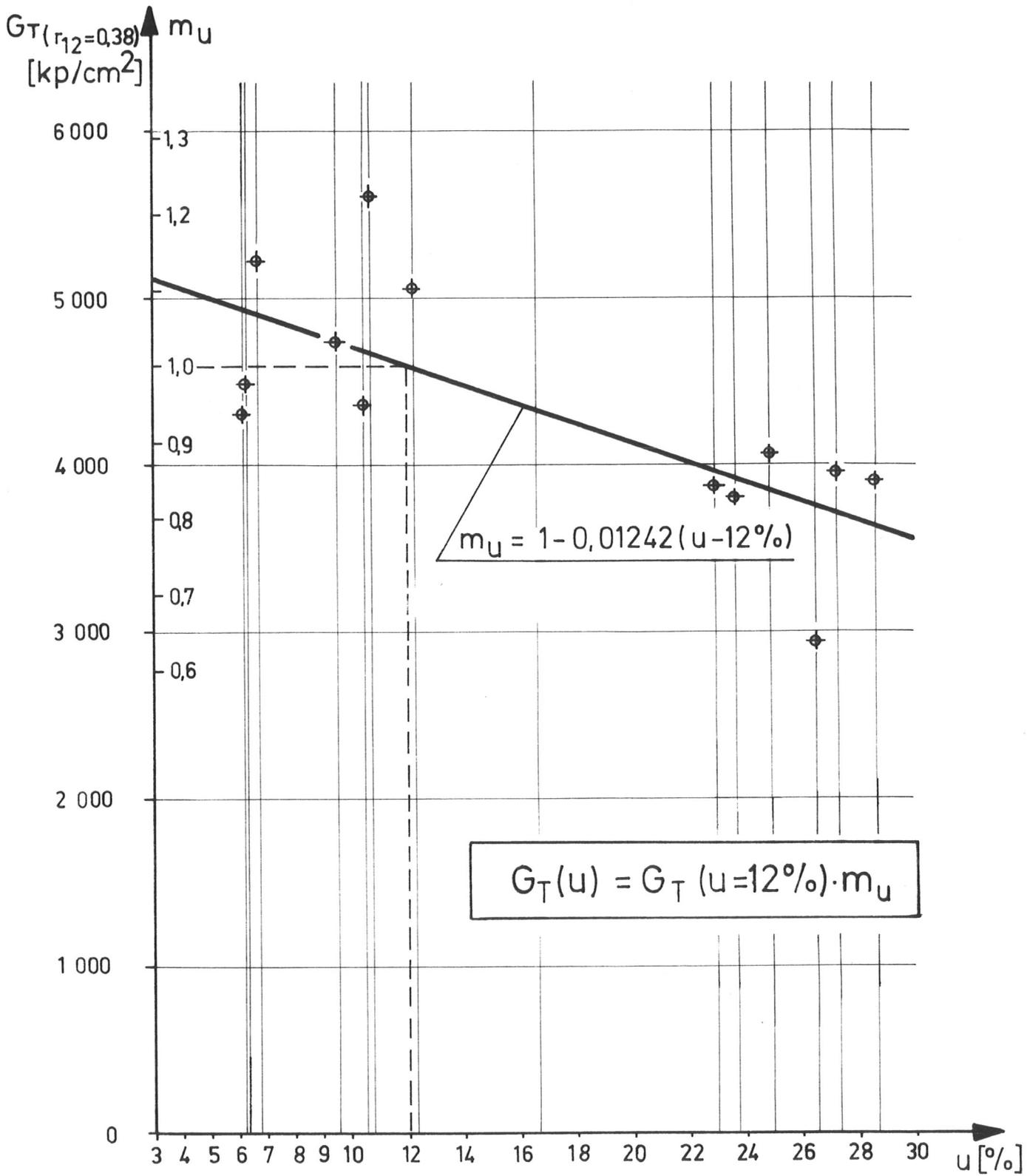


Bild 29:  $m_u$  : Einfluß der Holzfeuchtigkeit auf den Torsionsmodul

	Querschnitt b/h	$\bar{G}_T$ kp/cm <sup>2</sup>	u %	$r_u$ g/cm <sup>3</sup>	$G_T^+$ kp/cm <sup>2</sup>	$m_{h/b}^+$
Brett- schichtholz	6/6	4915	12,9	0,477	3229	1,007
	4/9	5329	11,4	0,482	3375	1,052
	3/12	6055	11,3	0,453	4269	1,331
	2,4/15	6468	11,4	0,452	4585	1,429
Vollholz	6/6	4571	13,8	0,464	3187	0,993
