

Studien über die Zunahme der Plastizität beim Steinsalz durch Temperaturerhöhung.

Von
Georg Schröder.

(Mit 7 Tafeln.)

Literatur.

- Reusch, E.: Über eine besondere Art von Durchgängen im Steinsalz und Kalkspat (Pogg. Ann. 132, 1867, S. 441).
- Sohnke, L.: Über die Kohäsion des Steinsalzes in kristallographisch verschiedenen Richtungen (Pogg. Ann. 137, 1869, S. 177).
- Voigt, W.: Bestimmung der Elastizitätskonstanten des Steinsalzes (Pogg. Ann. Ergzbd. 7, 1876, S. 1).
- Koch, K. R.: Über die Bestimmung des Elastizitätskoeffizienten aus der Biegung kurzer Stäbchen (Ann. d. Phys. u. Chem. 5, 1878, S. 251).
- Sohnke, L.: Entwicklung einer Theorie der Kristallstruktur (Leipzig 1879).
- Poynting, J. H.: Change of State: Solid-Liquid (Phil. Magazin Series V, Vol. XII, 1881, Jouly-Dez.).
- Koch, H. R.: Untersuchungen über die Elastizität der Kristalle des regulären Systems (Zeitschr. f. Kr., 9. 1884, S. 206).
- Voigt, W.: Bestimmung der Elastizitätskonstanten von Steinsalz und Flußspat (Sitzungsber. d. Berl. Akad. 1884 II, S. 989).
- Mügge, O.: Über die Kristallform des Brombaryums und verwandte Salze und über Deformationen derselben (N. J. f. M. 1889, I, S. 130).
- Winkelmann, A.: Handbuch der Physik, I. Bd. 1891.
- Auerbach: Plastizität und Sprödigkeit (Ann. d. Phys., Bd. 45, 1892, S. 277).
- Mügge, O.: Über die Kristallform eines neuen triklinen Doppelsalzes (N. J. f. M. 1892, II, S. 97).
- Sella, A. und Voigt, W.: Beobachtung über die Zerreißungsfestigkeit von Steinsalz (Ann. d. Phys. u. Chem. Bd. 48, 1893, S. 651).

2 *G. Schröder: Studien über die Zunahme der Plastizität etc.*

- Mügge, O.: Strukturen und Bewegung des Eises (N. J. f. M. 1895, Bd. 2 S. 213 und 1900, II. S. 80).
- Liebisch, Th.: Grundriß der physikalischen Kristallographie, Leipzig 1896.
- Mügge, O.: Über Translation und verwandte Erscheinungen in Kristallen (N. J. f. M. 1898, I. S. 71).
- Vernadsky, W.: Die Erscheinung der Gleitung bei kristallinen Körpern (N. J. f. M. 1899, II, S. 351).
- Chwolson: Lehrbuch der Physik, 2. Aufl. Petersburg 1900.
- Voigt, W.: Zur Festigkeitslehre (Ann. d. Phys. IV. F. 4, 1901 S. 567).
- Adams, F. u. Nicolson: An Experimental Investigation into the Flow of Marble (Phil. Trans of the Roy. Soc. of London 195, 1901, S. 363).
- Bach, C.: Elastizität und Festigkeit, IV. Aufl. Berlin 1902.
- Hess, H.: Elastizität und innere Reibung des Eises (Ann. d. Phys. IV, F. 8, 1902, S. 405).
- Lehmann, O.: Flüssige Kristalle, Plastizität, molekulare Umlagerungen, Aggregatzustände. Leipzig 1904.
- Rinne, F.: Plastische Umformung von Steinsalz und Sylvin (N. J. f. M. 1904, I, 119).
- Glaser, H.: Über die innere Reibung zäher und plastisch fester Körper (Ann. d. Phys. IV. F. 22. 1907, S. 694).
- Milch, L.: Über die Zunahme der Plastizität bei Kristallen durch Erhöhung der Temperatur. — I. Steinsalz (N. J. f. M. 1909, I, 60).
- Adams, F. u. Coker: The Flow of Marble (American Journal of Science Bd. 79, IV. Series 29, 1910, S. 465).
- Milch, L.: Die heutigen Ansichten über Wesen und Entstehung der kristallinen Schiefer (Geol. Rundschau 1910, S. 44).
- „ Über Plastizität der Mineralien und Gesteine (Geol. Rundsch. 1911, S. 145).
- Rinne, F.: Natürliche Translationen an Steinsalzkristallen (Zeitschr. f. Kr. Bd. 50, 1912, S. 259).
- Ritzel, A.: Kristallplastizität (Fortschritte der Min. 1912, S. 62).
- Johnsen, A.: Struktureigenschaften der Kristalle (Fortschr. d. Min. 1913, S. 99).
- Ritzel, A.: Translation und anomale Doppelbrechung bei Steinsalz (Zeitschr. f. Krist. Bd. 52. 1913, S. 238).
- Nach Abschluß der Arbeit ist noch erschienen:
- Ritzel, A.: Die Translation der regulären Halogenide (Zeitschr. f. Krist. Bd. 53, II. 1913, S. 97).
- Kleinhanns, K.: Die Abhängigkeit der Plastizität des Steinsalzes vom umgebenden Medium (Phys. Zeitschr. 15. Jahrg. 1914. S. 362).

