

RISSBILDUNG IN BRETTSCHICHTTRAEGERN DURCH TROCKNUNG ODER
DURCH TROCKNUNG NACH VORHERIGER FEUCHTIGKEITZUNAHME

Untersuchungen

durchgeführt im Auftrage der Entwicklungsgemeinschaft HOLZBAU
in der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung e.V.

von

Karl Möhler und Günter Steck

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
- Abteilung Ingenieurholzbau - der Universität Karlsruhe (TH)

1977

I N H A L T

1. Einleitung
2. Rechnerische Ermittlung der Eigenspannungen infolge Änderung der Holzfeuchtigkeit
3. Versuchsprogramm und Durchführung der Versuche
 - 3.1. Herstellung der Versuchskörper
 - 3.2. Klimalagerungsversuche
 - 3.2.1. Versuchsanordnung
 - 3.2.2. Bestimmung der Holzfeuchtigkeitsverteilung
 - 3.2.3. Rissebeobachtung
 - 3.3. Ermittlung der Materialeigenschaften der Versuchskörper
 - 3.3.1. Elastizitätsmodul bei Druckbeanspruchung quer zur Faser
 - 3.3.2. Elastizitätsmodul bei Zugbeanspruchung quer zur Faser
 - 3.3.3. Querkzugfestigkeit
 - 3.3.4. Quellmaße
 - 3.3.5. Rohdichte
4. Ergebnisse und Auswertung der Versuche
 - 4.1. Holzfeuchtigkeitsverteilungen
 - 4.2. Rißbildungen
 - 4.3. Elastizitätsmodul $E_D \perp$
 - 4.4. Elastizitätsmodul $E_Z \perp$
 - 4.5. Querkzugfestigkeit $B_Z \perp$
 - 4.6. Quellmaße α
 - 4.7. Rohdichten ρ_N und ρ_0
5. Verteilung der Eigenspannungen in den Versuchskörpern
6. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen
7. Literatur

1. Einleitung

Brettschichtträger für geschlossene Bauwerke mit Heizung werden in den meisten Fällen nach der Herstellung bei Zwischenlagerung, Transport zur Baustelle, während und nach der Montage bis zur Inbetriebnahme der Heizung einer höheren Luftfeuchtigkeit ausgesetzt sein, als es dem Normalwert der Feuchtigkeit entspricht, bei der die Verleimung vorgenommen wurde. In manchen Fällen können ihre Oberflächen auch zeitweilig mit freiem Wasser in Berührung kommen.

Die Forschungsaufgabe sollte klären, welche Beanspruchungen im Holz entstehen, welchen Einfluß ein Feuchteschutzanstrich auf die Feuchtigkeitsänderungen ausübt und welche Holzfeuchtigkeitsverteilungen über den Trägerquerschnitt zu Rissen in Faserrichtung im Holz oder in den Leimfugen führen.

Trocknungsspannungen an einem einzelnen Brett untersuchten Youngs und Norris [1]; Dietz u.a. [2] sowie Czechowicz [3] machten Angaben über die Spannungen in der Leimfuge zwischen zwei Lamellen, deren Feuchtigkeitsgehalt sich ändert.

Infolge der Quellungsanisotropie des Holzes, des inhomogenen Aufbaues eines Brettschichtträgerquerschnitts und der klimatischen Zustände, denen ein Träger ausgesetzt sein kann, hängen die bei Feuchtigkeitsänderung des Holzes auftretenden Eigenspannungen von vielen Faktoren ab. Um für das Brettschichtholz mit vertretbarem Aufwand Angaben über die Eigenspannungen machen zu können, wurde ein Rechenverfahren entwickelt, das in Abschnitt 2 dieses Berichtes erläutert wird. Durch Versuche mußten die Feuchtigkeitsverteilungen während der verschiedenen Befeuchtungs- und Trocknungsstadien sowie die für die Berechnung erforderlichen Materialkennwerte des untersuchten Brettschichtholzes ermittelt werden.

Die Art der Versuche machte es erforderlich, die brettschichtverleimten Versuchskörper selbst herzustellen, da einerseits zusätzliche klimatische Beanspruchungen des Versuchsmaterials beim Transport u.ä. vor Beginn der Versuche vermieden werden mußten und andererseits die Lamellenanordnung besondere Anforderungen erfüllen sollte.

2. Rechnerische Ermittlung der Eigenspannungen infolge Änderung der Holzfeuchtigkeit

Von einem Brettschichtträger wird eine Scheibe abgetrennt und der Lastfall "Holzfeuchtigkeitsänderung" untersucht. Wie in Bild 1 dargestellt, wird die Scheibe in Streifen aufgeteilt, an denen in tangentialer Richtung parabelförmig verteilt angenommene Schnittkräfte $m_i(x)$ (siehe [2]) angreifen sollen, wenn die Holzfeuchtigkeitsänderung in der angegebenen Weise verteilt ist.

Ist das Quell- bzw. Schwindmaß α über die Breite des Trägers konstant, so verursacht eine über den Querschnitt gleichmäßige Feuchtigkeitsänderung keine Spannungen, d.h. es ist nur das Feuchtigkeitsgefälle für das Entstehen von Spannungen in x-Richtung maßgebend. Ist das Quell- bzw. Schwindmaß über die Breite des Trägers jedoch veränderlich, dann entstehen bereits bei einer über den Querschnitt gleichmäßigen Feuchtigkeitsänderung Eigenspannungen in x-Richtung.

Da die durchgeführten Klimaversuche an Brettschichtträgerabschnitten im Querschnitt eine zur x-Achse symmetrische Feuchtigkeitsverteilung ergaben, wird im weiteren diese Symmetrie zur x-Achse zugrunde gelegt. Das folgende Verfahren ist grundsätzlich auch bei Asymmetrie der Feuchtigkeits- und/oder Materialkennwerteverteilung anwendbar.

Stellt man nun in jeder Schnittfuge zwischen den Streifen die Kontinuitätsbedingung für die Längenänderungen der Streifen in x-Richtung auf, so lassen sich für die Unbekannten m_1 bis m_n n geometrische Bedingungen anschreiben:

$$\begin{aligned} \delta_1^\alpha + \delta_1^N + \delta_1^{Q1} &= \delta_2^\alpha + \delta_2^N + \delta_2^{Q1} \\ \delta_2^\alpha + \delta_2^N + \delta_2^{Q2} &= \delta_3^\alpha + \delta_3^N + \delta_3^{Q2} \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \delta_n^\alpha + \delta_n^N + \delta_n^{Qn} &= \delta_M^\alpha + \delta_M^N + \delta_M^{Qn} \end{aligned}$$

Dabei bedeuten:

$\delta_i^\alpha = \frac{1}{2} \cdot \alpha_i \frac{\Delta u_i}{100} \cdot h$	Längenänderung des Streifens i infolge Quellen bzw. Schwinden.
$\delta_i^N = \frac{(m_{i-1} - m_i) h^2}{8 E_i l \cdot a}$	elastische Längenänderung des Streifens i infolge der Normalkraft N_i
$\delta_i^{Q_i(i-1)} = \frac{3 a \cdot m_i(i-1)}{5 G_{xyi}}$	Schubverformung des Streifens i in der Fuge i (i - 1).

Diese geometrischen Bedingungen führen zu einem linearen Gleichungssystem, mit dem die Unbekannten m_1 bis m_n berechnet werden können. Somit kann für jeden Streifen mit der Breite a und der Dicke 1 an jeder Stelle x die Spannung zu

$$\sigma_i(x) = \frac{N_i(x)}{a} = \frac{1}{a} \int_x^{\frac{h}{2}} (m_{i-1}(x) - m_i(x)) dx = \frac{4}{3 h^2 a} \left(\frac{h^3}{8} - x^3 \right) (m_{i-1} - m_i)$$

ermittelt werden.

Für den Normalfall von Bedeutung ist die maximale Spannung, die in halber Trägerhöhe ($x = 0$) auftritt.

3. Versuchsprogramm und Durchführung der Versuche

3.1. Herstellung der Versuchskörper

Die angelieferten Fichtenholzbretter 3.5/16 cm von 3.75 m Länge hatten im Mittel eine Holzfeuchtigkeit von ca. 15%. Nach zehnwöchiger Lagerung in der Versuchshalle wurde eine mittlere Holzfeuchtigkeit von 11.3% festgestellt. Die Feuchtigkeitsmessungen wurden mit einem elektrischen Feuchtemeßgerät durchgeführt. Nach der Lagerung wurden 50 Bretter mit liegenden und 10 Bretter mit stehenden Jahrringen ausgesucht und entsprechend Bild 2 vier Brettstapel gebildet, deren Anordnung genau beibehalten wurde, so daß jeweils 6 Probekörper aus

denselben Brettern bestanden. Die Bretter wurden auf 30 mm Dicke gehobelt und auf 125 cm Länge zugeschnitten.

Jeweils zwei Trägerabschnitte 16/45/125 cm wurden in einem Arbeitsgang verleimt und gepreßt. Der Leimauftrag erfolgte beidseitig mit einem Leimroller und der Preßdruck von 0.7 N/mm^2 wurde mit einer hydraulischen Prüfmaschine erzeugt. Alle weiteren Daten zur Herstellung der Probekörper sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

Die 1.25 m langen Trägerabschnitte wurden nach dem Herstellen mindestens 3 Tage im Klimaraum bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert, ehe die Leimperlen abgehobelt und aus jedem Trägerabschnitt zwei Probekörper mit 60 cm Länge gewonnen wurden. Die Probekörper A 1 bis A 12 aus den Stapeln I und II werden von Lamellen gebildet, die vorwiegend liegenden Jahrringverlauf hatten (Bild 3). Bei den Probekörpern B 1 bis B 12 waren im mittleren Drittel des Querschnitts 5 Bretter mit vorwiegend stehenden Jahrringen angeordnet, während die übrigen Lamellen wie bei A 1 bis A 12 vorwiegend liegende Jahrringe aufwiesen (Bild 4). Im übrigen entsprach die Anordnung der Lamellen den Anforderungen der DIN 1052, Bl. 1, Abs. 11.5.5. Alle Probekörper lagerten bis zum Beginn der verschiedenen Versuche im Normalklima $20^\circ \text{C}/65\%$.

3.2. Klimialagerungsversuche

3.2.1. Versuchsanordnung

Angaben über die Behandlung der Oberflächen sowie die Daten über die Dauer der Klimialagerungsversuche können Tabelle 2 entnommen werden. Es wurden 3 Versuche durchgeführt.

1. Versuch: Lagerung im Feuchtklima F.

Die Versuchskörper nach Tabelle 2 wurden nach 20tägiger Lagerung im Normalklima $20^\circ/65\%$ 42 Tage einer mittleren relativen Luftfeuchtigkeit von 95% ausgesetzt und anschließend wieder in das Normalklima $20^\circ/65\%$ zurückgebracht.

2. Versuch: Lagerung im Trockenklima T.

Die Versuchskörper wurden nach 34 Tagen Normalklima 68 Tage einer mittleren relativen Luftfeuchtigkeit von 19% bei + 32° C ausgesetzt und anschließend wieder in das Klima 20°/65% zurückgebracht.

3. Versuch: Lagerung im Feuchtklima F, anschließend im Trockenklima T.

Die Versuchskörper wurden nach 139 Tagen im Normalklima zuerst 55 Tage dem Feuchtklima ausgesetzt. Unmittelbar anschließend wurden die Körper bei 20° bis 25° C 15 Tage lang bei einer mittleren relativen Luftfeuchtigkeit von 44% und danach 32 Tage lang bei einer Temperatur von 32° C und einer mittleren relativen Luftfeuchtigkeit von 27% gelagert. Anschließend wurden die Versuchskörper wieder in das Normalklima zurückgebracht. Klimaverlauf und die Änderung des Feuchtegehaltes einer Vergleichsprobe geht aus Bild 5 hervor.

3.2.2. Bestimmung der Holzfeuchtigkeitsverteilung

Da die ursprünglich vorgesehene elektrische Messung der Feuchteverteilung über den Holzquerschnitt bei der Kontrolle durch Darrproben teilweise abweichende Meßwerte ergab, wurde ausschließlich das Darrverfahren angewendet. Die durch Sägen und Spalten gewonnene Aufteilung einer Trägerscheibe in 20 bzw. 28 Teilproben geht aus Bild 6 hervor.

3.2.3. Rissebeobachtung

Die vorhandenen und nach verschieden langer Lagerung auftretenden Risse wurden nach folgendem Schema festgehalten:

Wie aus Bild 7 hervorgeht, wurden auf den Längsseiten der Probekörper die Mittelachsen gezeichnet und die Lamellen durchnummeriert. Jeder vorhandene bzw. neu entstehende Riß konnte somit durch Messung der Abstände der Rißenden von der Mittelachse und durch die Lamellennummern genau festgelegt werden. Die Messung der maximalen Rißbreiten erfolgte mit der Fühllehre. Die Versuchskörper wurden anfangs täglich und später in größeren Zeitabständen auf Risse hin untersucht. Das Ergebnis dieser Feststellungen ist in Abschnitt 4.2. enthalten.

3.3. Ermittlung der Materialeigenschaften der Versuchskörper

3.3.1. Elastizitätsmodul bei Druckbeanspruchung quer zur Faser

An 35 prismatischen Proben aus 9 verschiedenen Trägerabschnitten wurde bei Holzfeuchtigkeiten zwischen 7.1 % und 31.9 % das Last-Zusammendrückungsdiagramm aufgenommen und aus dem geradlinigen Bereich der E_D^{\perp} -Modul berechnet (Bild 8).

3.3.2. Elastizitätsmodul bei Zugbeanspruchung quer zur Faser

Mit 27 Proben aus 5 Trägern mit den Abmessungen $b/d/l = 3/3/22$ cm wurden Querzugversuche nach Bild 9 durchgeführt. Der Feuchtigkeitsgehalt der Proben lag zwischen 6.8 % und 24 %. Die Belastung wurde stetig bis zum Bruch gesteigert und das Lastdehnungsdiagramm für die Meßstrecke mittels x/y-Schreiber aufgezeichnet. Innerhalb der Meßstrecke lagen bei allen Proben stets nur Lamellen mit liegenden Jahrringen, um gegebenenfalls Schäl- oder Trockenrisse zu erfassen.

3.3.3. Querzugfestigkeit $\sigma_{Z\perp}$

Bei allen 27 Querzugversuchen trat der Bruch stets plötzlich auf. Aus der im Augenblick des Bruches wirkenden Höchstlast wurde die Bruchspannung berechnet.

3.3.4. Quellmaße

Von den Versuchskörpern eines jeden Brettstapels wurden je 12 Quellproben, die den ganzen Trägerquerschnitt erfaßten, entnommen. Die Proben wurden nach der Herstellung ausgemessen und gewogen. Danach wurden sie im Trockenschrank bei $\sim 100^{\circ}$ C 24 bis 48 Stunden getrocknet. Nach Feststellung von Darrgewicht und Darrabmessungen wurden die Proben bis zum Beginn des 3. Versuches im Normalklima gelagert. Da für die Auswertung der Versuche die Quellmaße für den Gesamtquerschnitt und nur im Feuchtebereich bis ca. 25 % benötigt wurden, konnten die Quellmaße nicht nach dem in DIN 52 184 angegebenen Verfahren ermittelt werden.

3.3.5. Rohdichten ρ_N und ρ_0

An den Quellproben wurden im klimatisierten und darrtrockenen Zustand Gewicht und Abmessungen bestimmt und daraus die Normal-Rohdichte ρ_N und die Darrohdichte ρ_0 berechnet.

4. Ergebnisse und Auswertung der Versuche

4.1. Holzfeuchtigkeitsverteilungen

Da bei den Versuchskörpern die Klimaeinwirkung nicht nur über die Seitenflächen, sondern auch über Ober- und Unterseite möglich war, war die Feuchtigkeitsverteilung über die Querschnittsbreite nicht über die gesamte Höhe der Versuchskörper gleich. Als für die Entstehung der Eigenspannungen maßgebende Feuchtigkeitsverteilung wurden deshalb nur die Werte derjenigen Darrproben zugrundegelegt, die im mittleren Querschnittsbereich auf 2x11 cm Höhe lagen. Dabei wurden jeweils die Werte der übereinander und symmetrisch zur vertikalen Mittelachse liegenden Darrproben gemittelt. In Bild 10 bis 12 sind für einzelne Probekörper die Feuchteverteilungen zu Beginn der Klimalagerung und nach bestimmter Lagerungsdauer aufgetragen. Die in den Diagrammen gestrichelt eingezeichneten Randwerte stimmen weitgehend mit den Feuchtigkeitswerten der bei den einzelnen Versuchen mit beobachteten Vergleichsproben 15/3/40 cm überein. Die Verbindungslinien zeigen weitgehend einen parabolischen Verlauf der Feuchteverteilung, wie er von Sonnleithner [4] für die Trocknung von Holz gefunden wurde. Die Versuchswerte können durch Parabeln der Form $y = p \cdot x^2 + y_0$ angeglichen werden. Für den 3. Versuch wurde das Spaltschema des maßgebenden Mittelbereiches verfeinert, so daß Versuchswerte in 1.5 cm Abstand gewonnen werden konnten. Aus der vergleichweisen Darstellung der unbehandelten und behandelten Probekörper ist die Feuchteschutzwirkung des Anstrichs in allen Fällen deutlich zu erkennen.

4.2. Rißbildungen

1. Versuch:

An den unbehandelten Körpern traten nach 15 bis 20 Tagen Rückklimatisierung an den Seitenflächen Risse auf und zwar bei Körper A 1 8 Risse und bei Körper B 1 14 Risse. Die Rißbreiten schwankten zwischen 0.1 bis 0.8 mm, wobei die Größtwerte etwa in halber Trägerhöhe festgestellt wurden. Hier wurden Rißtiefen von 10 bis 14 mm gemessen. Die geschützten Probekörper A 3 und B 3 blieben rissfrei.

2. Versuch:

Am unbehandelten Versuchskörper A 7 traten nach 15 Tagen Trocknung an 7 Stellen der Seitenflächen Risse bis zu 0.3 mm Breite auf, Der Körper A 9 mit Feuchteschutzanstrich zeigte während der 68-tägigen Trocknung keine Risse.