	4/9	5169	13,8	0,474	3472	1,082
	3/12	5685	13,8	0,464	3964	1,236
	2,4/15	7124	14,0	0,495	4456	1,389
	2/18	8167	13,9	0,485	5281	1,649

$$G_T^+ = \frac{\bar{G}_T}{m_{r_{12}} \cdot m_u}$$

$$m_{r_{12}} = 1 + 5,56(r_{12} - 0,38)$$

$$m_u = 1 - 0,01242(u - 12\%)$$

$$m_{h/b}^+ = \frac{2 \cdot G_T^+}{3229 + 3187}$$

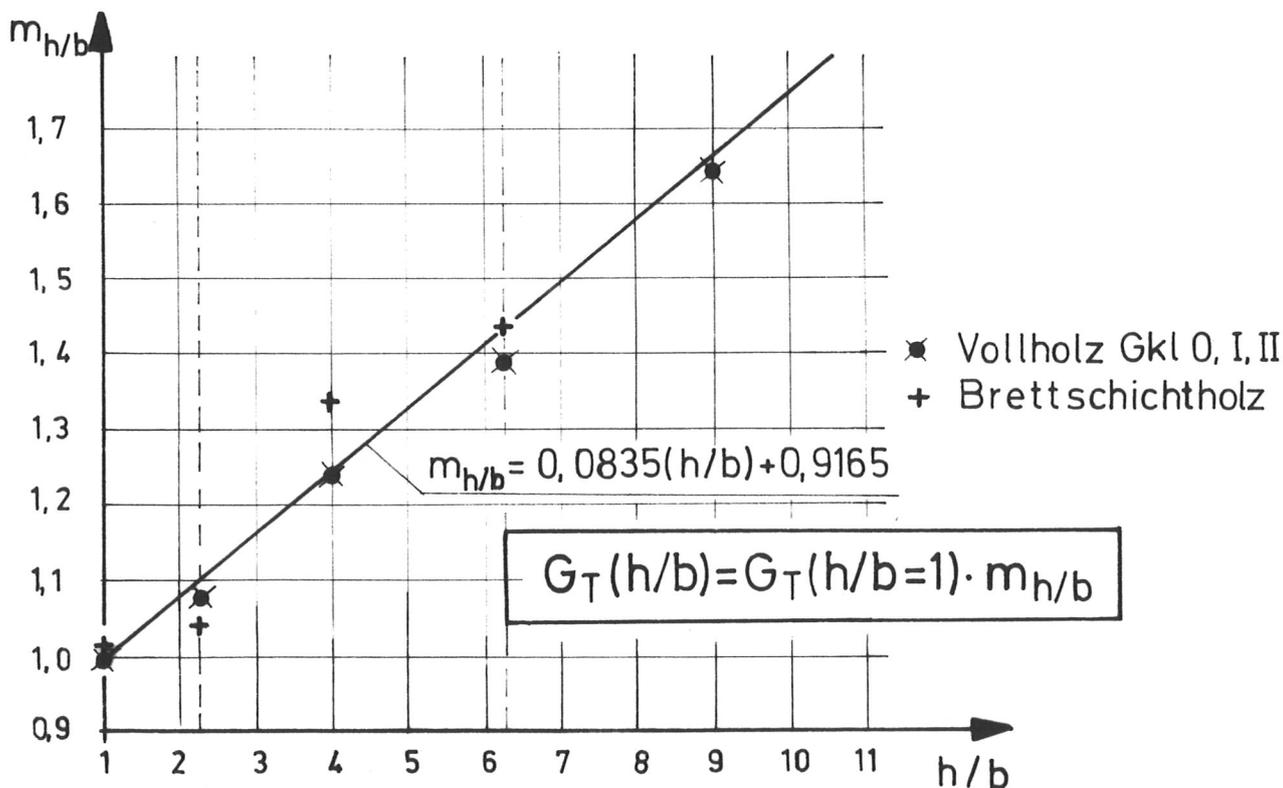


Bild 30:  $m_{h/b}$ : Einfluß des Höhen- Breiten-Verhältnisses auf den Torsionsmodul