I. Einleitung.

Die ersten Versuche am Steinsalz, die ein plastisches Verhalten dieser Substanz erweisen, sind von E. Reusch¹⁾ angestellt. Er erhielt Deformationen bei Anwendung mechanischer Außenkräfte und führte sie zurück auf Verschiebungen der einzelnen Teilchen gegeneinander längs bestimmten Flächen. Als Gleitflächen erkannte er die Rhombendodekaederflächen und in ihnen die längere Rhombendiagonale als Richtung, in der das Gleiten mit besonderer Leichtigkeit erfolgt. Die außerordentliche Compressibilität und Deformierbarkeit des Steinsalzes führte Reusch einzig auf diese Eigenschaft zurück. Mit Hilfe eines Polarisationsmikroskopes stellte er bei Anwendung von geringen Druckkräften, die auf einer durch eine Feile abgestumpften Kante eines Spaltungsstückes wirkten, Verdichtungen längs der Diagonale fest. Wurden die Druckkräfte gesteigert, so trat ein Bruch nach der Gleitfläche ein. Derartige Erscheinungen machten sich mitunter schon beim Spalten infolge innerer Verschiebungen und Umstellung der Moleküle bemerkbar. Auf den Begrenzungsflächen der gepreßten Stücke fanden sich Streifungen, die hauptsächlich senkrecht zur Druckrichtung verliefen. Ferner konnte Reusch unter gekreuzten Nicols auch durch Druck entstandene Lamellen längs den Flächen $\{110\}$ mit Doppelbrechung beobachten. Eine der Spaltung entsprechende Trennung längs diesen Flächen ließ sich nicht herbeiführen, sodaß dadurch die Annahme einer Verschiebung der Moleküle untereinander ohne Änderung der Cohäsions-

1) Pogg. Ann. 132, 1867 S. 441 und 147, 1872 S. 307.

verhältnisse gerechtfertigt wurde. Später hat L. Sohnke¹⁾ durch Zerreißen von Steinsalzstäbchen nach verschiedenen Richtungen festgestellt, daß die Festigkeit der Stäbchen sich mit der Richtung ändert, und daß ein Minimum eintrat, sobald die Säulenachse und somit die Richtung des Zuges senkrecht zur Würfel Fläche stand. Diese Versuche sind von W. Voigt²⁾ wiederholt und die Resultate dadurch erweitert und richtig gestellt worden, daß die Eigenschaft, die die Tragfähigkeit bestimmt, nicht als eine Volumen-, sondern als eine Flächenfestigkeit erkannt wurde. Die Grenzspannungen wurden an rechteckig - prismatischen Stäben von 2—3 mm Breite und Dicke durch Tragfähigkeit bei Biegung oder durch Zerreißen bei Dehnung erreicht.

Die Tatsache, daß durch allseitigen Druck die Eigenschaft der Plastizität in hohem Maße gefördert wird, hatte Rinne³⁾ veranlaßt, derartige Versuche nach der Kick'schen Methode auch am Steinsalz vorzunehmen. Hierbei zeigte sich das Steinsalz in „überraschend weitgehender und vollkommener Art“ umgeformt, und da die deformierten Stücke in ihrem physikalischen Verhalten in keiner Weise verändert waren, so konnte die Umformung nur auf Plastizität zurückgeführt werden. Die deformierten Stücke blieben durchsichtig, ohne Spaltrisse und ohne Doppelbrüche, ein Beweis, daß keine inneren Spannungen hervorgerufen worden waren. Angewendet wurden Drucke von 2000 kg pro qmm, die 8 bis 25 Minuten wirkten.

Untersuchungen über Gleitflächen in Bezug auf Deformation wurden mit grossem Erfolge von Mügge⁴⁾ an mehr als 30 Kristallarten angestellt und 1898 vorläufig zusammengefaßt. Indem er in Bezug auf optische Veränderungen des deformierten Teiles die Translation von

1) Pogg. Ann. 137, 1869 S. 177.

2) Ann. d. Phys. und Chem. N. F. Bd. 48. 1893, S. 651.

3) N. J. f. M. 1903, I. S. 160 und 1904, I. S. 114.

4) N. J. f. M. 1889, I. S. 130; 1892, II. S. 97; 1895, II. S. 213 und 1898, I. S. 71.

der einfachen Schiebung — wie wir sie beim Kalkspat beobachten können — trennt, hält er neben Elastizitäts- und Spaltungseigenschaften das Vorhandensein von Translationsflächen für den Hauptfaktor bei plastischem Verhalten; stattgehabte Translation ist äußerlich zu erkennen und zu bestimmen durch die Translationsstreifung. Er definiert mit Sohnke Translation als diejenige Lagenänderung eines Punktsystems, bei welcher alle seine Punkte parallele Grade von derselben Länge l und in demselben Sinne durchlaufen. Schon durch Pressen der Spaltstücke machen sich Gleiterscheinungen durch das Auftreten von mehreren Systemen von Translationsstreifen bemerkbar. Gleichzeitig findet hierbei Aufwölbung der Spaltstücke durch Biegung um die Kanten der gepreßten Würfel Fläche statt (Fig. I); eine durch Druck entstandene Rhombendodekaederfläche (Fig. II)