3. Versuch:

Die beobachteten Rißlängen und Rißbreiten, die bei Lagerung im Trockenklima auftraten, sind in Bild 13a dargestellt. In den meisten

Fällen verlängerten sich die Risse nicht mehr oder nur in geringem Maße. Eine Ausnahme bildete der Körper B 9 (mit Anstrich), bei dem sich der anfängliche RiB noch um das rund 3,5-fache verlängerte. Die RiBbreite mit 0,8 mm war die größte, die gemessen wurde. Da der RiB in der Fuge zwischen der 9. und 10. Lamelle verlief und bei ca. 29 mm RiBtiefe erst im Innern in das Holz übergang, scheint ein örtlicher Leimfehler nicht ausgeschlossen. In diesem Falle konnte ein Einfluß des Oberflächenschutzes nicht festgestellt werden. Bei allen übrigen Körpern traten die Risse nur innerhalb der Lamellen auf oder verliefen schräg von einer Lamelle zur andern, waren also nie durch die Leimfuge beeinflusst.

4.3 $E_{D\perp}$ - Modul bei Querdruckbeanspruchung

Die bei einer Stauchung von $\varepsilon = - 5\%$ sich ergebenden $E_{D\perp}$ -Werte sind in Bild 14 in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit aufgetragen. Ein Unterschied zwischen den Proben aus den Körpern A und B konnte bei der geringen Zahl der Versuche und der starken Inhomogenität des Versuchsmaterials nicht festgestellt werden. Deutlich war aber der Einfluß der Holzfeuchtigkeit festzustellen, der zwischen $u = 12$ bis 21% eine praktisch lineare Abhängigkeit der Mittelwerte von der Holzfeuchtigkeit ergab. (Bild 15). In Tabelle 3 sind Mittelwerte und Standardabweichung von $E_{D\perp}$ und $V_{D\perp}$ (Verformungsmodul) für die verschiedenen Feuchtigkeitszustände zusammengestellt.

4.4. $E_{Z\perp}$ - Modul bei Querkzugbeanspruchung

Die Last-Verformungskurven verliefen praktisch bis zum Bruch geradlinig. Dies läßt sich aus Bild 16 erkennen, in dem die $E_{Z\perp}$ -Moduln bei 5% Dehnung und die Verformungsmoduln aus der Bruchdehnung aufgetragen sind. Die Einzelwerte streuen bei einem bestimmten Feuchtigkeitsniveau zwar sehr stark (s. Tabelle 4), aber die Mittelwerte ergeben wie bei $E_{D\perp}$ im untersuchten Bereich von $u = 7$ bis 23% eine lineare Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit (Bild 17).

4.5. Querkzugfestigkeit $B_{Z\perp}$

Aus der Bruchlast $\max F$ und aus den an jeder Probe bestimmten Querschnittsabmessungen wurde die Querkzugfestigkeit:

$$B_{Z\perp} = \frac{\max F}{A} \text{ ermittelt.}$$

Mittelwerte, Standardabweichung, 5%- Fraktile und Vertrauensbereich des Mittelwertes sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Auch hier läßt sich wie beim E_{\perp} - Modul eine praktisch lineare Abhängigkeit des Mittelwertes von der Holzfeuchtigkeit angeben, wie aus Bild 18 hervorgeht.

4.6. Quellmaß α

Trägt man die ermittelten Quellungen in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit auf, so zeigt sich für die Holzfeuchtigkeitsbereiche 11 bis 5% (Trocknung) und 10 bis 25% (Befeuchtung) eine praktisch lineare Abhängigkeit zwischen der Quellung Q und der Holzfeuchtigkeit. Berechnet man für die einzelnen Meßwerte die Regressionsgeraden, so ergibt sich das Quellmaß als die Steigung der Winkelhalbierenden des Winkels zwischen den beiden Geraden:

$$\alpha = \frac{dQ}{du} \quad (\text{Bild 19})$$

Das Bestimmtheitsmaß lag für eine Probe bei 0.955, für die übrigen Proben zwischen 0.982 und 1. Wird aus Gründen der Vereinfachung zur Berechnung von Schwindverformungen das gleiche Maß α verwendet, dann beläuft sich die Abweichung höchstens auf ca. 6.5% und liegt damit in der Größenordnung der unvermeidlichen Meßfehler.

Nach der Lage der Jahrringe in den einzelnen Lamellen (siehe Bild 3 u. 4) war in der Querschnittsmitte ein kleineres Quellmaß als an den Randzonen zu erwarten. Da die Probekörper A 5 und A 9 bzw. B 5, B 7 und B 9 in ihrem Quellverhalten nahezu gleich waren, wurden die in Tabelle 6

zusammengestellten Quellmaße für die Streifen a, b, c aus den Mittelwerten der übereinander und symmetrisch zur vertikalen Trägerachse liegenden Proben ermittelt. Die Verteilung der mittleren Quellmaße über die Querschnittsbreite ist für die Träger A 5/A 9 in Bild 20 dargestellt.

4.7. Rohdichten ρ_N und ρ_o

Die Mittelwerte aus 60 Proben betragen für die Normal-Rohdichten $\rho_N = 0.434 \text{ g/cm}^3$ und für die Darr-Rohdichten $\rho_o = 0.410 \text{ g/cm}^3$.

5. Verteilung der Eigenspannungen in den Versuchskörpern

Setzt man die aus den Versuchen gewonnenen Materialkennwerte und Feuchtigkeitsänderungen in die Formeln des Abschnitts 2 ein, so lassen sich die Eigenspannungen in x-Richtung berechnen. In Anlehnung an den Wert für Fichtenvollholz nach Kollmann [5] wurde für Brettschichtholz ein Schubmodul G_{xy} von 50 N/mm^2 der Berechnung zugrundegelegt. Von besonderem Interesse sind hierbei die Spannungszustände, bei denen an den Seitenflächen der Versuchskörper Risse aufgetreten sind.

1. und 2. Versuch:

Bei den unbehandelten Körpern liegen die maximalen Querkzugspannungen an der Trägeroberfläche über dem 5^o/o-Fraktilewert der Querkzugfestigkeit, während bei den Versuchskörpern mit Anstrich die errechneten Querkzugspannungen im 1. Versuch unter dem 1^o/o-Fraktilewert der Querkzugfestigkeit liegen und im 2. Versuch diesen Wert geringfügig überschreiten (Bild 21 bis Bild 23).

3. Versuch:

Die Randspannung der unbehandelten Versuchskörper liegt auch hier über der 5^o/o-Fraktile der Querkzugfestigkeit. Die Randspannung der Körper mit Anstrich überschreitet diesen Wert zwar nicht, bei fehlerhafter Leimfuge ist das Auftreten eines Querkzugrisses aber unvermeidbar. Die Verteilung der Eigenspannungen in den Probekörpern ist in Bild 24 dargestellt.

Die in den Bildern 21 bis 24 eingetragenen 5⁰/o- und 1⁰/o-Fraktilenwerte der Querkzugfestigkeit beziehen sich auf den jeweiligen Feuchtigkeitsgehalt im Randbereich.

Die Versuchskörper hatten alle eine Höhe von 45 cm, die auch der Berechnung der Spannungen zugrunde liegt. Vergleichsrechnungen mit anderen Trägerhöhen ergaben, daß die Spannungen für Trägerhöhen über 40 cm mit größer werdender Trägerhöhe nur geringfügig zunehmen, was auch von Krabbe in [6] festgestellt wurde.

6. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Die Versuche haben gezeigt, daß Brettschichtträger ohne Feuchteschutz der Oberflächen bei Lagerung im Feucht- oder Trockenklima verhältnismäßig rasch in den Randzonen die Ausgleichsfeuchte erreichen, wodurch es zu einer über die Querschnittsbreite stark unterschiedlichen Holzfeuchtigkeitsverteilung kommt. Bei Trocknung entstehen dadurch Eigenspannungen, die in den Randbereichen ihren Höchstwert erreichen. Beim 1. und 3. Versuch führten bei den unbehandelten Körpern Feuchtedifferenzen von 10 bis 12⁰/o infolge Trocknung im 1 cm dicken Randstreifen zu Rissen an den Seitenflächen, und beim 2. Versuch betrug diese Feuchtedifferenz etwa 4⁰/o. Unter Berücksichtigung der großen Streuungen der Querkzugfestigkeit und der geringen Anzahl der Versuche muß bei auf den Träger einwirkender Feuchtigkeit und anschließender Trocknung entsprechend den Versuchsbedingungen bei unbehandelten Oberflächen mit Rißbildung gerechnet werden, wenn die Feuchtedifferenz infolge Trocknung im Randstreifen von 1 cm Dicke etwa 5⁰/o überschreitet. Tritt nach der Herstellung eine verstärkte Trocknung auf, so kann bereits eine Feuchtedifferenz von etwa 2⁰/o zur Entstehung von Längsrissen führen. Bei nach der Trägerherstellung auftretenden ungünstigen Klimabedingungen müßte durch eine Oberflächenbehandlung dafür Sorge getragen werden, daß die obigen Grenzwerte nicht überschritten werden. Durch die bei den Versuchen angewandte Oberflächenbehandlung mit einem Feuchteschutzmittel (Wolmanol 249 mit 130 g/m² Auftrag) konnte die Rißbildung weitgehend vermieden

werden, da eine deutlich verzögerte Feuchteangleichung im Randbereich auftrat, die zu abgeminderten Eigenspannungen führte.

Die rechnerische Ermittlung der Eigenspannungen und ihre Verteilung über die Querschnittsbreite mit den ermittelten Feuchteverteilungen und Materialkennwerten $E_D \perp$, $E_Z \perp$ und den Quellmaßen α hat gezeigt, daß die Rißbildung auf Überschreiten der Querkzugfestigkeit des Brett-schichtholzes zurückzuführen ist. Diese ist von der Feuchtigkeit abhängig und besonders bei niedriger Feuchtigkeit mit großen Streuungen behaftet. Rißbildungen lassen sich unter den untersuchten Lagerungsbedingungen nur vermeiden, wenn ein wirksamer Oberflächenschutz angewendet wird.

7. Literatur

- [1] Youngs, R.L. und C.B. Norris: A Method of Calculating Internal Stresses in Drying Wood. Rep. Nr. 2133, U.S. Forest Products Laboratory, Madison (Wis) 1958.

- [2] Dietz, A.G.H., H.Grinsfelder und E. Reissner: Glue-Line Stresses in Laminated Wood. Transactions of the American Society of Mechanic Engineers (A.S.M.E.) Vol 68 (1946) Nr. 1, S. 329/335.

- [3] Czechowicz, J.:Konstrukcyjne drewniane klejone.Wydawnictwo ARKADY 1960.

- [4] Sonnleithner, E.: Forschungs-Bericht Holz H. 1. VDI-Verlag, Berlin 1933.

- [5] Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Band 1, 2. Auflage. Springer-Verlag Berlin 1951.

- [6] Krabbe, E.: Über den Spannungszustand in Brettschichtträgern infolge Feuchtigkeitsänderung des Holzes. In: Konstruktiver Ingenieurbau in Forschung und Praxis (Festschrift Wolfgang Zerna und Institut KIB). Herausgeber Institut für Konstr. Ingenieurbau der Ruhruniversität Bochum. Werner-Verlag Düsseldorf 1976.

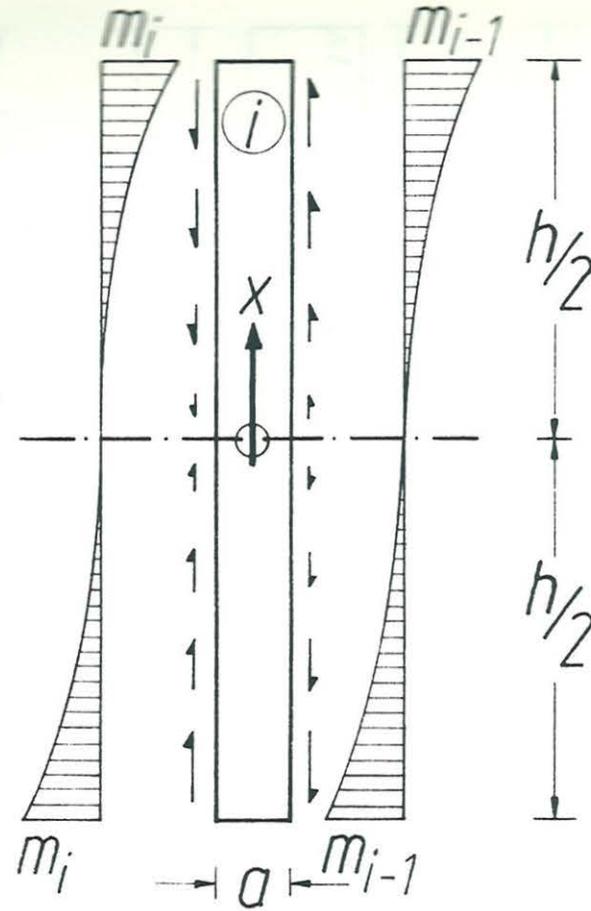
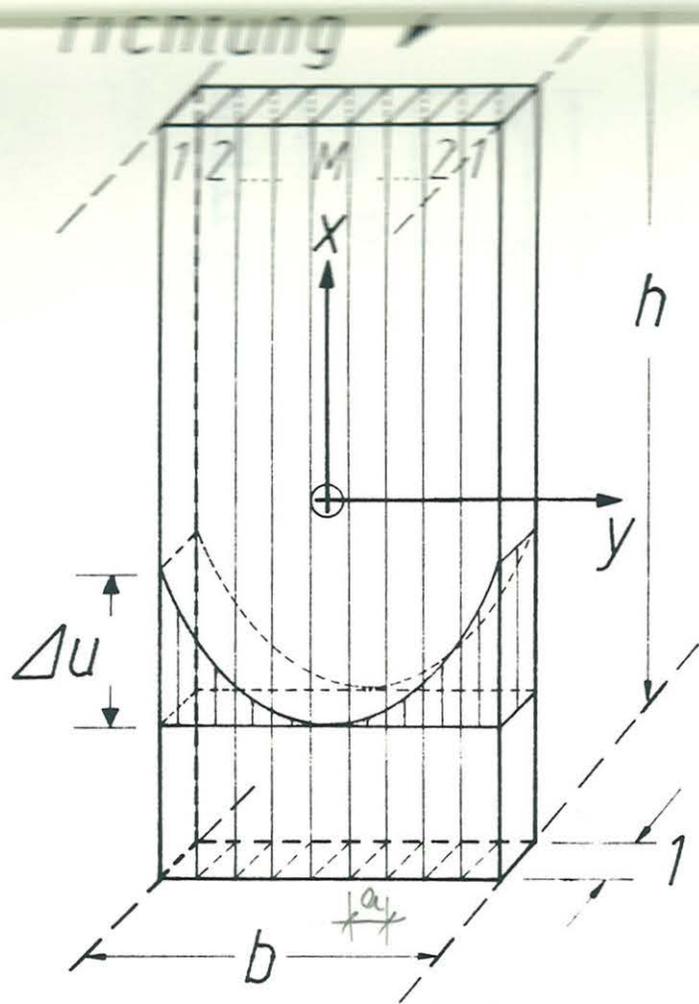
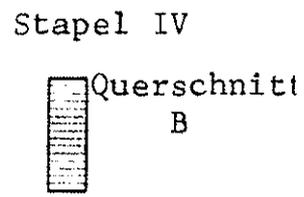
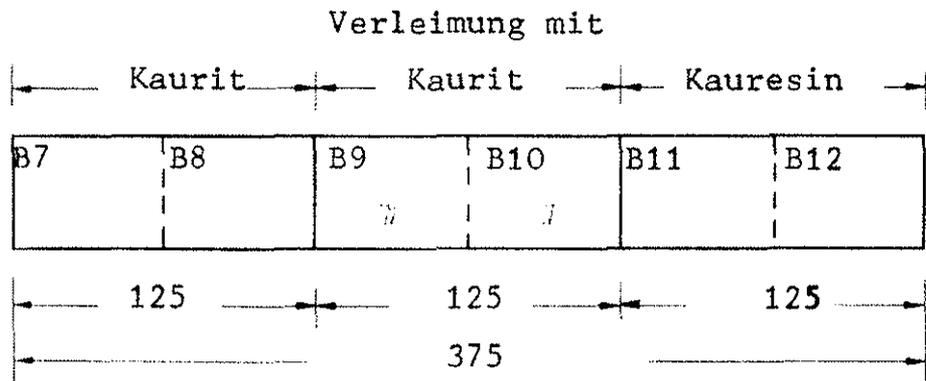
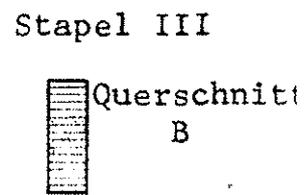
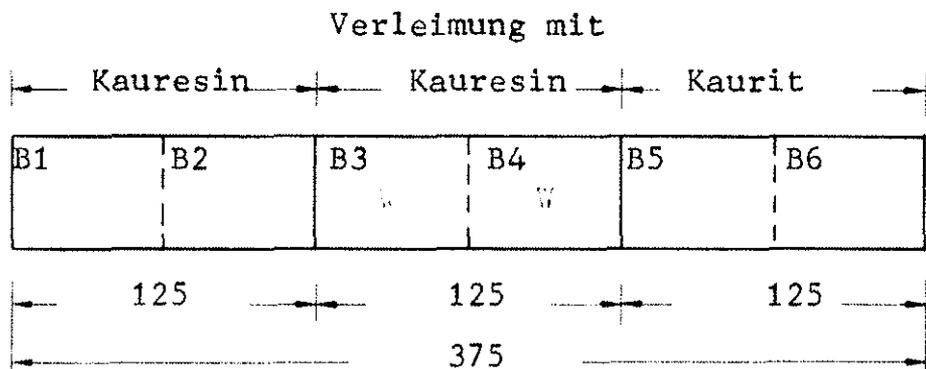
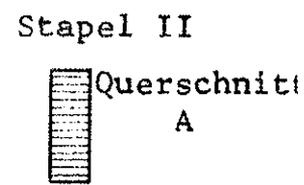
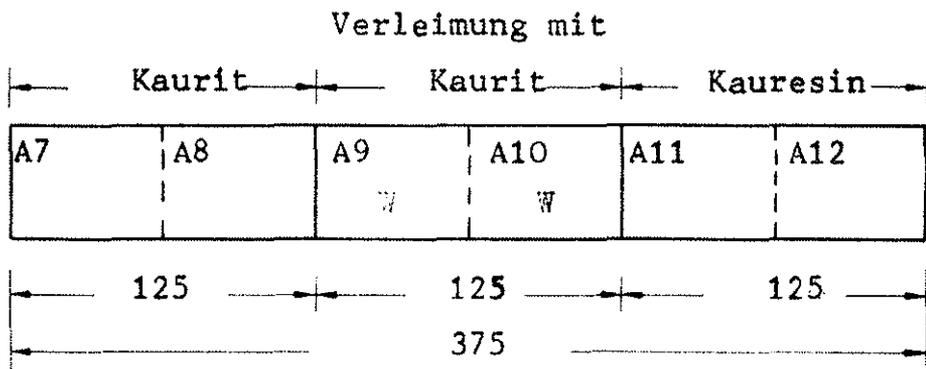
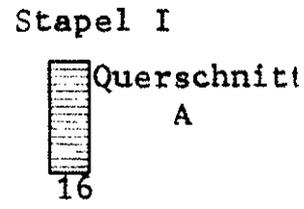
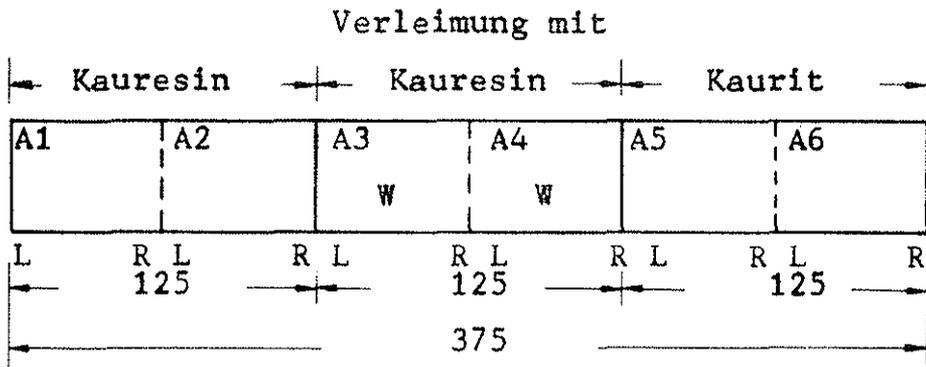
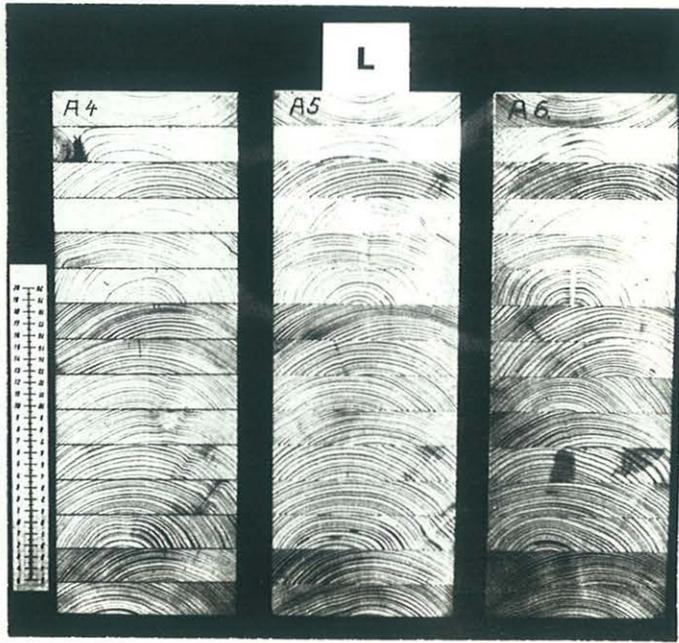
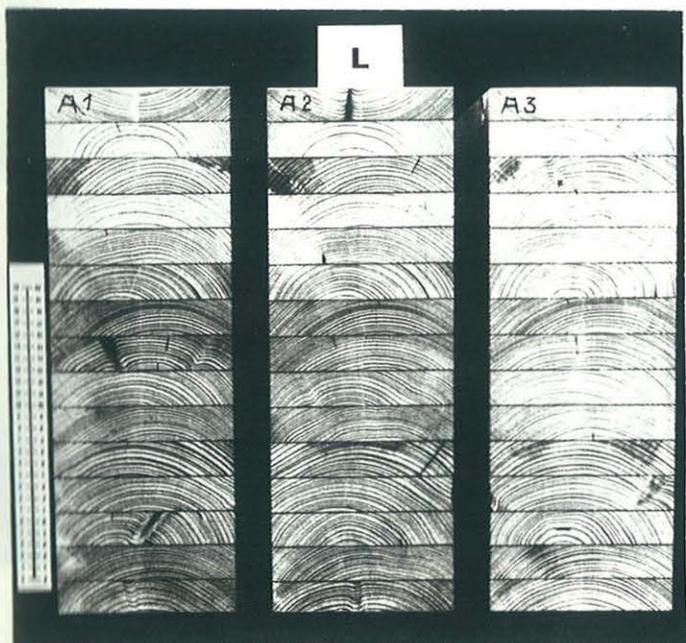