Querschnitt	Güteklasse	u %	r <sub>12</sub> g/cm <sup>2</sup>	h/b	$\bar{G}_T^+$ kp/cm <sup>2</sup>	G <sub>T</sub> <sup>+</sup> kp/cm <sup>2</sup>
6 / 6	0	14,0	0,503	1	5564	3368
	I	13,4	0,463	1	3150	2161
	II	13,9	0,464	1	3118	2177
4 / 9	0	14,0	0,476	2,25	6161	3730
	I	13,7	0,464	2,25	3224	2033
	II	15,5	0,506	2,25	3072	1663

$$m_{r_{12}} = 1 + 5,56(r_{12} - 0,38)$$

$$m_u = 1 - 0,01242(u - 12)$$

$$m_{h/b} = 0,0835(h/b) + 0,9165$$

$$G_T^+ = \frac{\bar{G}_T}{m_{r_{12}} \cdot m_u \cdot m_{h/b}}$$

$\bar{G}_0^+$ = 3559	1,852	3559	1,771
$\bar{G}_I^+$ = 2097	1,091	2010	1,000
$\bar{G}_{II}^+$ = 1922	1,000		
G <sub>T</sub> <sup>+</sup>	m <sub>Gkl</sub> <sup>*</sup>	G <sub>T</sub> <sup>+</sup>	m <sub>Gkl</sub>

$$m_{Gkl}^* = \bar{G}_{Gkl}^+ / \bar{G}_{II}^+$$

$$m_{Gkl} = \bar{G}_{Gkl}^+ / (\frac{1}{2}(\bar{G}_I^+ + \bar{G}_{II}^+))$$

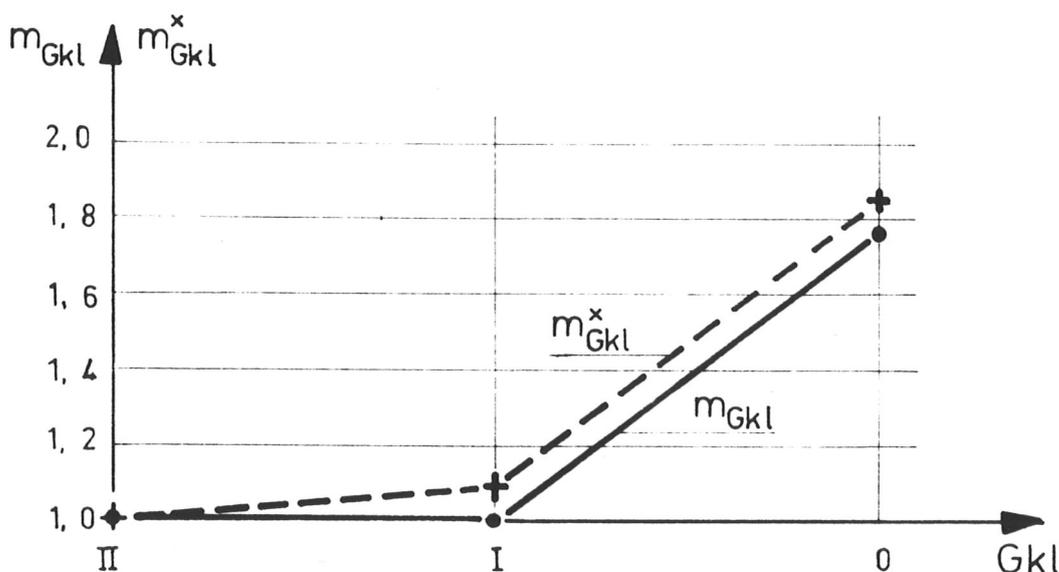


Bild 31 : m<sub>Gkl</sub> : Abhängigkeit des Torsionsmoduls von der Güteklasse nach DIN 4074