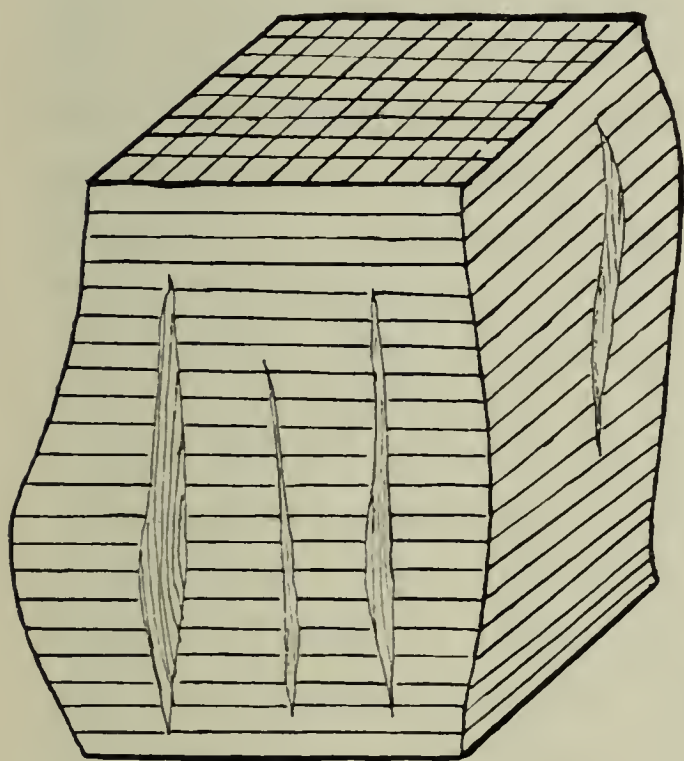


Fig. 1.

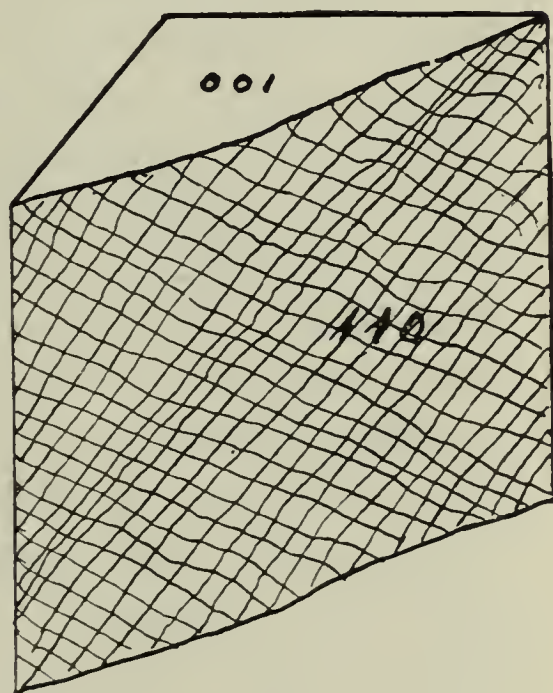


Fig. 2.

zeigte sehr deutlich Translationsstreifung. Da aber in manchen Fällen trotz dieser Streifung keine Lamellen mit Doppelbrechung zu erkennen sind, und da es nicht gelingt, gesonderte Reflexe von den Grenzflächen der einzelnen Lamellen zu erhalten, kann es sich nicht um Zwillingslamellen handeln. Mügge unterscheidet nun

fernerhin reine Translation, d. h. gleichartige Verschiebung der Teilchen in einer einzigen Fläche der sechs Dodekaederflächen, und Translation mit Biegung oder Torsion, d. h. die Translation ändert ihren Betrag innerhalb einer Fläche von Ort zu Ort, und es sind mehrere Flächen an der Translation beteiligt. Die Versuche, am Steinsalz reine Translation zu erhalten, hatten keinen Erfolg, offenbar wegen der großen Anzahl der Translationsflächen und Translationsrichtungen, welche in Funktion treten, wenn Drucke auch nur in einer Richtung wirken. Die hierbei stattfindende große innere Reibung ist wahrscheinlich die Ursache der optischen Anomalien, die längs den Translationslamellen auftreten. Fast bei jedem Spaltversuch genügt der hierbei ausgeübte Druck, um Translation mit Biegung hervorzurufen. Derartige Verbiegungen stellt Mügge her, indem er möglichst dünne Spalttafeln über Eck mit etwas Druck über eine nicht zu harte Unterlage zieht. Für Translation verbunden mit Biegung erklärt er auch die Schlagfigur des Steinsalzes: die deformierten Teile zeigen die charakteristische Streifung. Letztere macht sich auch bei mikroskopischer Betrachtung der Ritzfigur bemerkbar. Auf das Vorhandensein von sechs gleichwertigen Translationsflächen und den Umstand, daß außerdem die Translation in diesen Ebenen in jeder Richtung vor sich gehen kann, führt Mügge auch die Tatsache zurück, daß bei größeren Massen des Steinsalzes, besonders in Bergwerken, keine fließende Bewegung stattfindet. Die gegenseitige Beeinflussung der Translationsflächen verändert zunächst ihre Lage zueinander und stört damit die Homogenität der ganzen Masse, während sich bei derselben mechanischen Beanspruchung des Eises die einzelnen Basisflächen als Translationsflächen parallel stellen und in dieser Weise sich gegenseitig verstärken.

Daß die Wirkung hohen Druckes zur Erzielung von Plastizität durch Erhöhung der Temperatur unterstützt wird, haben neben anderen Forschern hauptsächlich Adams¹⁾,

1) Journ. of Geology 1910 S. 489.