Bild 1: Aus einem Brettschichtträger der Breite b abgetrennte und in Streifen aufgeteilte Scheibe mit ungleichmäßiger Feuchtigkeitsänderung Δu sowie Verteilung der Tangentialkräfte an einem Streifen dieser Scheibe



Maße in cm
W: WOL mit L-Strich

Bild 2: Anordnung der Brettstapel für die Verleimung und Bezeichnung der Probekörper



7 8 5

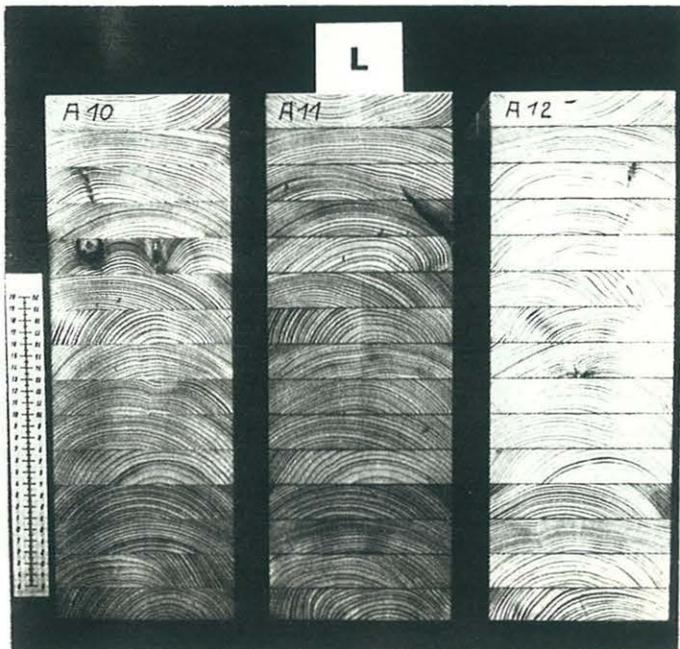


Bild 3: Querschnitte der Proben A1 bis A12

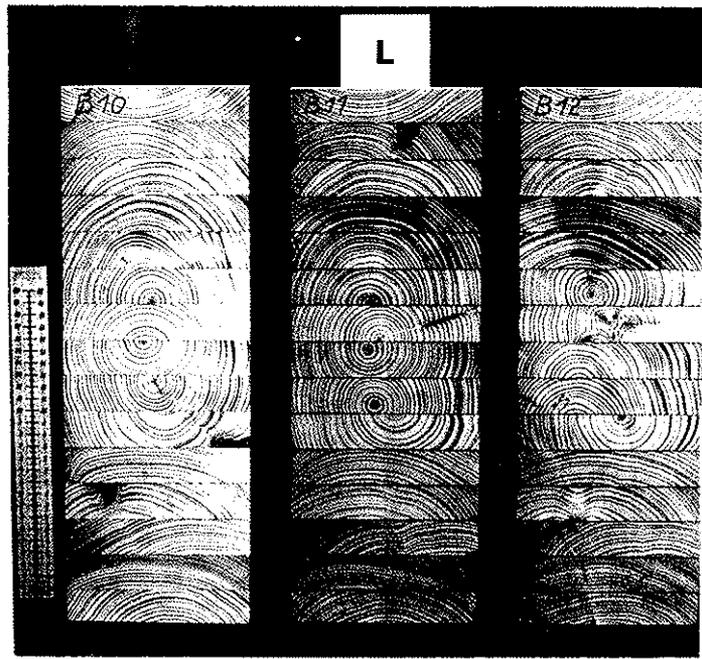
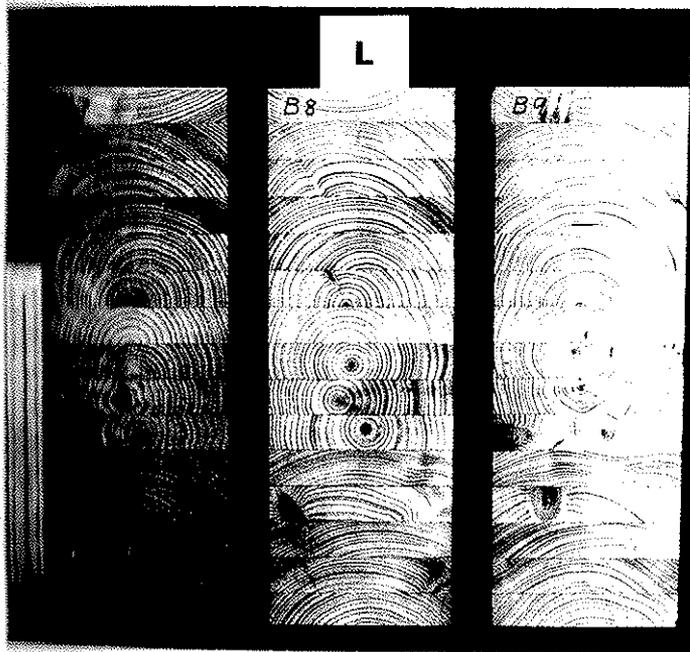
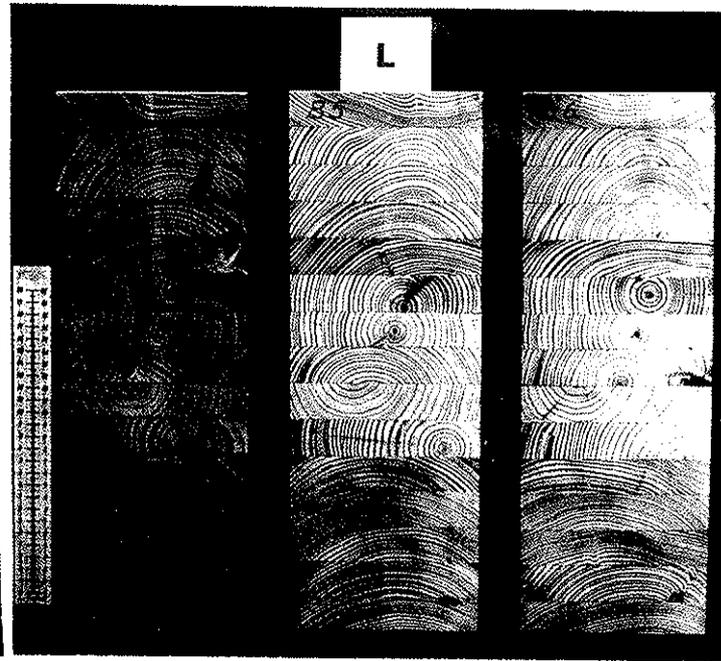
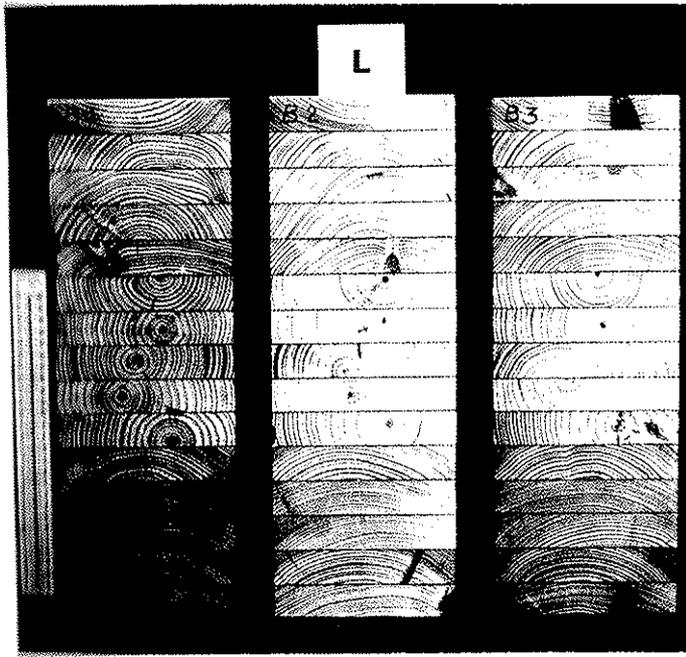