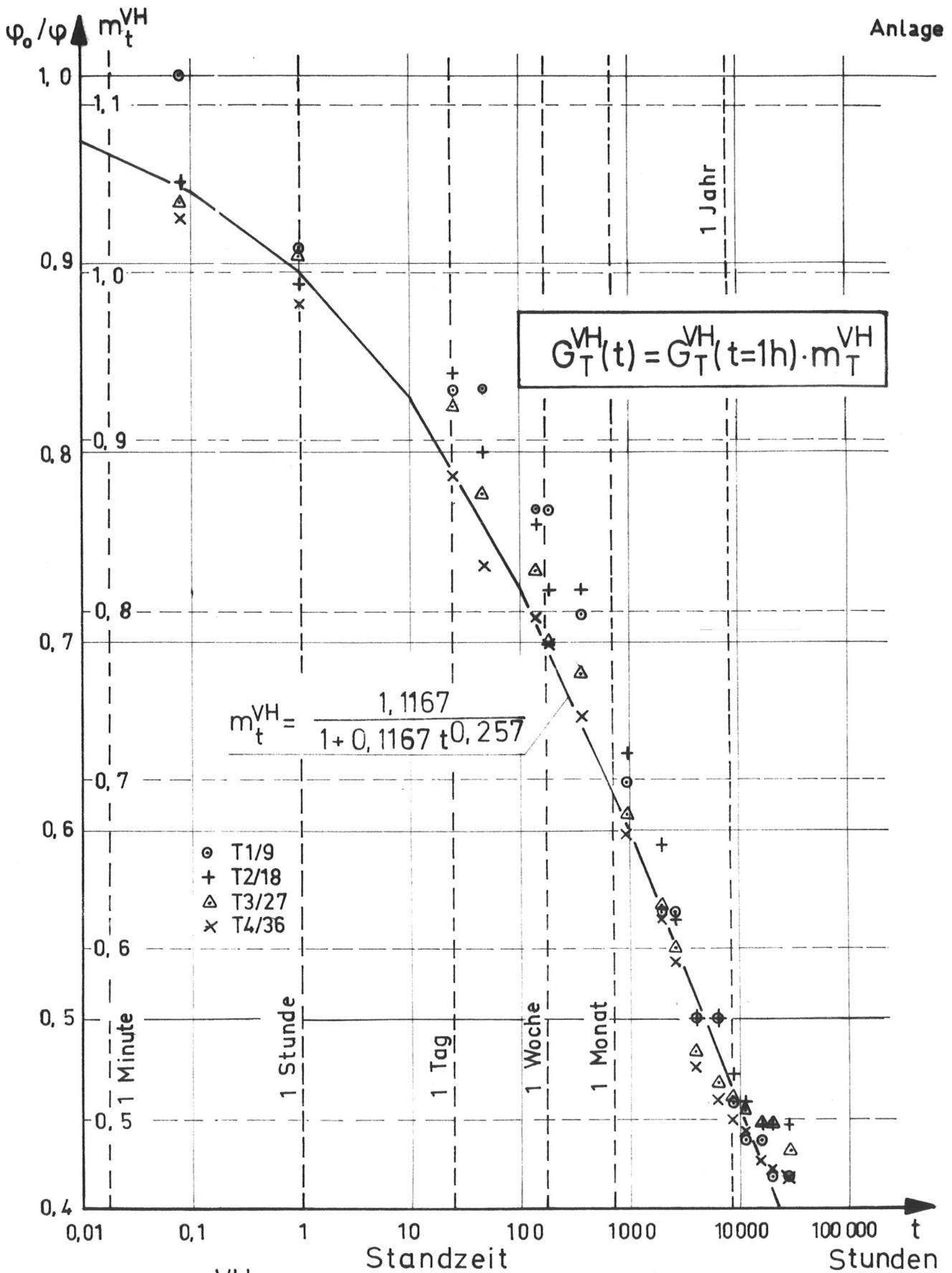


Bild 32 :  $m_t^{VH}$  : Abhängigkeit des Torsionsmoduls von der Dauer der Lasteinwirkung bei Fichtenvollholzproben