Nicolson¹⁾ und Coker²⁾ an Kalkspat und Marmor nachgewiesen. Rinne³⁾ hatte Kalkspat und Marmor als halbplastische Körper bezeichnet, d. h. bei allseitigem Druck beruhte die Deformation neben Gleitung auch auf Zertrümmerung. Adams und seine Mitarbeiter erhöhten neben dieser mechanischen Beanspruchung die Temperatur noch auf 300 bis 400 ° und konnten auf diese Weise die Versuchskörper vollkommen plastisch umgestalten.

Welche Bedeutung die Temperatur für sich allein für die Plastizität des Steinsalzes hat, hat Milch⁴⁾ durch Versuche nachgewiesen. Daß die Stoffe in der Nähe der Schmelzkurve plastisch werden, war bekannt — das Schmieden der Metalle geht ja auf diese Erscheinung zurück; Milch zeigte, daß beim Steinsalz eine starke Zunahme der Plastizität schon in weiter Entfernung vom Schmelzpunkt eintrat. Es wurden 2—3 mm breite und dicke und 20 mm lange Stäbe mit einem Messer herausgespalten und in einer offenen Spiritusflamme oder in einem Heizschrank erwärmt. Schon bei 200 ° konnten sie beliebig stark und verhältnismäßig leicht gebogen werden. Somit wurde bei einer Temperatur, die von dem Schmelzpunkt (820 °) noch weit entfernt war, schon eine überraschende Zunahme der Plastizität erzielt. Die von Mügge beobachteten Erscheinungen (Streifungen etc.) konnten auch hier bemerkt werden. Die Spaltbarkeit ist fast unverändert erhalten geblieben, und nur die Spaltbarkeit nach (010), wenn (001) die Fläche ist, in der die Biegung stattfand, zeigte mit Annäherung an die Biegungszone muscheligen Bruch. Optische Anomalien, die Mügge auf große innere Reibung zurückführt, erschienen ziemlich abgeschwächt und schienen zuweilen zu fehlen. Milch führt dies auf eine bedeutende Verminderung der Reibung durch Temperaturerhöhung zurück und beweist es damit, daß

1) Phil. Trans. Royal Soc. Bd. 195, 1901, S. 363.

2) American Journ. of Science 1910, S. 565.

3) N. J. f. M. 1903 I, 160 und 1910 I, S. 114.

4) N. J. f. B. 1909 I, S. 60.

Stäbchen, die sich wegen größerer Dicke — die plastischen Erscheinungen machen sich hier als quantitative Eigenschaft geltend — und geringerer Temperaturerhöhung schwerer biegen als andere, deutlich derartige Anomalien längs Streifen parallel $\{110\}$ aufweisen. Biegung um die zweizählige Symmetrieaxe, sowie Deformationen jeder beliebigen Art und nach jeder Richtung haben zu denselben Erscheinungen und Schlüssen geführt. Durch diese Versuche ist es Milch gelungen nachzuweisen, daß durch Wärmezufuhr Steinsalz zu einem hochplastischen Körper wird. Gleichzeitig spricht er die Vermutung aus, daß sich die Verringerung des Widerstandes gegen eine Formveränderung in kristallographisch verschiedenen Richtungen auch verschieden geltend macht.

In einer neueren Arbeit über „Struktureigenschaften der Kristalle“ erklärt Johnsen¹⁾ die doppelbrechenden Schichten durch die Annahme inhomogener Deformation derjenigen Partien, die an die Translationsebenen grenzen, hervorgerufen durch innere Reibung, und spricht von einer Spannungsdoppelbrechung.

Daß schließlich derartige Erscheinungen nicht nur künstlich an Spaltstücken hervorgerufen werden können, sondern auch an Kristallen in der Natur vorkommen, zeigen Steinsalzkristalle aus Thüringen (Gräfentonna), die in Lagen grauen Tons eingebettet waren, und die Rinne²⁾ beschrieben hat. Die weitgehenden Deformationen mögen mit der Druckwirkung zusammenhängen, die allmählich wachsend über geologische Zeiten gedauert hat. Spaltversuche zeigen, daß eine Verschiebung der Gestalt des Materials unter Erhaltung der Parallelstellung des Kristalls stattgefunden hat.

II. Apparatur.

Bei den Biegungsversuchen wurden prismatische Stäbchen auf zwei Schneiden aufgelegt und in der Mitte belastet. Eine T-förmige Eisenplatte hatte an den drei

1) Fortschritte d. Min. 1913 S. 102.

2) Zeitschr. f. Krist. Bd. 50 1912 S. 259.