Bild 4: Querschnitte der Probekörper B1 bis B12

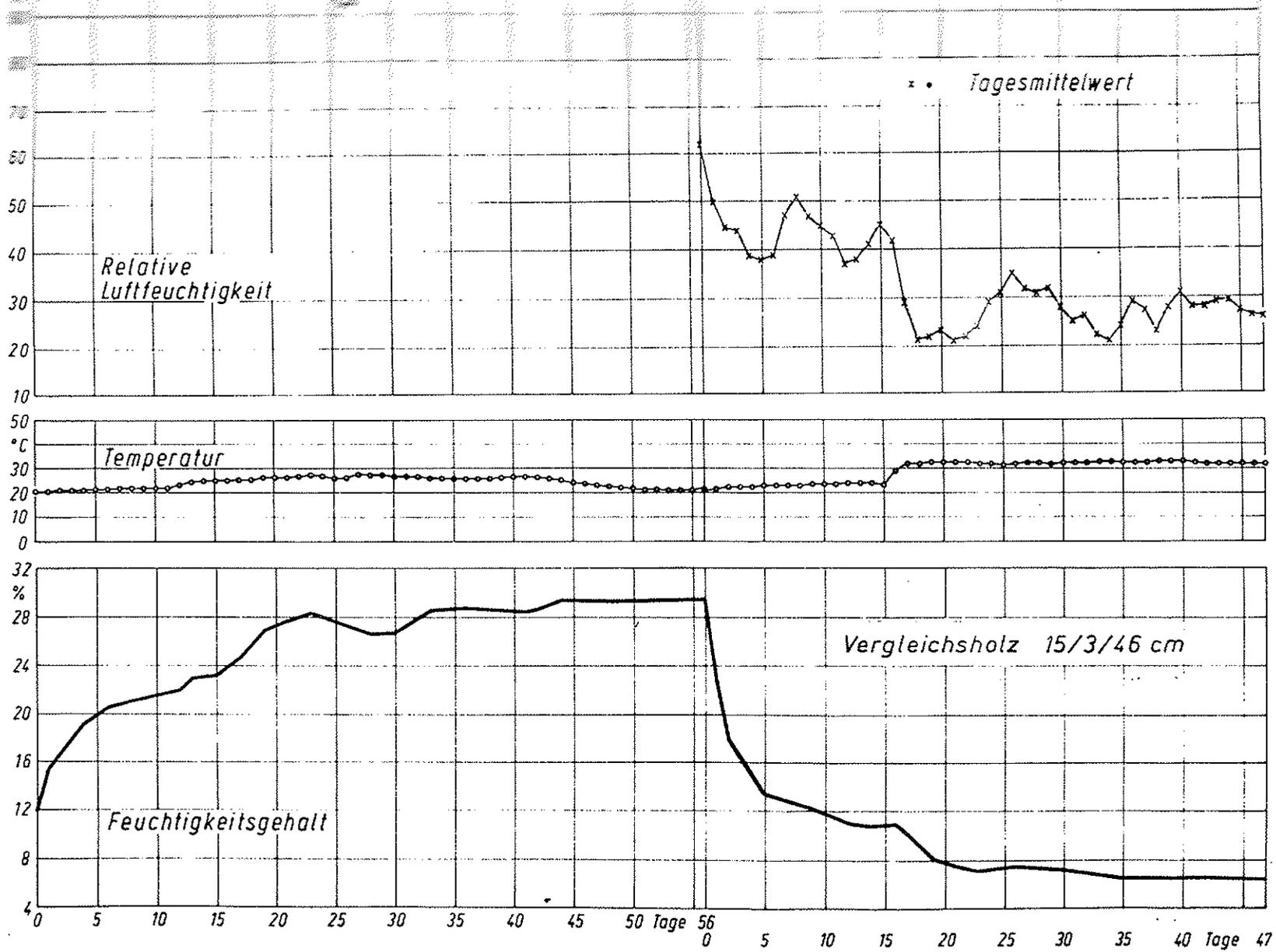


Bild 5: Klima- und Feuchtigkeitsverlauf des Vergleichsholzes beim 3. Versuch

Ansicht eines Versuchskörpers

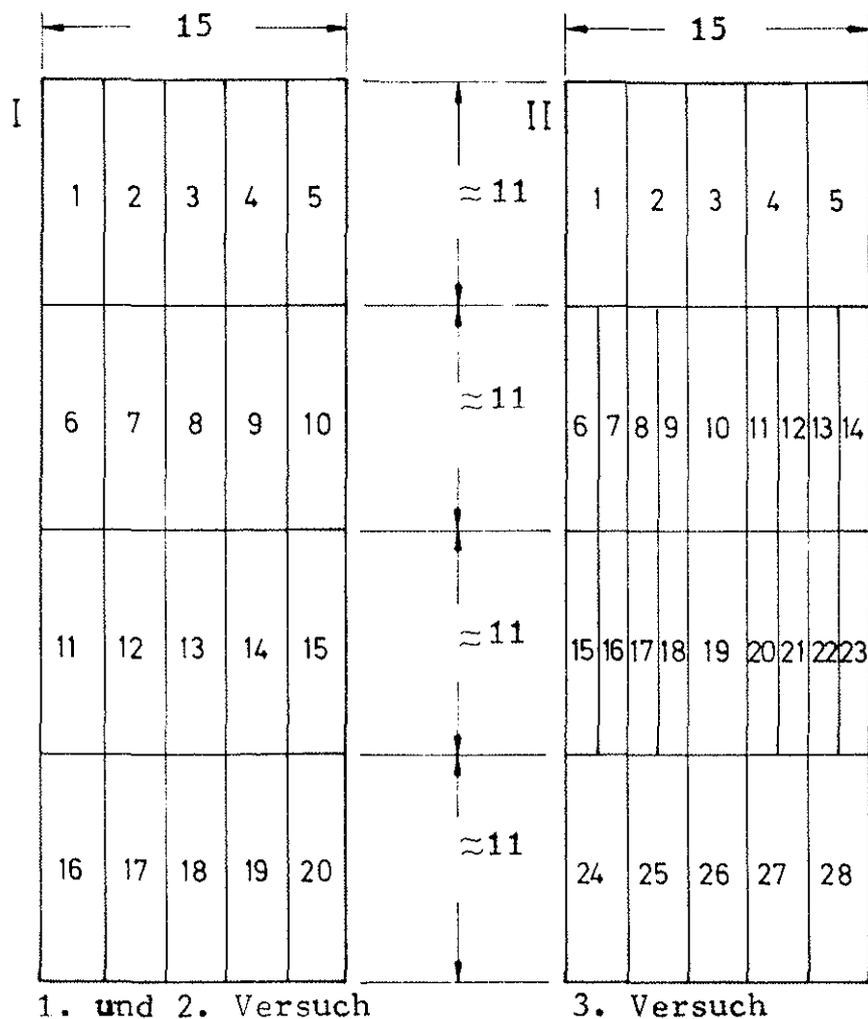
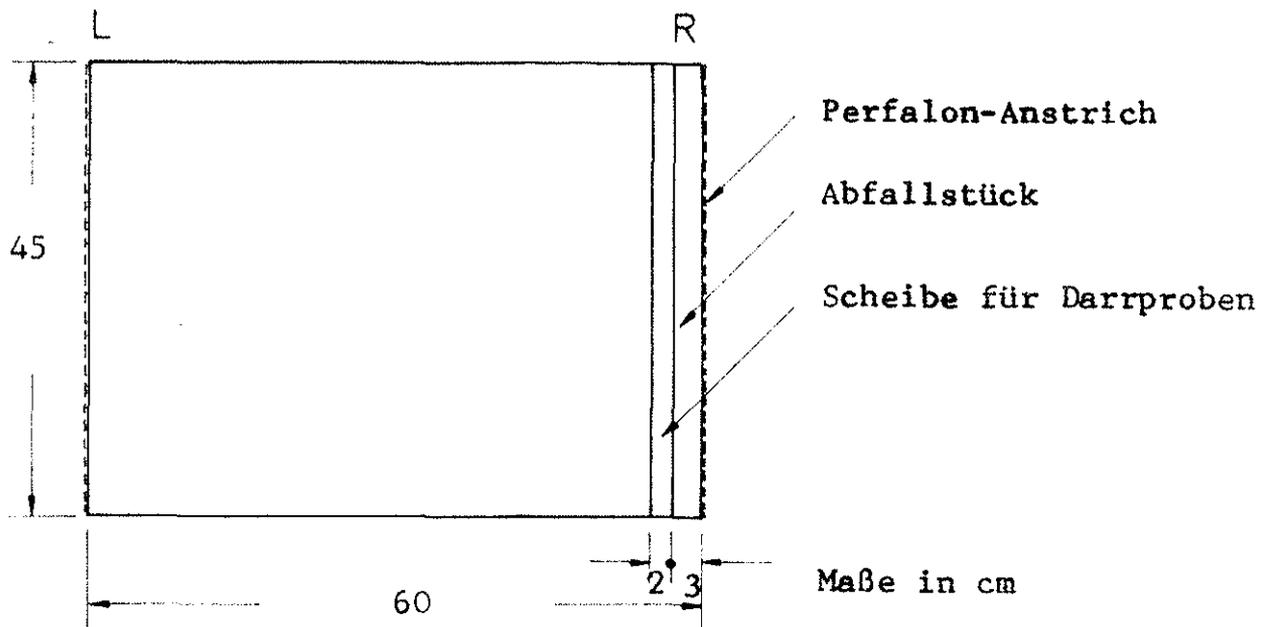


Bild 6 : Ansicht eines Versuchskörpers und Aufteilung der Brettschichtträgerscheiben in Darrproben

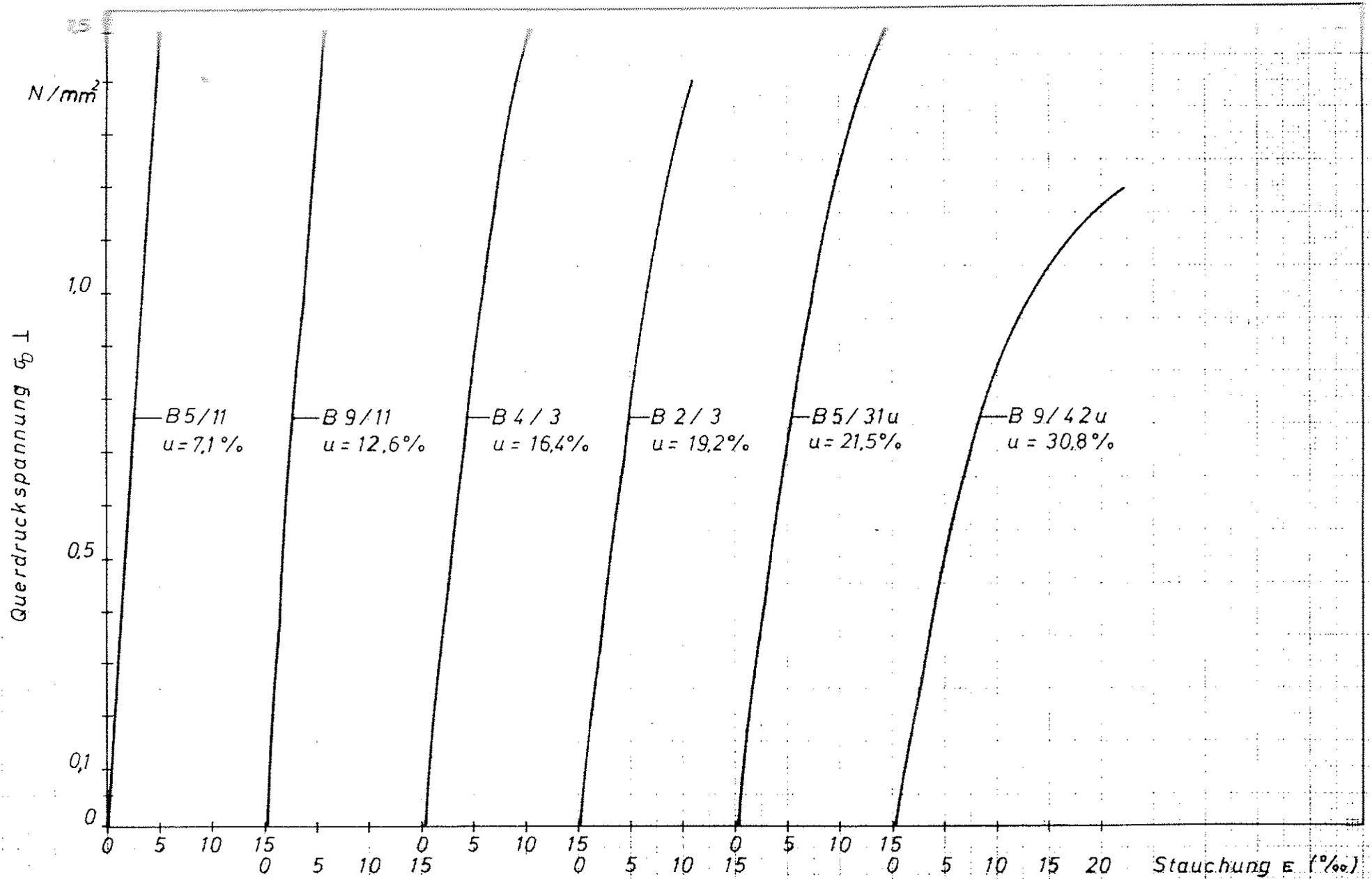


Bild 8: σ - ϵ -Diagramme von Br 'tschichtholz bei Druck quer zur Faser.