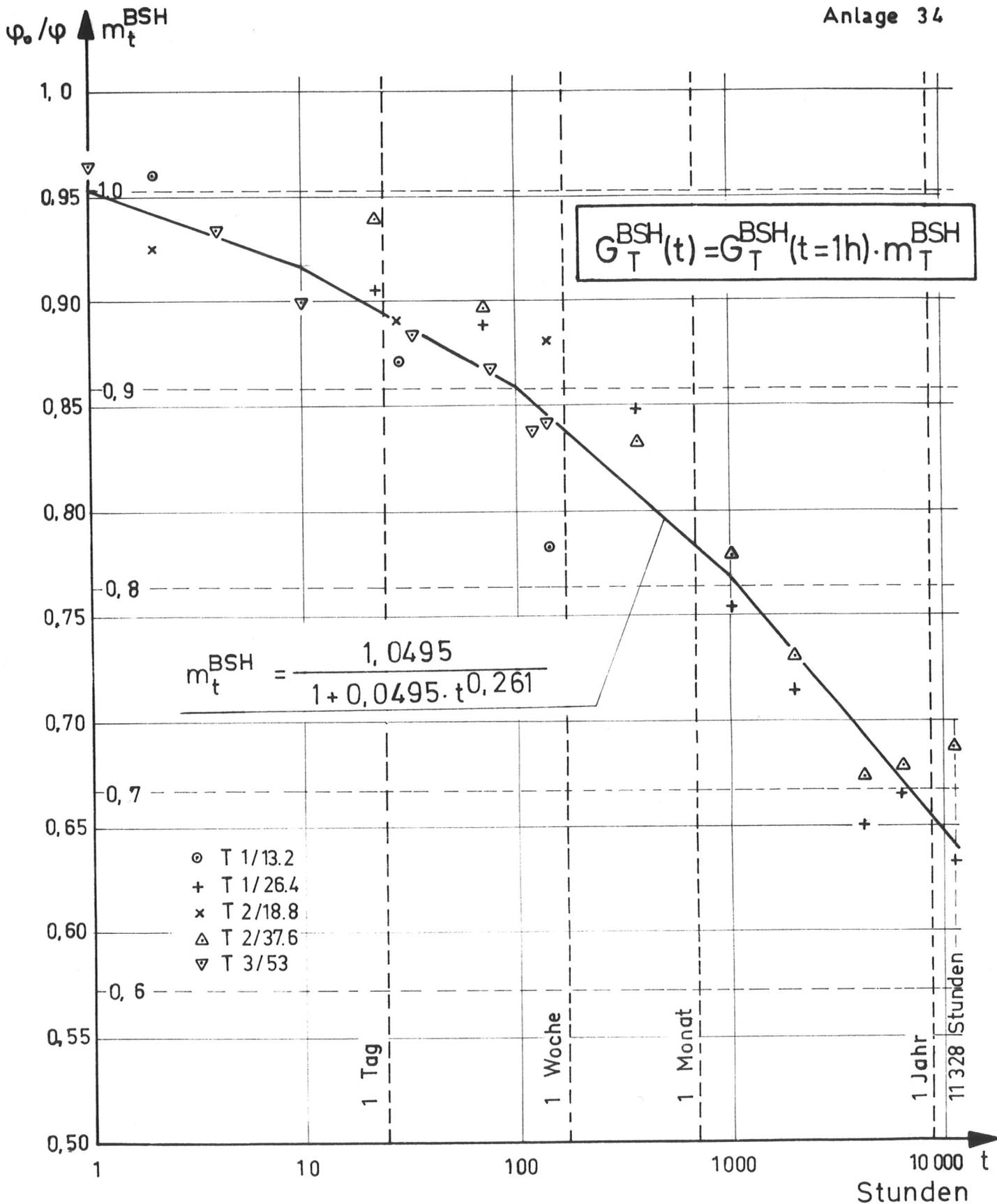


Bild 33 :  $m_t^{BSH}$  : Abhängigkeit des Torsionsmoduls von der Dauer der Lasteinwirkung bei Brettschichtholzproben (Fichte)