Enden je eine Stellschraube, um die Schneiden mit Hilfe einer Wasserwage horizontal einzustellen; der Zwischenraum zwischen den Stellschrauben A und B (Figur 3.) beträgt

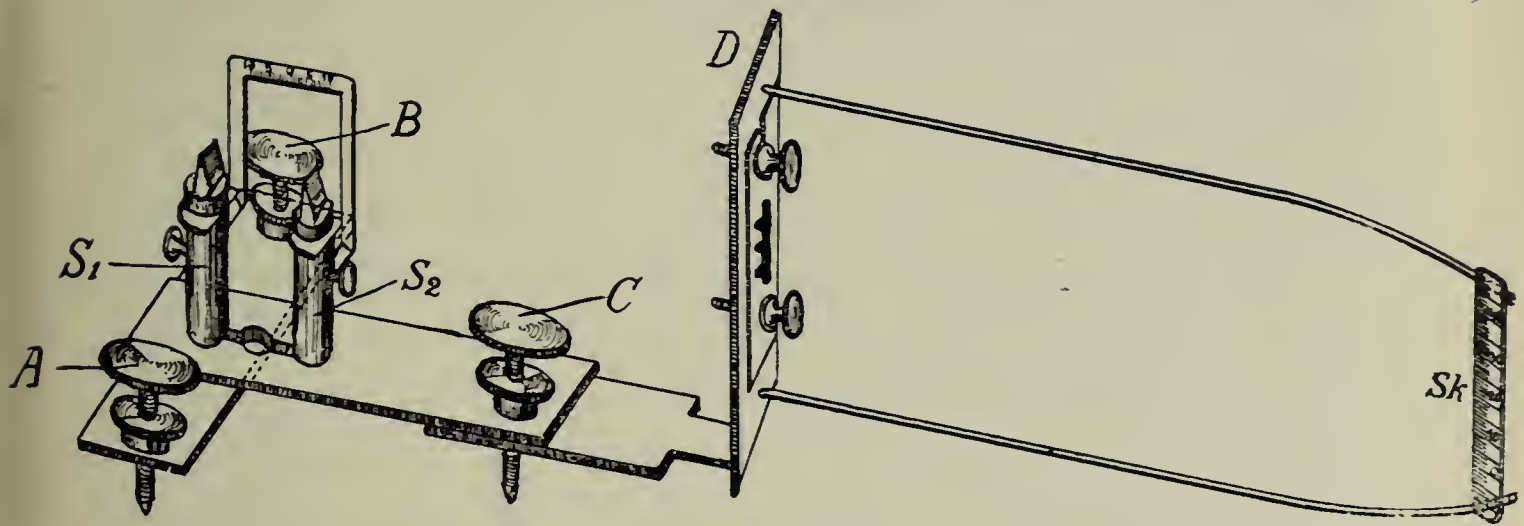


Fig. 3.

8,5 cm und der Arm bis C 15 cm. Auf dem längeren Arm waren zwei 4 cm hohe Säulchen S_1 und S_2 angebracht, die die Schneiden trugen. Die bei den Vorversuchen zuerst angewendeten Stahlschneiden erwiesen sich als unbrauchbar, da sie besonders bei Versuchen, die längere Zeit dauerten, leicht angegriffen wurden; sie wurden daher durch Achat-schneiden ersetzt, die 30,0 mm (nach einer neuen Befestigung 30,3 mm und nach einer späteren Befestigung 30,5 mm) von einander entfernt waren. In geringer Entfernung hinter C ist die Schiene in einer Länge von 11 cm rechtwinklig nach oben umgebogen. An dieser befindet sich die Skala (Sk) in 18,5 cm Entfernung, auf die die Biegung des Stäbchens mittels eines Hebels übertragen, und auf der sie gleichzeitig vergrößert wurde. Der Drehpunkt des Hebels war eine in der Wand (D) angebrachte, ausgerundete, scharfe Stahlschneide. Die Vergrößerung des Betrages der Biegung durch den Hebel bewirkte, daß ein Skalenteil = 1 mm in Wirklichkeit 0,645 mm Senkung der Mitte des Stäbchens entsprach. Um ein möglichst geringes Übergewicht zu erhalten, wurde an dem Hebel ein Laufgewicht in Gestalt einer verschiebbaren Kugel angebracht. Dadurch konnte erreicht werden, daß der Hebel leicht auf einen Reiter auflag, der seinerseits die Senkung der Mitte des Stäbchens auf den Hebel über-

trug. Mit der Schneide dieses Reiters (Fig. 4) griff die Belastung an. Bei dieser Anordnung mußte der Reiter so hoch sein, daß infolge der Senkung der Mitte und der damit verbundenen Hebung der Enden des gebogenen