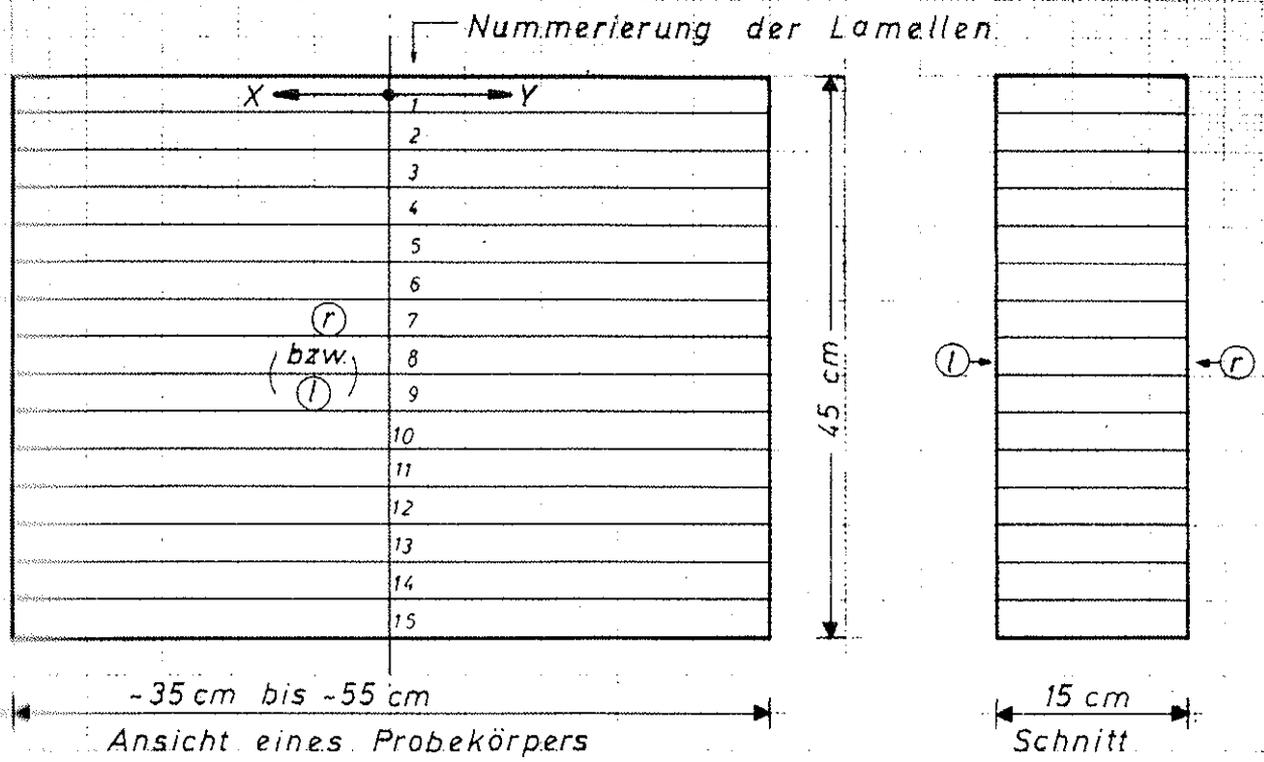


Bild 7: Schema zur Rissebeobachtung

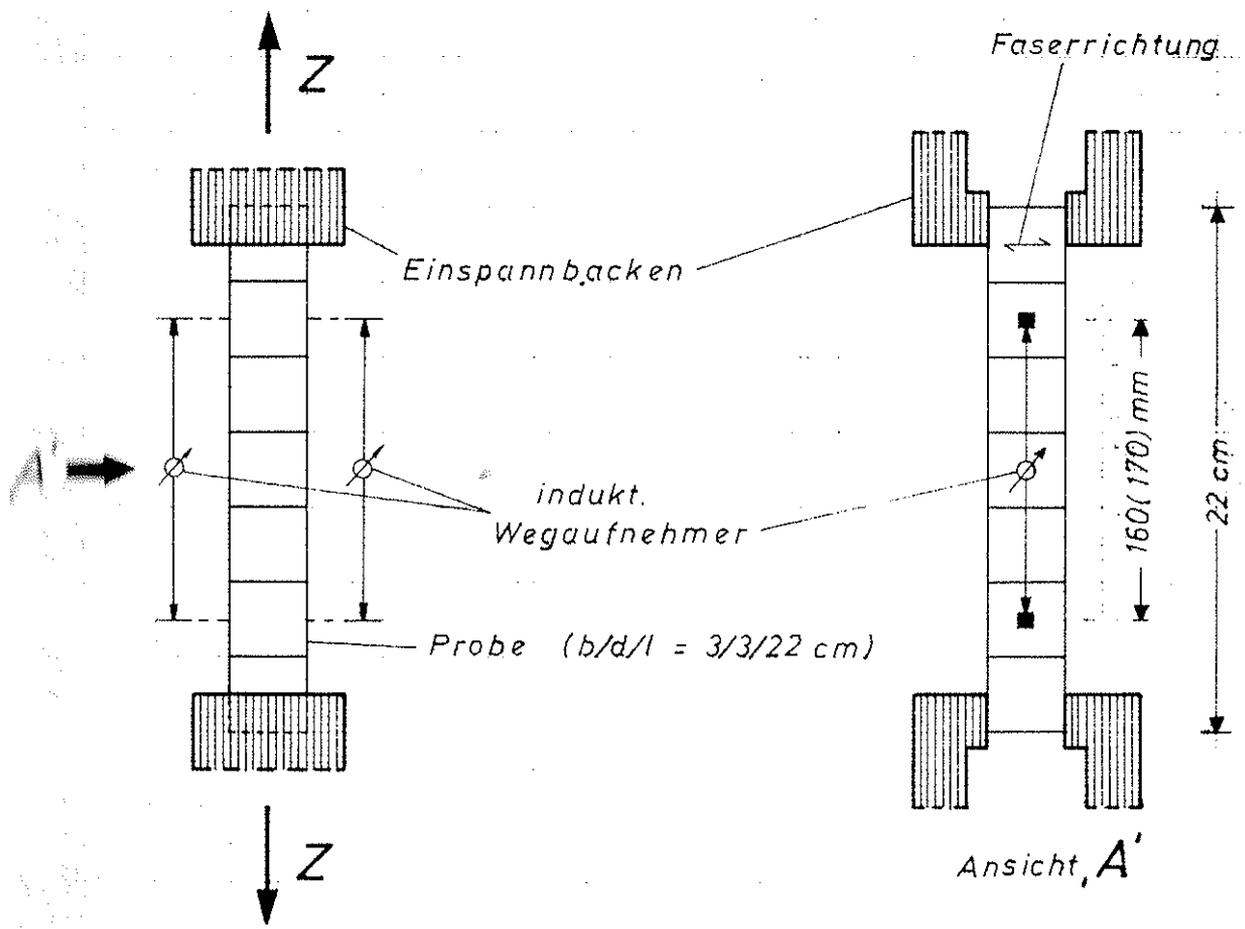


Bild 9: Versuchsaufbau der Querkzugversuche

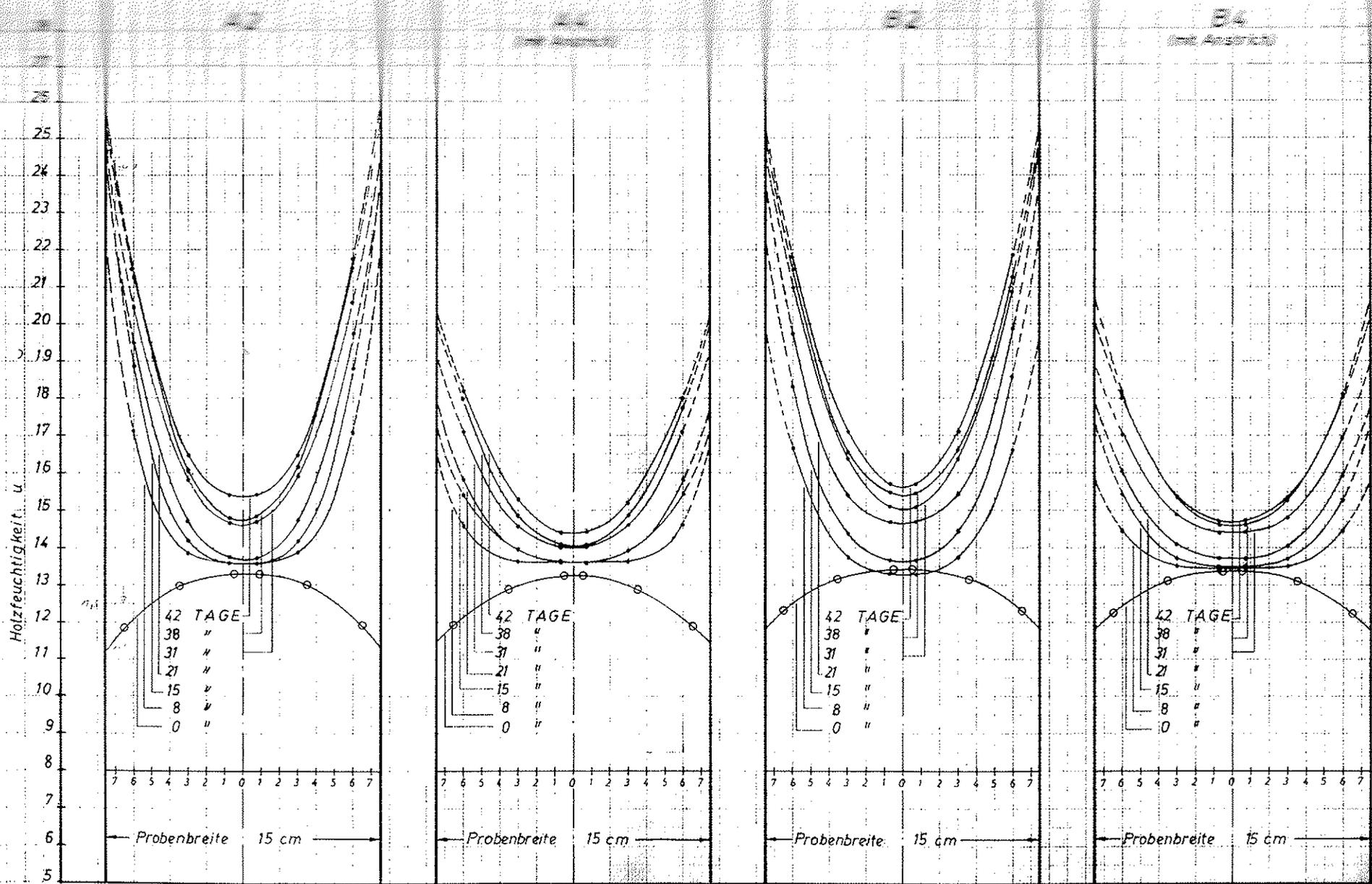


Bild 10: Feuchtigkeitsverteilung in den Probekörpern A2.A4.B2.B4 beim 1. Versuch

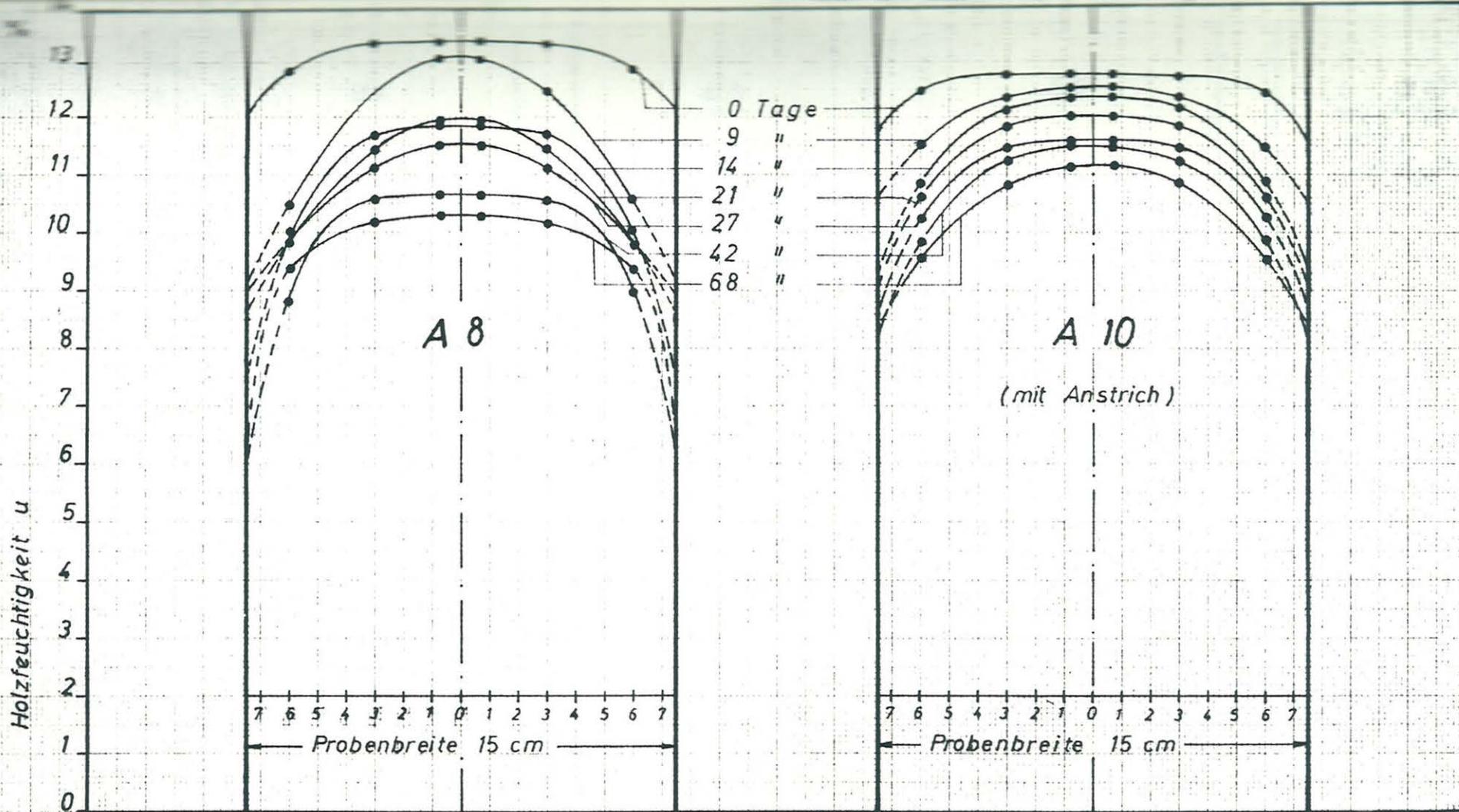


Bild 11: Feuchtigkeitsverteilung in den Probekörpern A8 und A10 im Trockenklima beim 2. Versuch

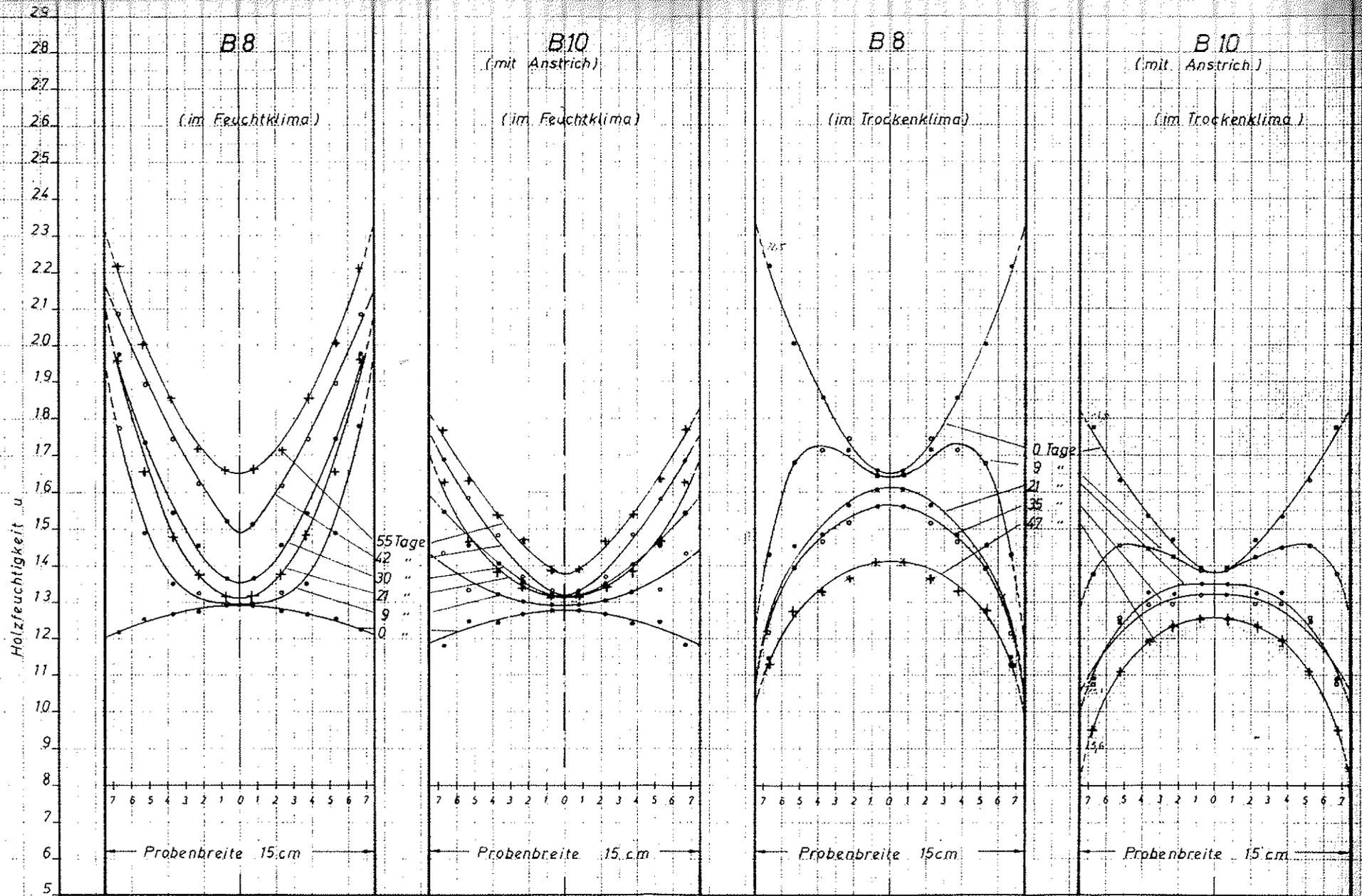
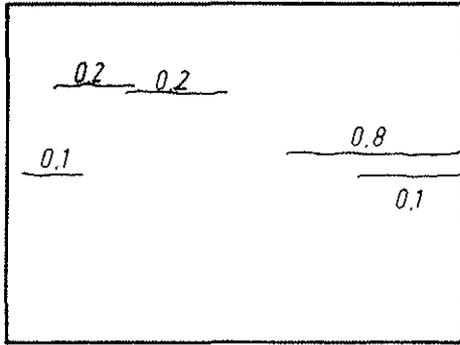


Bild 12: Feuchtigkeitsverteilung in den Probekörpern B8 und B10 bei Lagerung im Feuchtklima (im Mittel 24°C / im Mittel 96,4% rel. Luftfeuchtigkeit) und anschließend im Trockenklima beim 3. Versuch.

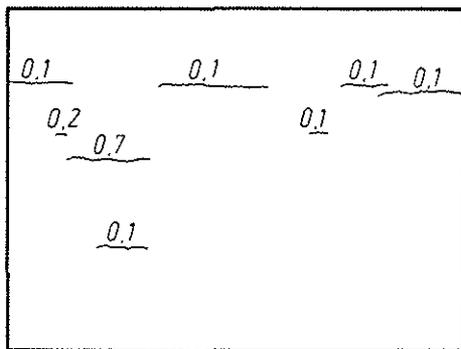
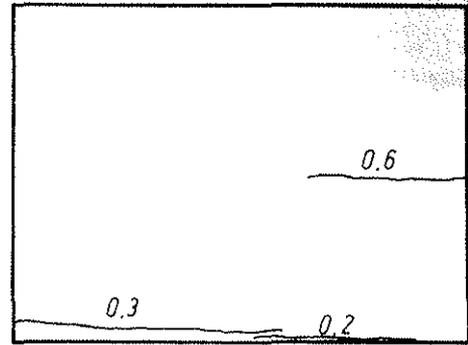
Linke Seitenfläche



(A1)

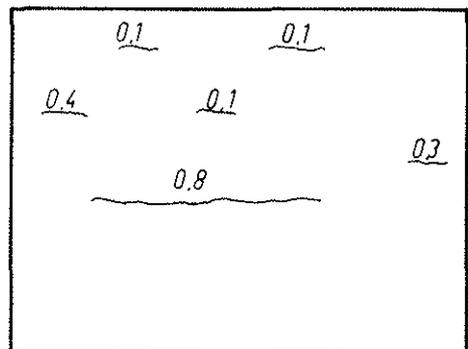
1. Versuch

Rechte Seitenfläche

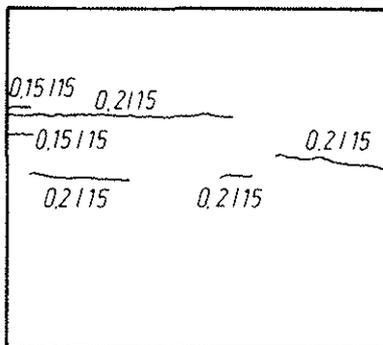


(B1)

1. Versuch

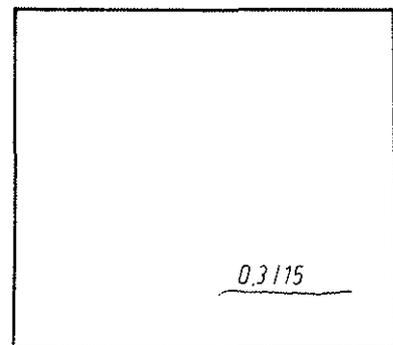


A1, B1: Entstehung der Risse 15 bis 20 Tage nach Beginn der Rücktrocknung



(A7)

2. Versuch



M 1:10

Es bedeutet:

0.2/15: Rißbreite 0.2 mm / Entstehung des Risses 15 Tage nach Beginn der Trocknung

Bild 13: Rißbildung beim 1. und 2. Versuch an den Versuchskörpern A1, B1, A7

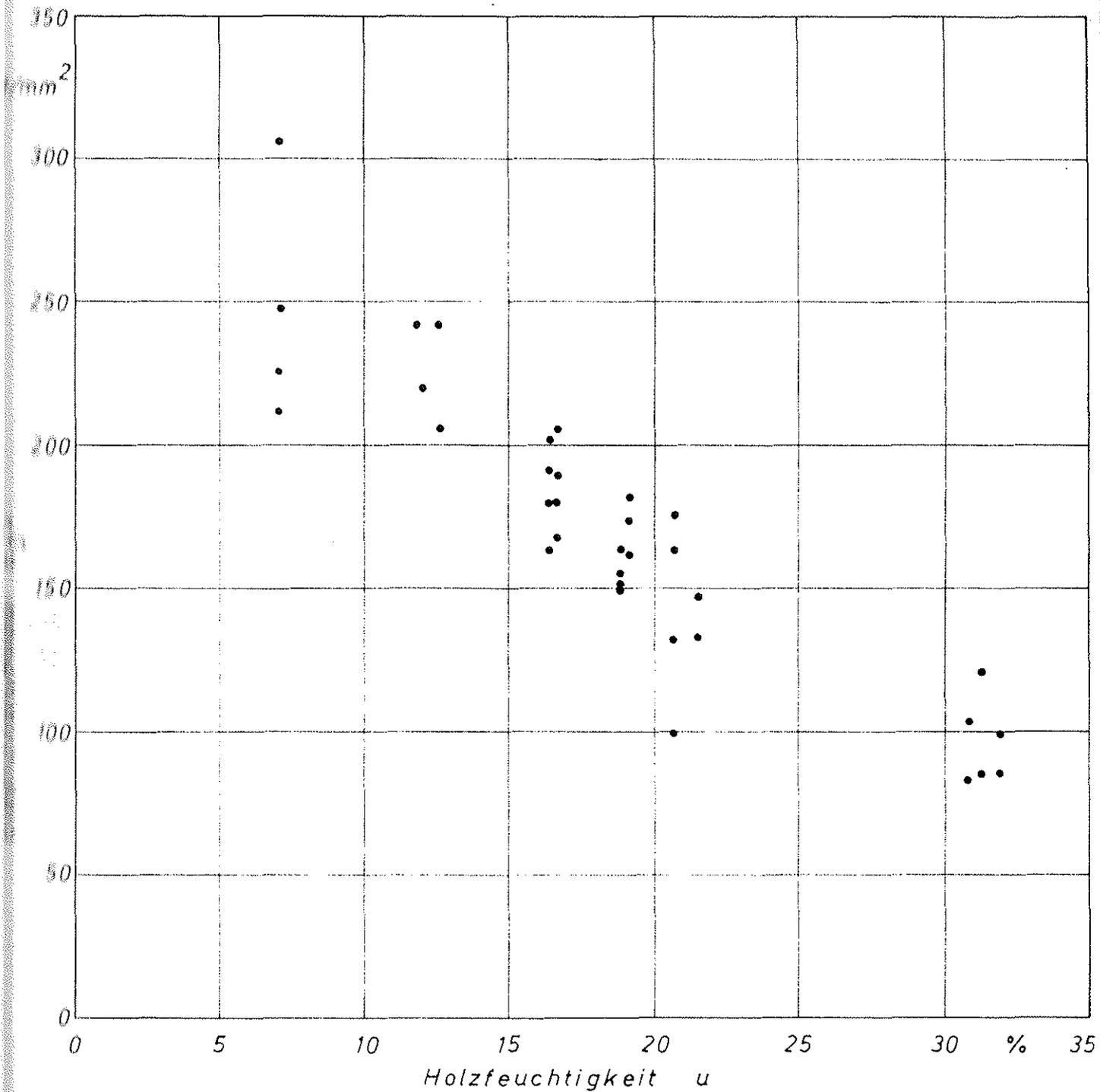
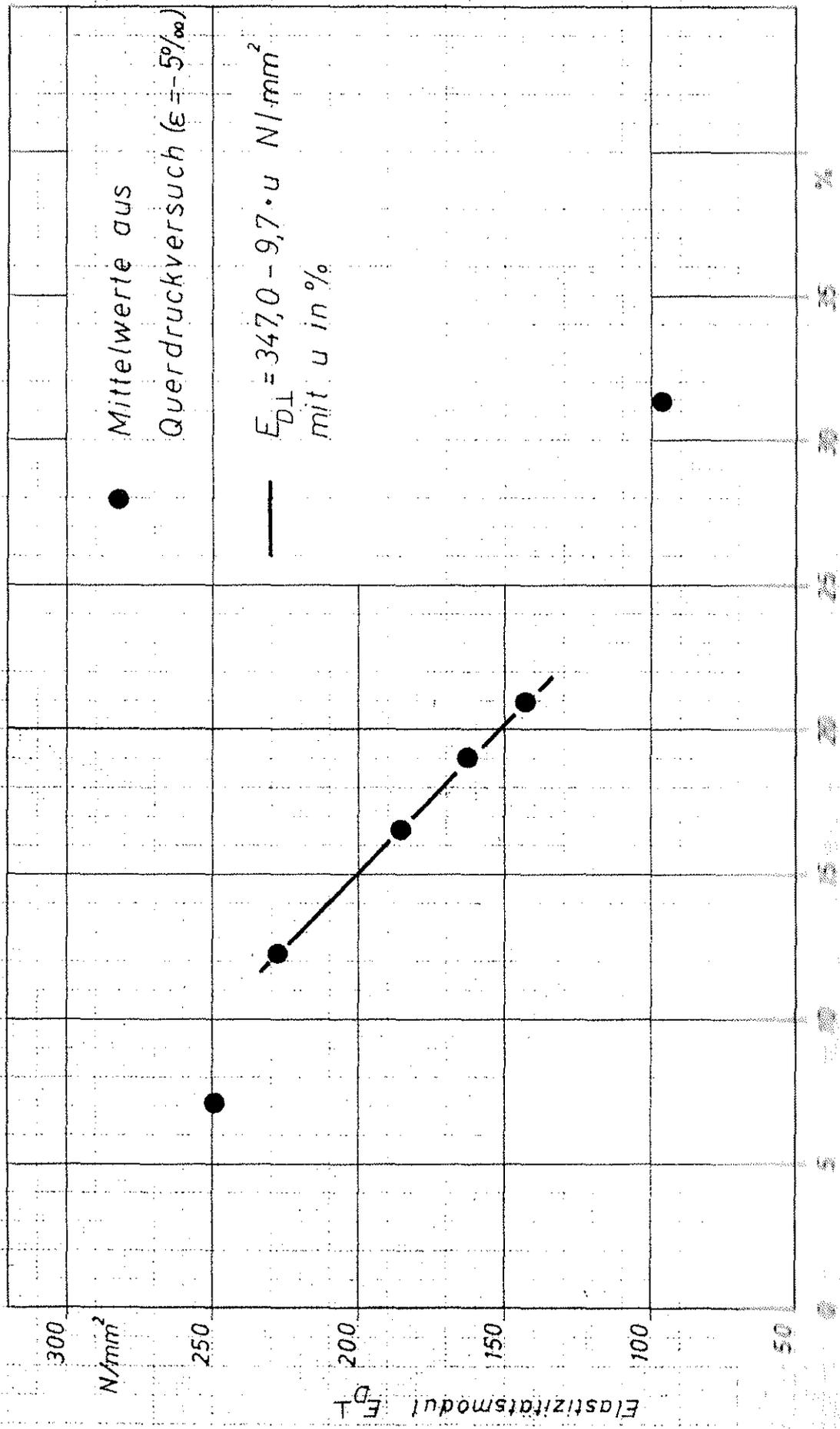