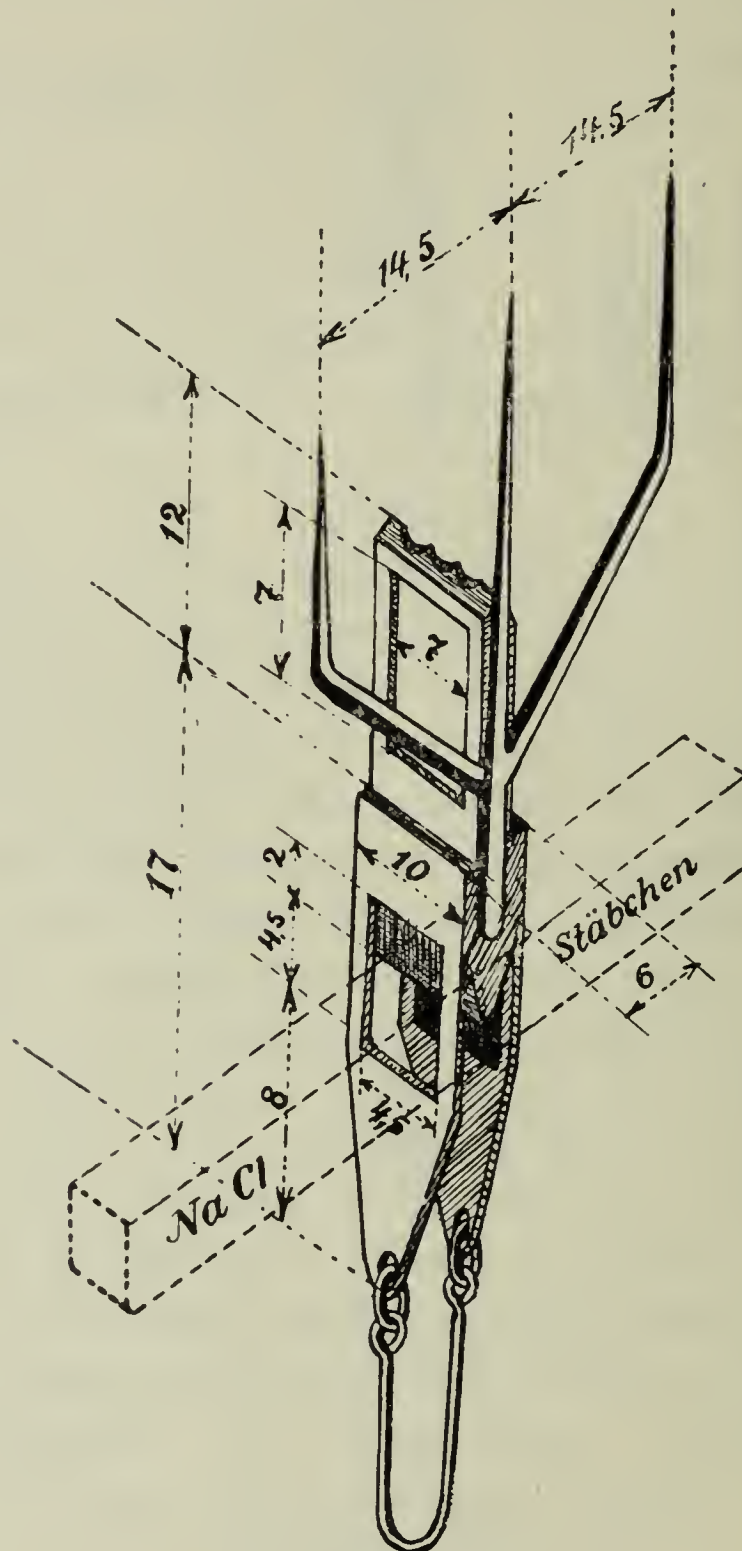


Fig. 4.

Stäbchens der Hebel durch Aufliegen in seiner Bewegungsfreiheit nicht gestört wurde; ferner mußte für die Versuche die Schneide des Reiters

1. genau in der Mitte der beiden Unterstützungsschneiden angreifen und

2. parallel zu den beiden Unterstützungsscheiden, d. h. rechtwinkelig zur Längsaxe des Stäbchens verlaufen. Aus diesem Grunde erhielt der obere Teil des Reiters drei Zeiger, die auf eine über den Unterstützungsschneiden und genau senkrecht zu diesen angebrachte Skala, die somit parallel der Längsaxe des aufgelegten Stäbchens verlief, einzustellen waren. Die drei Zeiger bildeten eine Ebene, auf der die Schneide des Reiters senkrecht stand. In die Ebene dieser Schneide fällt nun der mittlere Zeiger, sodaß nach Bestimmung der Mitte der beiden Unterstützungsschneiden auf der Skala durch Einstellen dieses Zeigers auf diesen Punkt die erste der obigen Bedingungen erfüllt ist. Waren die drei Zeiger gleichweit von der Skala entfernt, d. h. waren sie der Skala parallel, so war die Schneide des Reiters parallel den beiden Unterstützungsschneiden und somit Bedingung 2. erfüllt. Die Schneide des Reiters war aus gehärtetem Stahl angefertigt. Auf der oberen Breitseite der Schneide befand sich der Bügel, auf dem der Hebel auflag; auf der oberen Kante war der Bügel mit Einschnitten versehen, damit der Hebel fest lag. An den beiden Seiten der Schneide waren Wände angebracht, deren untere Enden die Belastung trugen, und die in der Mitte eine Öffnung hatten. Wurde durch diese Öffnung ein Stäbchen gesteckt, so konnte die Schneide auf das Stäbchen wirken.

Die Erhöhung der Temperatur geschah in einem doppelwandigen Ofen aus Kupferblech von 50 cm Länge und je 25 cm Breite und Höhe, der im Innern mit Asbestplatten ausgelegt war. Geschlossen wurde er mit einer Asbestplatte und einem Deckel, der 5 cm über die Seitenwände griff. Zur Heizung dienten je nach Bedarf 1 bis 5 Gasflammen; die Temperatur konnte mit Schwankungen von 3° konstant gehalten werden. Die Flammen wirkten auf der linken Unterseite des Ofens, der Apparat befand sich auf der rechten Seite im Innern auf einem Tischchen. In die rechte Seitenwand wurde die Platte D (Figur 3) eingeschoben, sodaß die Biegung des Stäbchens auf der Skala außerhalb des Ofens beobachtet werden konnte. Die auf der Unterseite des Ofens auf der rechten Seite heraus-

tretende Schale für Belastung wurde gegen die Einwirkung der Gasflammen durch eine Asbestplatte geschützt. Die Belastung hing an einer Kette von mehreren Drähten und befand sich auf 2 Schalen, von denen die eine für die Anfangsbelastung, die andere für die zuzuführende Belastung bestimmt war; letztere geschah durch langsam und von geringer Höhe zufließende, sehr feine Schrotkörner, sodaß durch das Niederfallen der einzelnen Körner keine Störung bewirkt wurde. Bei höheren Temperaturen konnte wegen der Hitze eine Belastung mit Sand oder Quecksilber nicht angewendet werden.