Bild 14: Elastizitätsmodul $E_{D\perp}$ in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit aus $\epsilon = -5\%$ (Alle Einzelwerte der Querdruckversuche)



Abh. des Elastizitätsmoduls E_{D1} von der Luftfeuchtigkeit
(Mittelwerte)

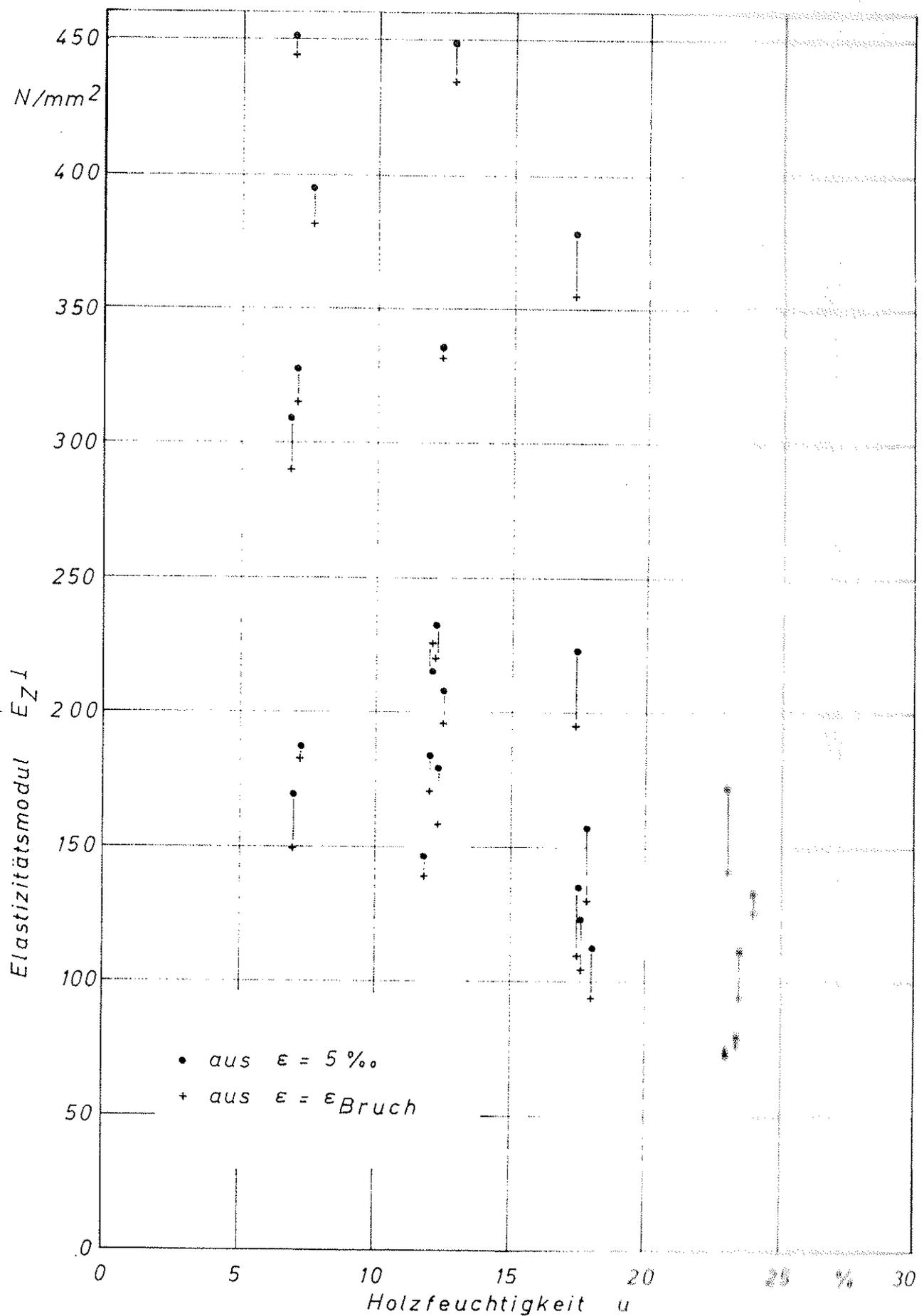


Bild 16: Elastizitätsmodul $E_{Z\perp}$ in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit (Alle Einzelwerte der Querkzugversuche)

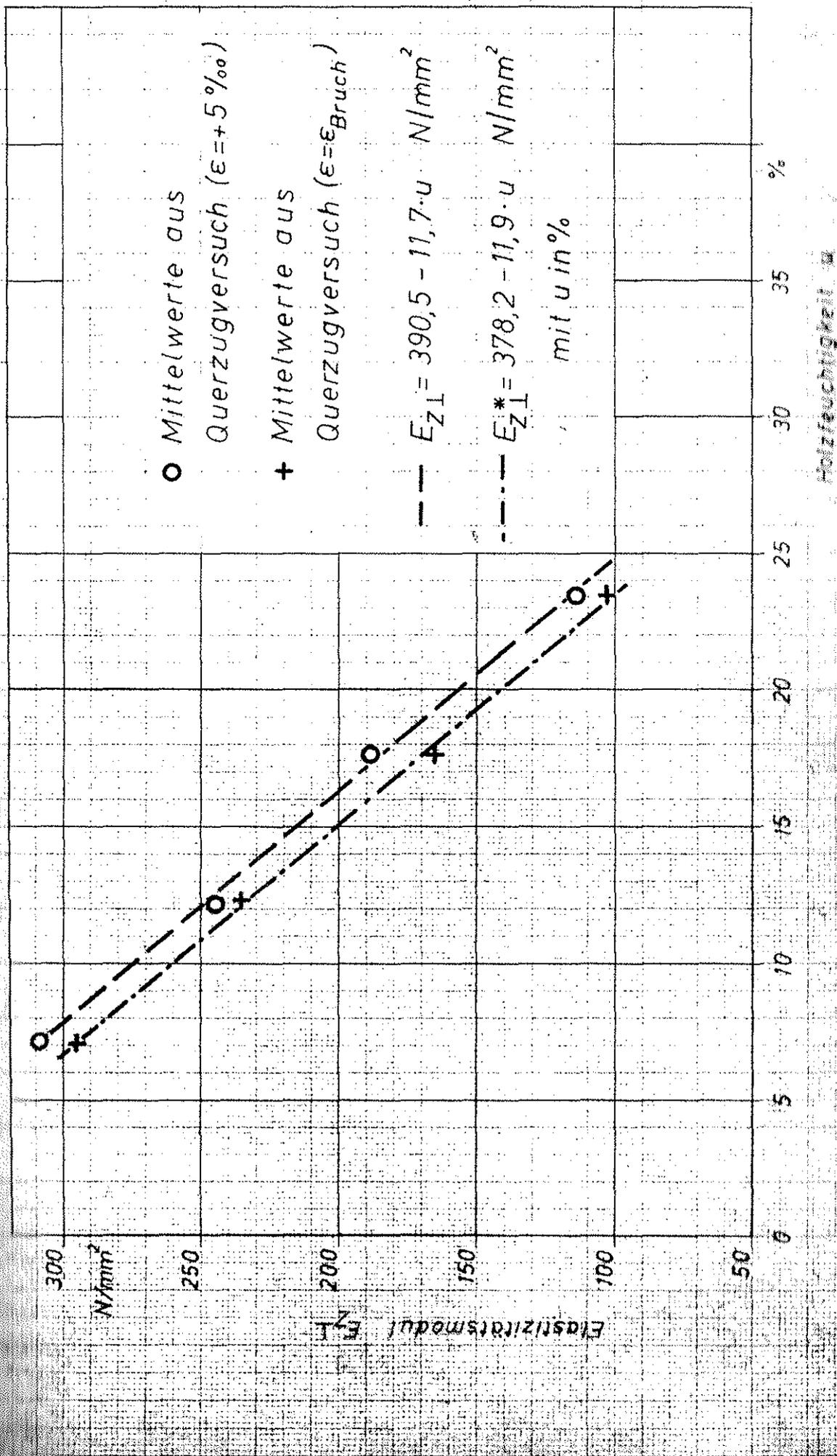


Bild 7. Elastizitätsmodul E_{z1} in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit
 (Mittelwerte)

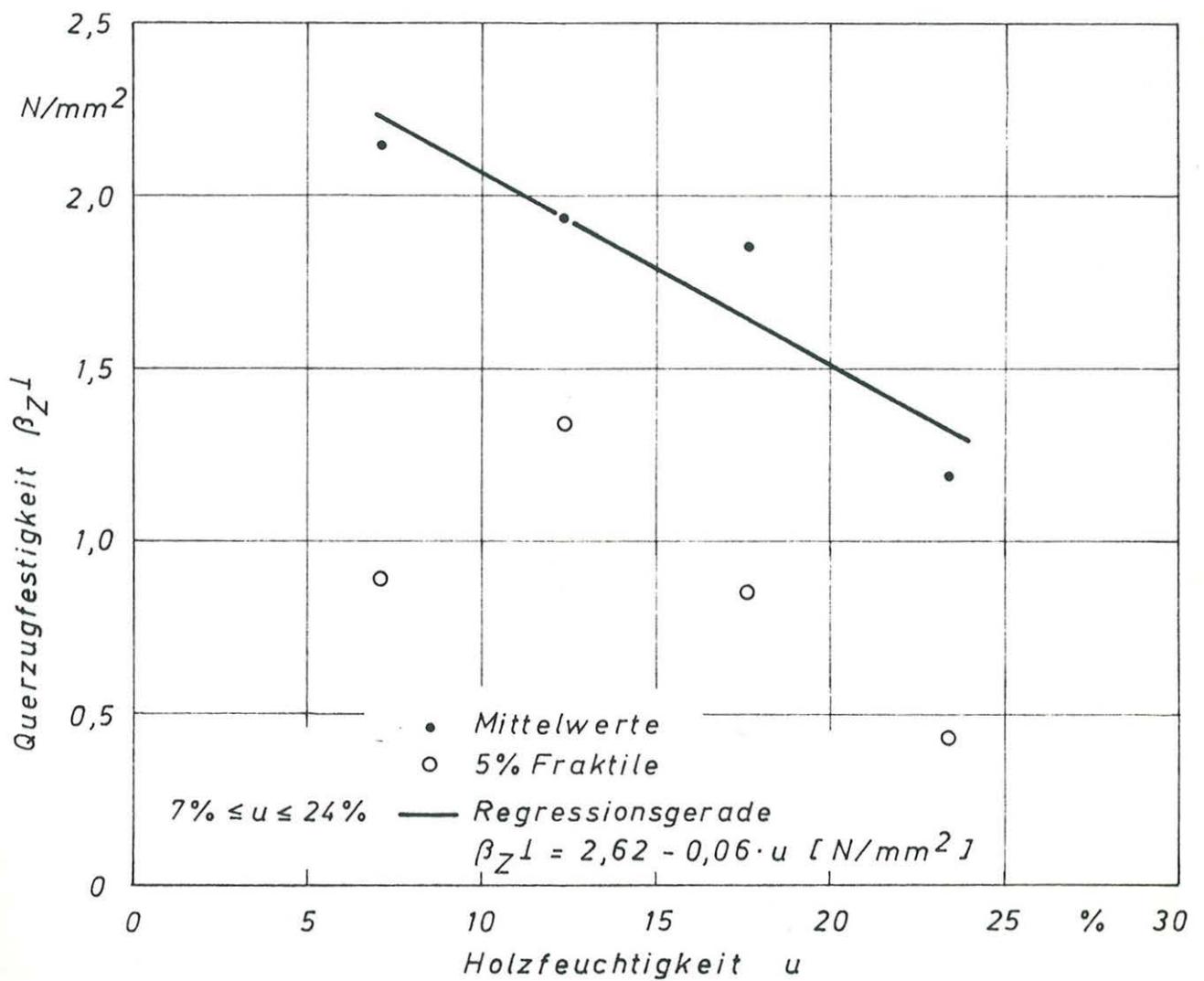


Bild 18: Querzugfestigkeit von Brettschicht-
 holzproben 3×3 cm in Abhängigkeit von
 der Holzfeuchtigkeit

Probekörper A5

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12

• Meßwerte

— Regressionsgerade
für $10\% \leq u \leq 24\%$
 $Q = -0,302 + 0,244u$

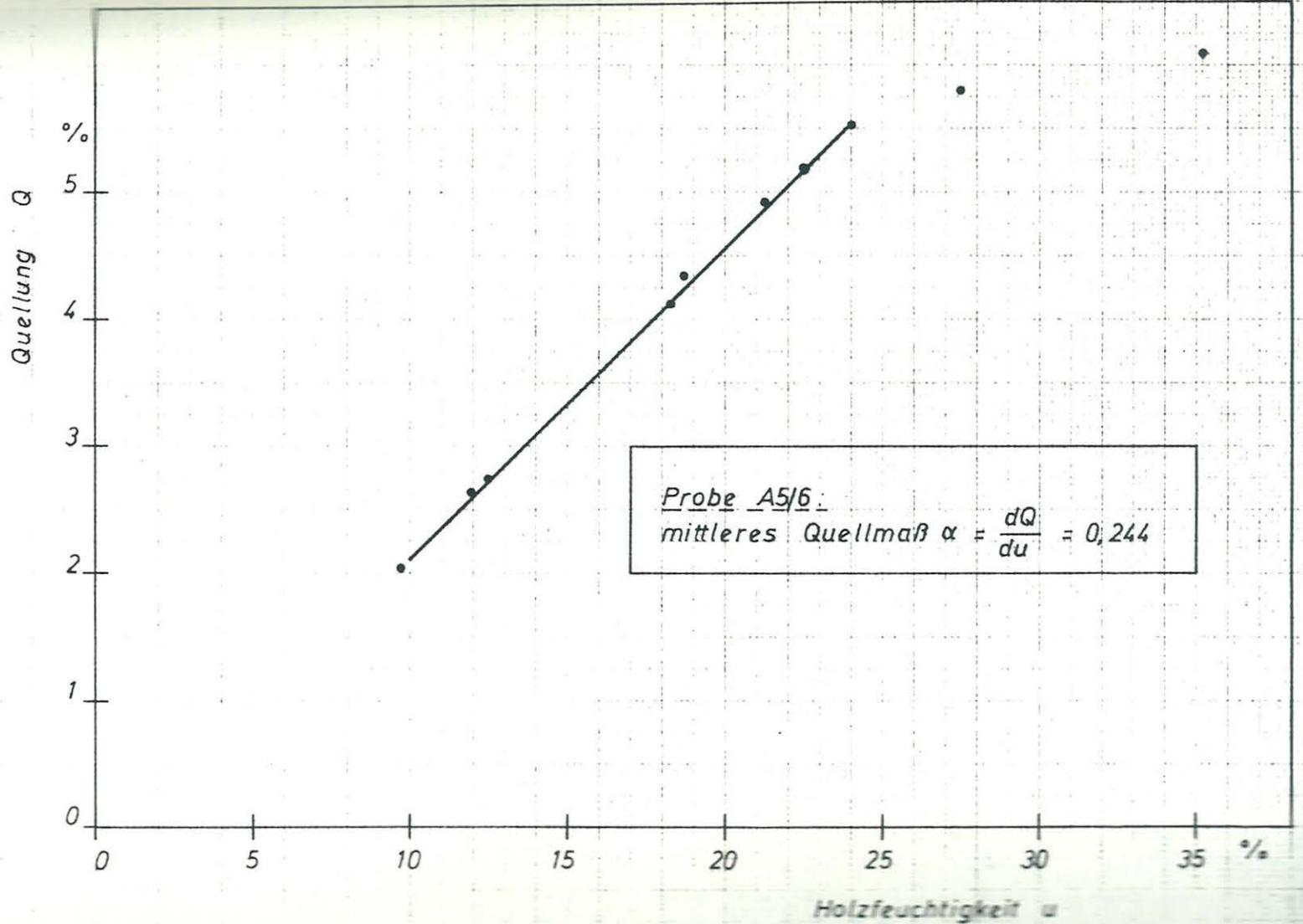


Bild 19: Quellung der Probe A5/6 in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit u.

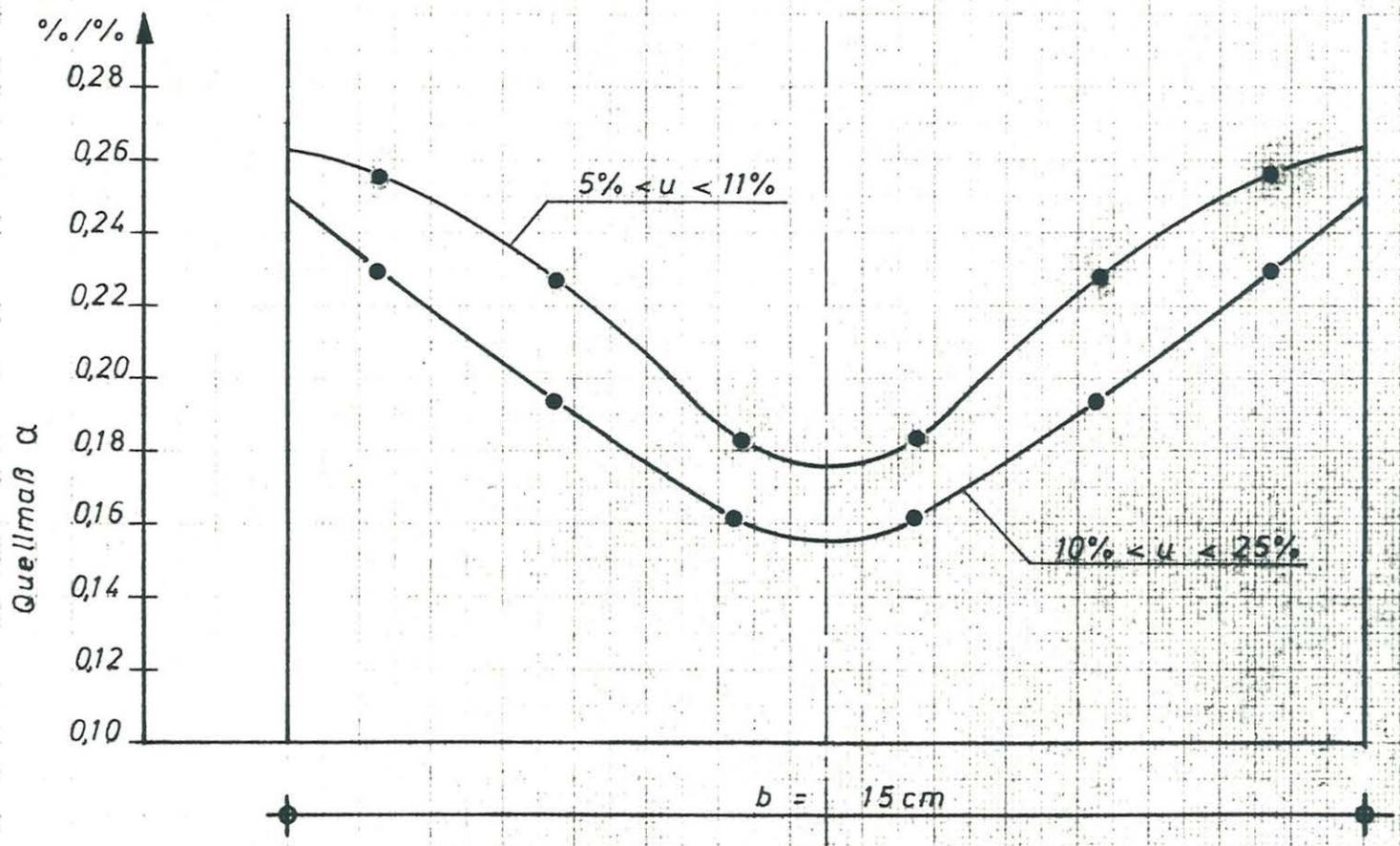
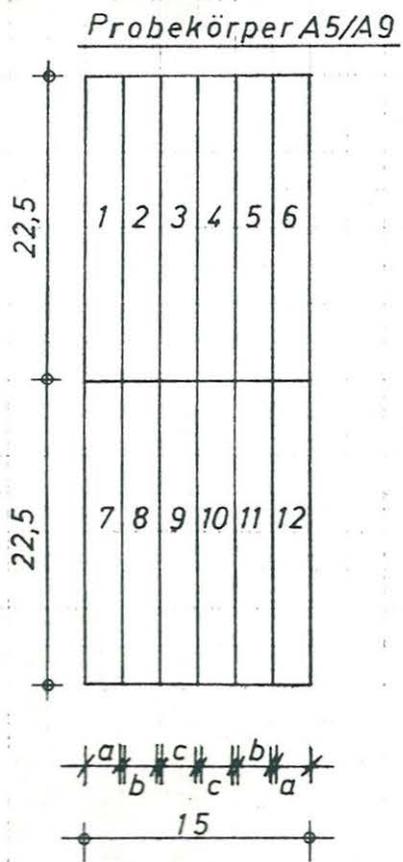


Bild 20: Verteilung der mittleren Quellmaße von Brettschichtholz senkrecht zu den Leimfugen.

Probekörper : A1/A2 u. A3/A4

Versuch : 1

Dauer der Trocknung
bzw. Rücktrocknung : 15 bis 20 Tage

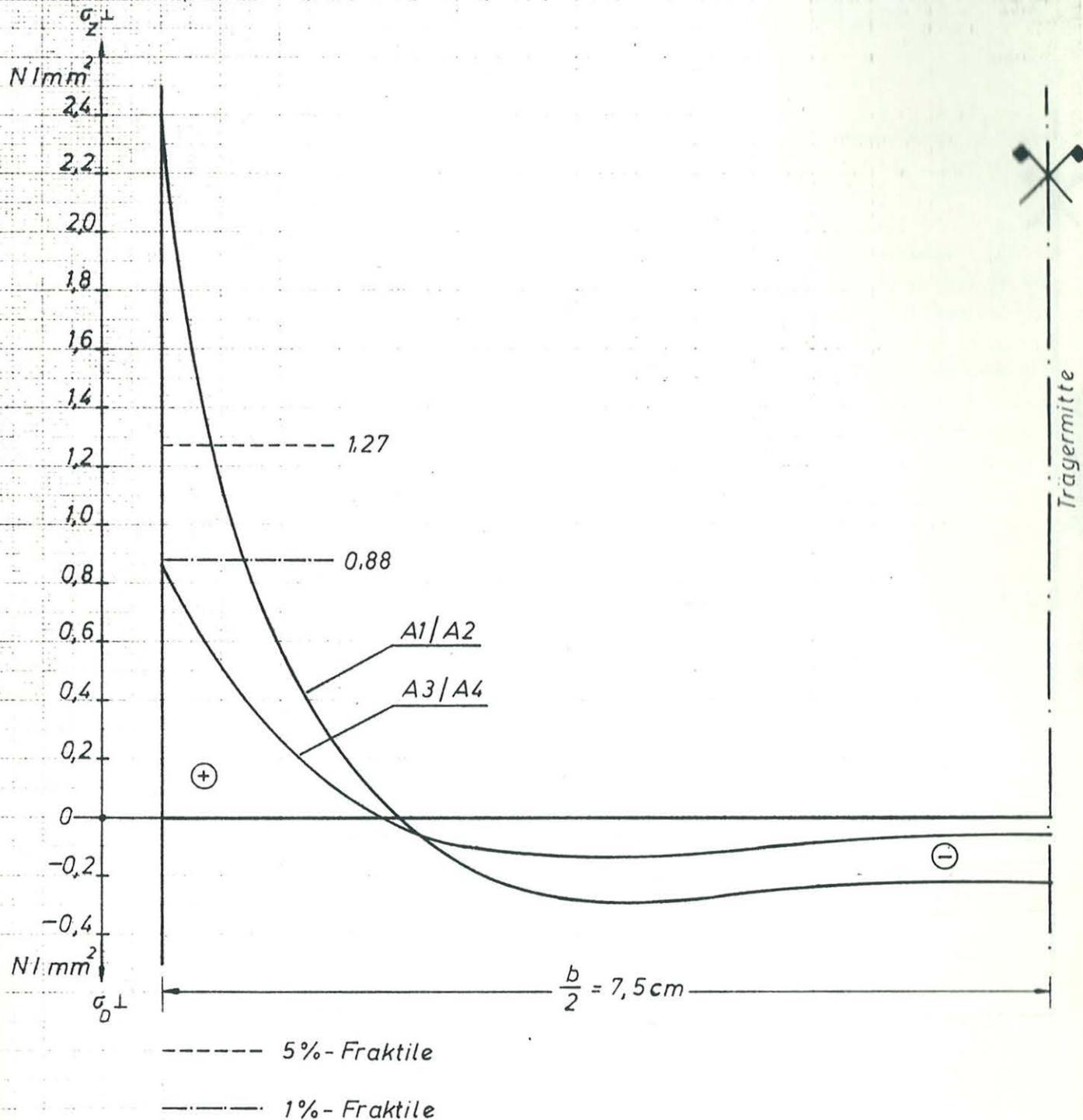


Bild 21: Eigenspannungen in halber Querschnittshöhe der Brettschichtträger infolge Feuchtigkeitsänderung beim 1. Versuch

Probekörper B1/B2 u. B3/B4

Versuch : 1

Dauer der Trocknung
bzw. Rücktrocknung : 15 bis 20 Tage

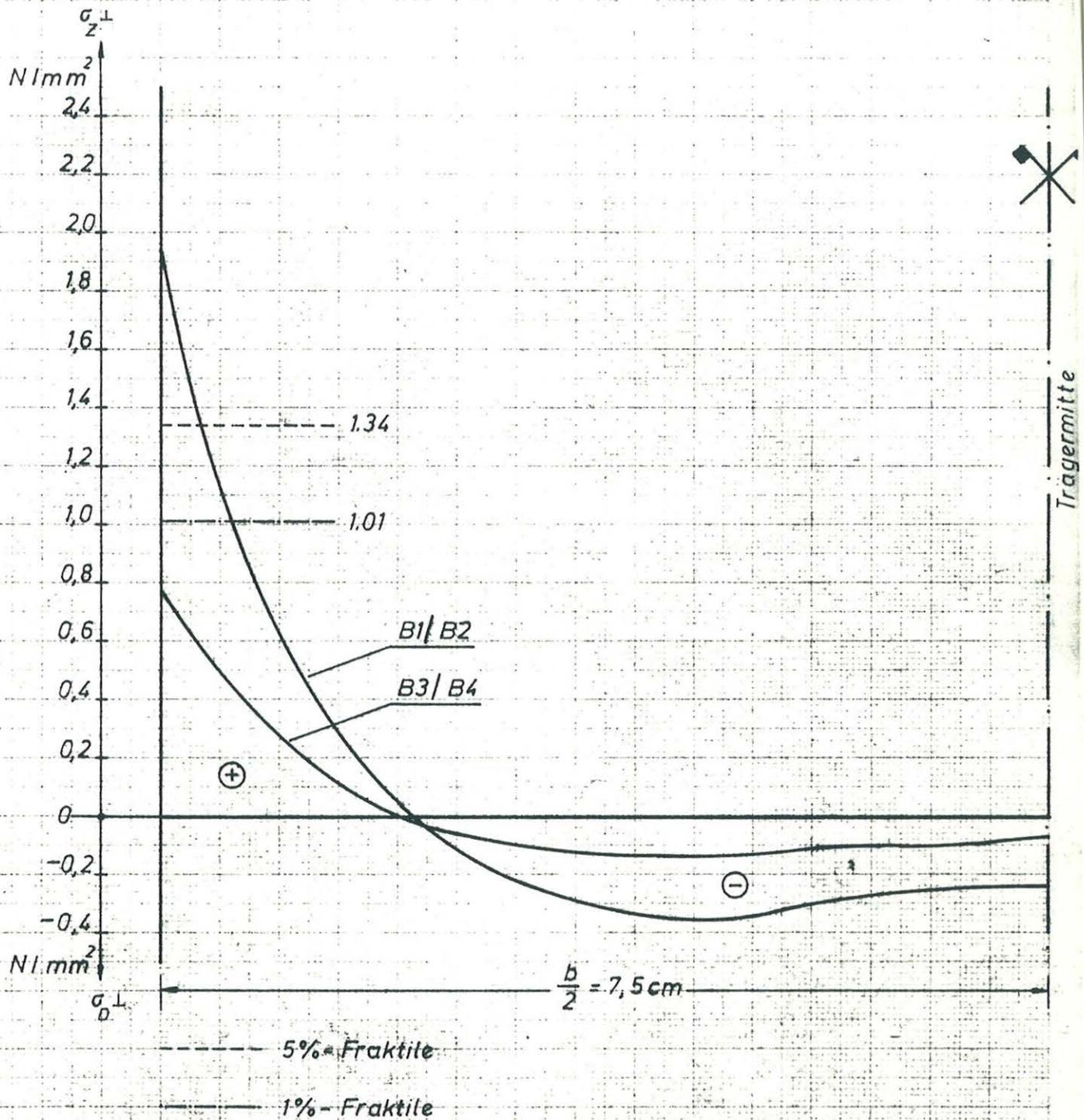


Bild 22: Eigenspannungen in halber Querschnittshöhe der Brettschichtträger infolge Feuchtigkeitsänderung beim 1. Versuch

Probekörper A7/A8 u. A9/A10

Versuch 2

Dauer der Trocknung
bzw. Rücktrocknung: 14 Tage

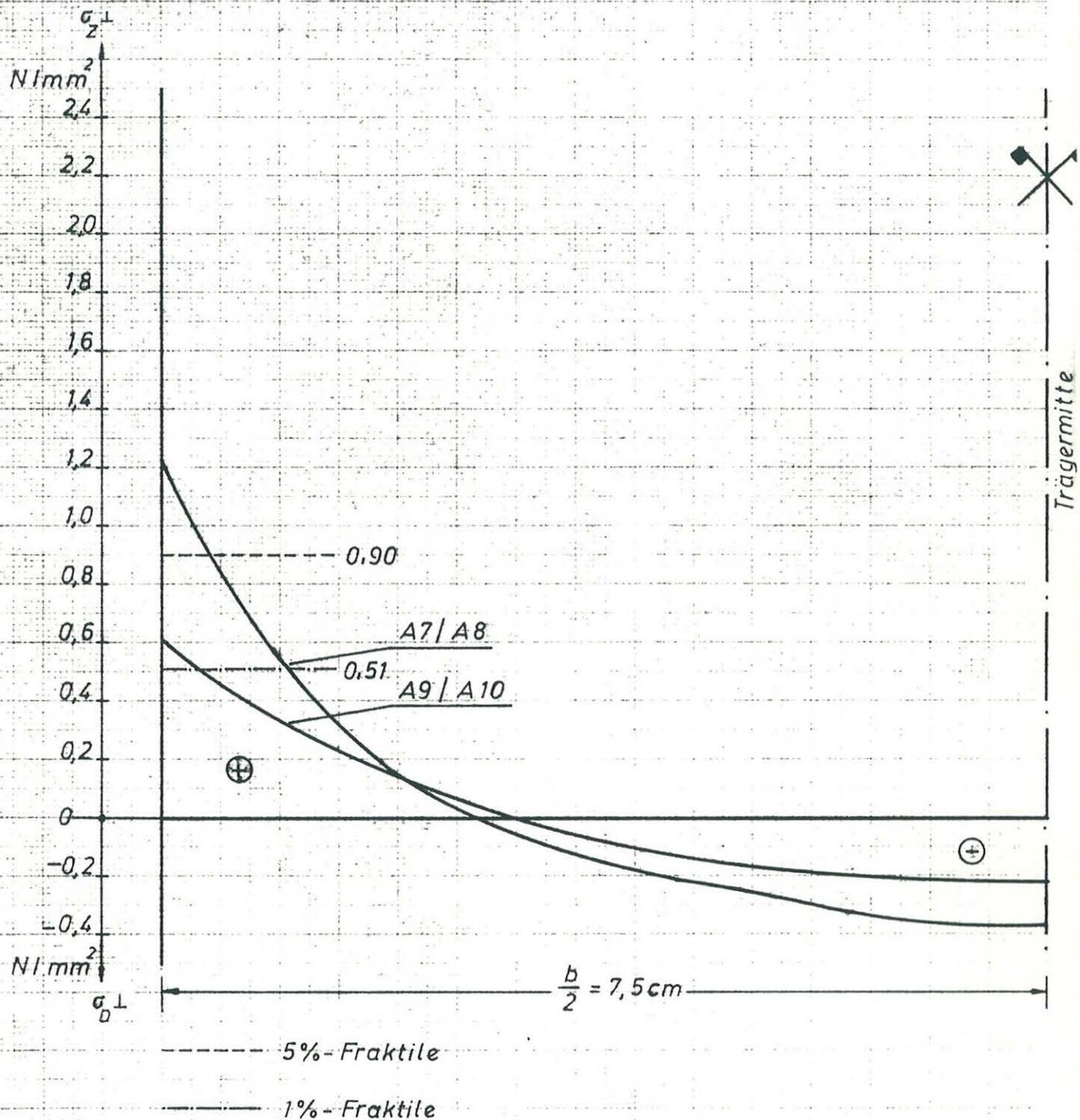


Bild 23: Eigenspannungen in halber Querschnittshöhe der Brettschichtträger infolge Feuchtigkeitsänderung beim 2. Versuch