III. Tragfähigkeit prismatischer Stäbchen bei Biegungsversuchen.

(Biegungsfestigkeit und Bruchbelastung.)¹⁾

Die Festigkeit eines Körpers ist abhängig von den Kohäsionskräften, sie äußert sich bei Biegungsversuchen als Widerstand gegen das Zerschneiden der betreffenden Substanz.

Kräfte, die geeignet sind, Biegung bei einem Stäbchen zu erzeugen, und rechtwinkelig zu seiner Längsachse angreifen, geben als Bedingung für eine Biegung für jeden Querschnitt ein Kräftepaar, dessen Ebene senkrecht auf demselben steht. Die größte Spannung findet an der unteren, die größte Pressung an der oberen Schicht statt, während die mittlere Schicht sich neutral verhält. An dieser findet aber die größte Entfernung der einzelnen Teilchen aus ihrer ursprünglichen Lage statt, da in den oberen Schichten die Teilchen von der Mitte fort sich

1) Als Literatur für die folgenden Erörterungen ist benutzt worden: A. Sella und W. Voigt: Beobachtungen über die Zerreißungsfestigkeit vom Steinsalz. Ann. d. Phys. und Chem. Bd. 48, 1893, S. 651. C. Bach: Elastizität und Festigkeit. IV. Aufl. Berlin, 1902, S. 175ff. O. D. Chwolson: Lehrbuch der Physik. II. Aufl. Petersburg, 1900, S. 738. A. Winkelmann: Handbuch der Physik. Breslau, 1891, I. Bd., S. 262ff. und 312ff. Die Bezeichnung der einzelnen Größen erfolgt nach Bach.

bewegen, während unterhalb der neutralen Schicht die Bewegung nach der Mitte zu gerichtet ist.

Der Stab ist beiderseits unterstützt durch A und B und in der Mitte belastet durch P . Die Auflagerdrucke sind mit Vernachlässigung des Eigengewichts des Stäbchens $A = B = P/2$. Das Moment des biegenden Kräftepaares M ist für den Querschnitt in der Angriffsstelle von P

$$M = \frac{P}{2} \cdot \frac{l}{2} = \frac{P \cdot l}{4},$$

wo l die Entfernung der beiden Schneiden bedeutet. Die im Innern des Stabes durch das Moment M wachgerufenen Kräfte müssen sich mit diesem im Gleichgewicht befinden, sie müssen daher ein Moment liefern, das gleich und entgegengesetzt M ist.

Wenn σ die durch M im Abstände η von der senkrecht zur Ebene des Kräftepaares stehenden Hauptachse (im Sinne der Festigkeitslehre), d. h. im Flächenstreifen $df = z \cdot d\eta$ hervorgerufene Spannung ist, so erhält man

$$M = \int \sigma \cdot df \cdot \eta,$$

woraus sich nach Umrechnung und mit Berücksichtigung des Trägheitsmomentes Θ ergibt:

$$\sigma = \frac{M}{\Theta} \cdot \eta.$$

Hiernach sind die Spannungen proportional dem Abstände der Flächenelemente von der Nullachse.

Ist K die zulässige Anstrengung des Materials, so ergibt sich für die Spannung, die an der Oberfläche herrscht, η also die halbe Höhe h ist:

$$K = \frac{M}{\Theta} \cdot \frac{h}{2}.$$

In dieser Formel ist nun $M = \frac{P \cdot l}{4}$; das Trägheitsmoment des Querschnittes in Bezug auf die Schwerpunktsaxe wird

$$\Theta = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3,$$

wo b die Breite und h die Höhe des Stäbchens bedeutet.

K führt nun bei Anwendung der Bruchbelastung P_{max} zur Bestimmung der Biegungsfestigkeit F . Mithin wird:

$$F = \frac{P_{max} \cdot l}{4} \cdot \frac{h}{2 \cdot \frac{1}{12} b \cdot h^3} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_{max} \cdot l}{b \cdot h^2}$$

Mit Hilfe dieser Formel ist man in der Lage, bei einem Stäbchen mit bekannten Querschnittsdimensionen und nach Bestimmung der Biegungsfestigkeit F des betreffenden Materials die jeweilige Bruchbelastung zu bestimmen aus:

$$P_{max} = \frac{2}{3} \cdot \frac{F \cdot b \cdot h^2}{l}$$

Voigt hat beim Steinsatz für F verschiedene Werte gefunden, die abhängig sind von den Begrenzungsflächen des Stäbchens. Ist das Stäbchen ein Spaltungsstück, d. h. sind die Seitenflächen Würfelflächen, so ist $F = 1190$ bezogen auf Gramm und mm. Bei Voigt variiert F bei sechs Versuchen zwischen 1060 und 1260. Ich bestimmte die Bruchbelastung bei gleichmäßig zunehmender Belastung. Die Belastung wurde durch feine Schrotkörner ausgeführt, die in kleiner Menge aus einer Röhre gerade noch auslaufen konnten. Die Ausflußöffnung endete in einen Gummischlauch, sodaß nach erfolgtem Bruch durch eine Klammer jedes weitere Zufließen verhindert werden konnte. Das Stäbchen war schon von vornherein ziemlich stark belastet, sodaß innerhalb 1 Minute Bruch erfolgen mußte. Fünfzehn Versuche bei gewöhnlicher Temperatur, von denen 2 wegen zu großer Abweichungen ausgeschlossen wurden, ergaben als Mittelwert für F 1051. Die gefundenen Werte lagen zwischen 1249 und 907. Acht Versuche bei 100° lieferten den Durchschnittswert 1045, sodaß bei dieser Temperatur kein Unterschied zu erkennen war. Bei 200° traten stets Biegungen ein, sodaß die Festigkeit nicht bestimmt werden konnte. Da ferner Voigt bei seinen Bestimmungen 1060