Probekörper B7/B8 u. B9/B10

Versuch 3

Dauer der Trocknung bzw. Rücktrocknung : 18 Tage

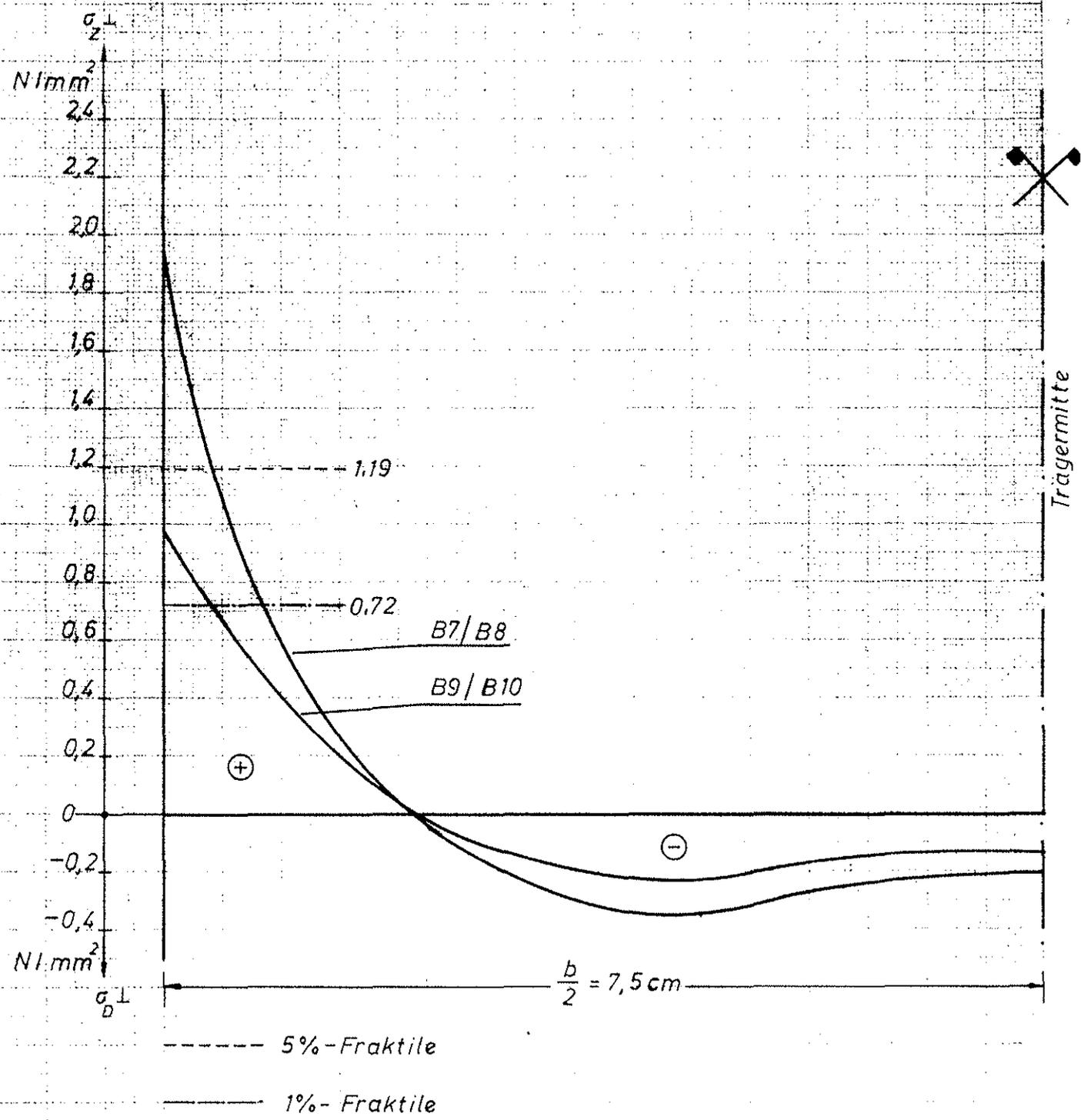


Bild 24: Eigenspannungen in halber Querschnittshöhe der Brett-schichtträger infolge Feuchtigkeitsänderung beim 3. Versuch

Tabelle 1: Daten zur Herstellung der verleimten Probekörper

Probekörper Nr.	Tag der Verleimung	Raumklima beim Verleimen u. Pressen		Leimart 1 = Kauresin 440 2 = Kaurit 270	Leimauftrag [g/m ² Fuge]	Zeitdauer zw. Leimauftrag u. Aufbringen des Preßdruckes [min]	Leimaustritt	Preßdauer [Stunden]	mittlere Holzfeuch- tigkeit [%]	maximale Feuchte- differenz zw. d. Lamellen Δ u [%]
		Temperatur [°C]	rel. Luftfeucht. [%]							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A1, A2	26.1.76	20 - 21	53 - 49	1	500	50	gleichmäßig	8	11,7 ^{+1,5} -1,0	2,5
A3, A4	26.1.76	20 - 21	53 - 49	1	500	30	gleichmäßig	8	12,3 ^{+1,4} -1,5	2,9
A5, A6	20.1.76	19 - 21	51 - 49	2	500	35	stark (außer Fugen 12-13; 13-14)	7	11,8 ^{+0,9} -2,0	2,9
A7, A8	21.1.76	20	51 - 50	2	450	40	gering	7	10,9 ^{+1,9} -1,3	3,2
A9, A10	21.1.76	20	51 - 50	2	450	20	gering	7	10,9 ^{+1,9} -1,3	3,2
A11, A12	19.1.76	19 - 20	52 - 50	1	510	45	gering	8	10,9 ^{+1,9} -1,3	3,2
B1, B2	27.1.76	19 - 17	49 - 47	1	460	50	gleichmäßig	8	12,3 ^{+0,9} -1,8	2,7
B3, B4	27.1.76	19 - 17	49 - 47	1	460	30	gleichmäßig	8	11,8 ^{+1,1} -0,8	1,9
B5, B6	20.1.76	19 - 21	51 - 49	2	500	15	gering	7	11,8 ^{+1,1} -1,1	2,2
B7, B8	22.1.76	20 - 21	52 - 55	2	480	50	reichlich	7	10,6 ^{+1,7} -0,9	2,6
B9, B10	22.1.76	20 - 21	52 - 55	2	480	35	reichlich	7	10,6 ^{+1,7} -0,9	2,6
B11, B12	19.1.76	19 - 20	52 - 50	1	510	25	gering	8	10,6 ^{+1,7} -0,9	2,6

Tabelle 2: Daten zur Durchführung der Klimalagerungsversuche

Versuch	Klima	Lagerungs- dauer der Versuchs- körper in 20° / 65 % [Tage]	Versuchs- dauer [Tage]	Probekörper		Vor Versuchsbeginn		
				für Darr- proben	für Rissebeob- achtung	Behandlung der Oberflächen (außer Stirn- flächen)	Behandlung der Stirnflächen	
1. Versuch F	Feucht- klima ~ 95% rel. Luftf. 20-25°C	20	F 42	A2		-	Zweifacher PERFALON- Anstrich	
				A4		WOLMANOL +)		
				B2		-		
				B4		WOLMANOL +)		
					A1	-		
					A3	WOLMANOL +)		
					B1	-		
	B3	WOLMANOL +)						
2. Versuch T	Trocken- klima ~ 19% +32°C	34	T 68	A8		-		
				A10		WOLMANOL +)		
					A7	-		
					A9	WOLMANOL +)		
3. Versuch F T	Feucht- klima anschlie- ßend Trocken- klima (siehe Bild 5)	139	F 55	B8		-		
				B10		WOLMANOL +)		
					B7	-		
			T 47		B9	WOLMANOL +)		
				nur bei T {	B11	B11		-
					B12	B12		-

+) Einfacher Anstrich mit WOLMANOL 249 (130 g/m²)

Tabelle 3: Mittelwerte und Standardabweichung des Elastizitäts- bzw. Verformungsmoduls bei Querdruckbeanspruchung

Mittlere Holzfeuchtigkeit [%]	Probenanzahl	$\varepsilon = -5 \text{ ‰}$		$\varepsilon \approx \varepsilon_{\text{prop}}$	$\varepsilon = - 10\text{‰}$	$\varepsilon = - 15 \text{ ‰}$
		Mittelwert E_{D1} [N/mm ²]	Standardabweichung [N/mm ²]	Mittelwert E_{D1} [N/mm ²]	Mittelwert V_{D1} [N/mm ²]	Mittelwert V_{D1} [N/mm ²]
7,1	4	248,75	40,9	$\approx 228,5$	217,5	170,9
12,3	4	227,5	17,7	$\approx 227,0$	197,75	-
16,55	8	185,25	15,0	$\approx 170,6$	155,63	-
19,0	7	162,86	11,7	$\approx 156,0$	135,0	-
21,0	6	142,33	26,8	$\approx 126,8$	121,67	100,0
31,3	6	97,0	14,8	$\approx 89,0$	83,33	68,83

Tabelle 4: Mittelwerte und Standardabweichung des Elastizitätsmoduls $E_{Z\perp}$ bei Querkzugbeanspruchung

Mittlere Holzfeuchtigkeit [%]	Probenanzahl	$\epsilon = 5 \text{ ‰}$		$\epsilon = \epsilon_{\text{Bruch}}$	
		Mittelwert $E_{Z\perp}$ [N/mm ²]	Standardabweichung [N/mm ²]	Mittelwert $E_{Z\perp}$ [N/mm ²]	Standardabweichung [N/mm ²]
7,1	6	307,3	111,6	294,3	113,2
12,2	8	244,1	99,8	234,6	100,4
17,6	6	188,8	101,0	165,4	100,0
23,4	5	114,6	40,7	103,4	29,4

Tabelle 5: Auswertung der Bruchspannungen der Querkzugversuche

Mittlere Holzfeuchtigkeit [%]	Proben Anzahl	Mittelwert β_{Z1} [N/mm ²]	Standardabweichung [N/mm ²]	5%-Fraktile [N/mm ²]	Vertrauensbereich des Mittelwertes [N/mm ²]
7,1	7	2,15	0,66	0,90	$\pm 0,47$
12,3	8	1,94	0,32	1,34	$\pm 0,21$
17,6	6	1,86	0,52	0,85	$\pm 0,41$
23,4	6	1,19	0,39	0,43	$\pm 0,19$

Tabelle 6: Mittlere Quellmaße α von Brettschichtholz senkrecht zu den Leimfugen

Probekörper	Streifen	aus Messungen in den Holzfeuchtigkeitsbereichen	
		5% < u < 11% (Trocknung)	10% < u < 25% (Befeuchtung)
A5/A9	a	0,256	0,229
	b	0,228	0,194
	c	0,182	0,162
B5/B7/B9	a	0,259	0,247
	b	0,205	0,226
	c	0,156	0,176

Tabelle 7: Mittelwerte und Standardabweichungen der Normal-Rohdichte ρ_N und der Darr-Rohdichte ρ_o des untersuchten Brettschichtholzes

Versuchskörper	Holzfeuchtigkeit u_{mittel}	ρ_N	Standardabweichung	ρ_o	Standardabweichung
	[%]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]
A5	12,51	0,433	0,016	0,407	0,017
A9	10,74	0,441	0,015	0,420	0,015
B5	12,46	0,443	0,024	0,421	0,026
B7	12,52	0,428	0,017	0,405	0,016
B9	12,60	0,423	0,028	0,399	0,026
Gesamtmittel	12,17	0,434		0,410	

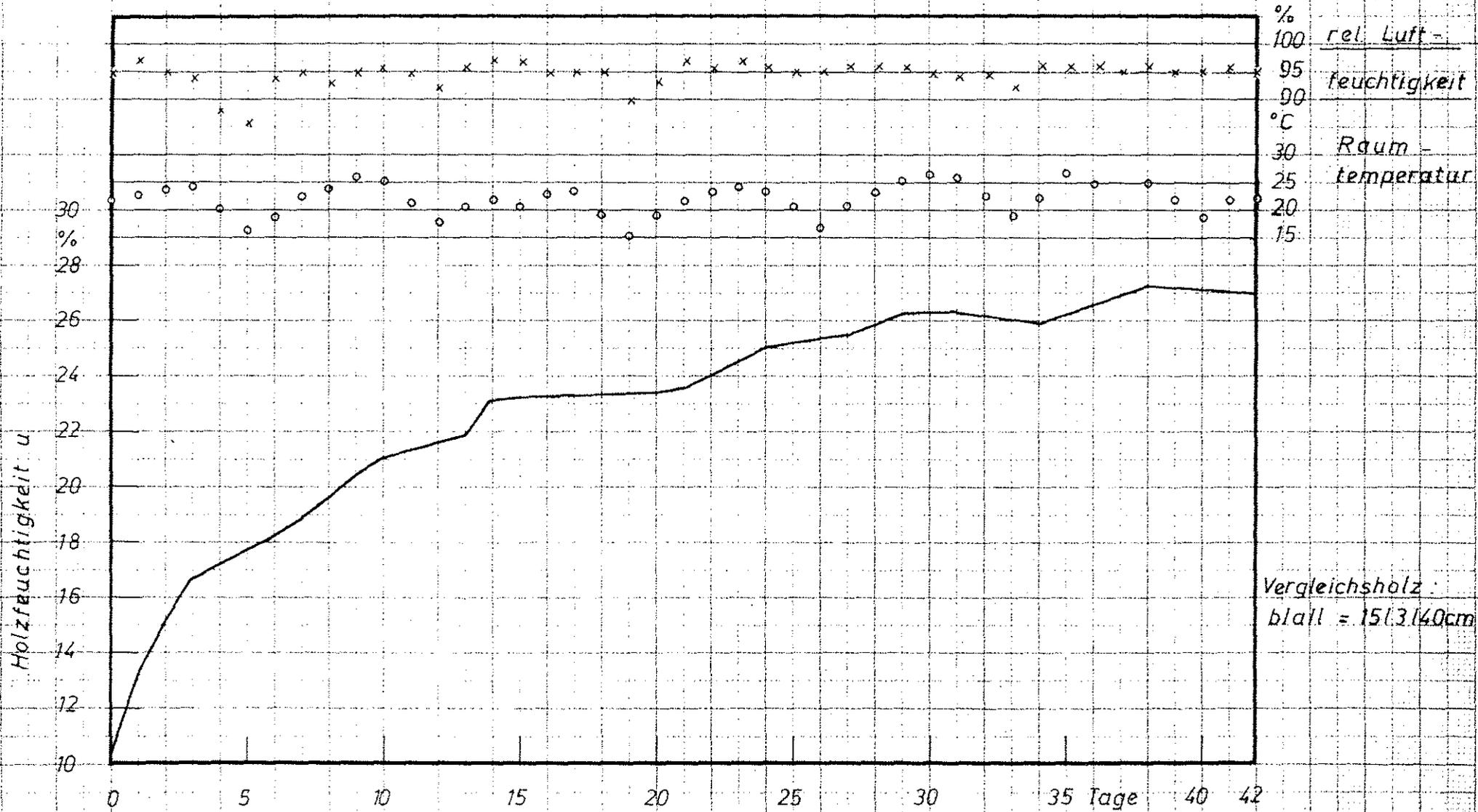


Bild 1: Feuchtigkeitsgehalt des Vergleichsholzes im Feuchtklima

Vergleichsholz:
blatt = 15/3/40cm

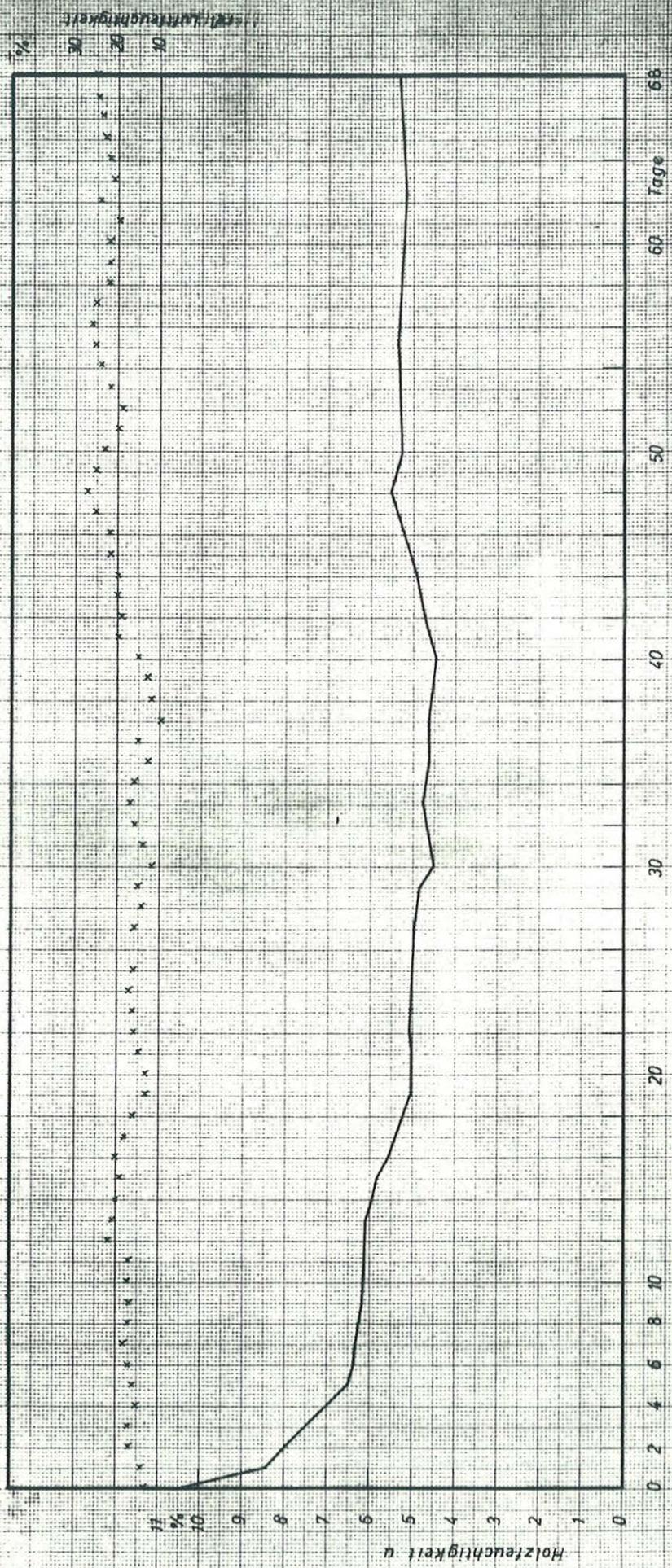


Bild 6: Feuchtigkeitsgehalt des Vergleichsholzes im Trockenklima (Temperatur 32°C ± 2°C)

Vergleichsholz: b/d/l = 15/3/42 cm

ρ [G Ω cm]

Spezifischer elektrischer Widerstand ρ

11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0

U [%]

9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

Spezifischer elektrischer Widerstand von Fichtenholz
in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit
[nach Nusser]