als brauchbaren Wert gelten läßt, so habe ich 1050 meinen sämtlichen Berechnungen der Bruchbelastung zu Grunde gelegt. Mit Anwendung dieser Konstanten und der oben entwickelten Formel konnte die Belastung geregelt und eine zu starke Belastung, die vorzeitigen Bruch herbeiführen konnte, verhindert werden.

IV. Die Herstellung der Stäbchen.

Als Begrenzung der Stäbchen dienten Würfelflächen; somit konnten Spaltungsstücke zur Biegung verwendet werden, die mit einem Messer durch einen kurzen, kräftigen Schlag herausgespalten wurden. Es muß hervorgehoben werden, daß sich hierbei die verschiedenen Steinsalzstücke ganz verschieden verhielten. Während einige sich zu sehr langen (4—5 cm) und dünnen Stäbchen (bis 1,4 mm) spalten ließen, war dies bei anderen Würfeln fast nie zu erreichen, obwohl dieselbe Spaltmethode und dieselben Instrumente benutzt wurden. Von dem zur Verfügung stehenden Material, das dem Institut durch die gütige Vermittelung des Herrn Geheimrat Rinne von verschiedenen Bergwerken in liebenswürdiger Weise zur Verfügung gestellt wurde, erwiesen sich als brauchbar große Spaltungsstücke aus Staßfurt und besonders aus Heilbronn, letztere von hervorragender Reinheit. Als Unterlage beim Spalten hatte sich eine dicke Glasplatte am besten bewährt; um zu verhindern, daß beim Niederfallen die Stäbchen zersprangen, wurde über das Glas Papier gelegt. Durch den Schlag etwas gekrümmte Stäbchen ließen sich durch mehrfaches vorsichtiges Berühren mit einem etwas spitzen Stahlstab bei langsam zunehmendem Druck auf der Glasplatte wieder geradebiegen. Auch ist es mir mit großer Leichtigkeit gelungen, dünne Stäbchen mit den Händen verhältnismäßig stark zu biegen. Waren die Stäbchen stark gekrümmt, so konnte man unter dem Polarisationsmikroskop, wenn man die Seitenfläche, in der die Biegung stattfand, untersuchte, hauptsächlich in den mittleren Schichten optische Anomalien beobachten.

Eine auffallende Erscheinung, die sich jedoch nicht bei allen Stücken fand, war folgende: Drang das Messer nur wenig in das gespaltene Stück ein, was man durch Aufheben sofort nach dem Schlage erreichen konnte, so wurde es nur zur Hälfte gespalten, und so entstand ein dreieckiger Schlitz. Während der obere Teil mit einer Öffnung bis zu 1 cm klappte, hörte die Spalte allmählich auf, und der untere Teil blieb unversehrt. In einem Falle konnte ich sogar deutlich beobachten, daß die Öffnung sich im Liegen einige Zeit nach dem Schlage noch vergrößerte. Mit den Händen konnte ich durch langsam gesteigerten Druck die beiden Teile wieder zusammendrücken. Trennte man durch vorsichtiges, langsames Einführen des Messers die Teile wieder von einander, so ließen sie sich von neuem zusammendrücken — bei einem Stück gelang dieser Versuch viermal, bevor ein Teil abbrach. Beim Zusammenbiegen hatte ich die Empfindung, als wenn ich es mit Bleistäben zu tun hätte. Selbst bei Würfeln, die reich an Gas- und Flüssigkeitseinschlüssen waren, konnte ich derartige Erscheinungen beobachten, ohne daß die Einschlüsse hinderlich waren.

Da Stäbchen mit verschiedenen Querschnitten keine vergleichbaren Werte liefern konnten, und annähernd gleiche Dimensionen beim Spalten nur in seltenen Fällen erreicht wurden, so wurden für die Hauptversuche geschliffene Stäbchen hergestellt, die von dem optischen Institut Dr. Steeg und Reuter, Homburg v. d. Höhe, angefertigt wurden. Die mattgeschliffenen Seitenflächen der Stäbchen waren auch hier Würfel Flächen. Optische Anomalien, die auf Spannungszustände im Innern der Stäbchen schließen ließen, konnte ich nicht beobachten, nur an den Oberflächenschichten waren mit Hilfe eines Gipsblättchens sehr geringe Störungen bemerkbar. Die Messungen der Querdimensionen der Stäbchen geschah durch ein Mikroskop mit Okularmikrometer; jede Seite eines Stäbchens wurde in der Mitte und an den beiden Enden gemessen und das Mittel hieraus zur Berechnung unter einer gewissen Berücksichtigung des Wertes in der Mitte benutzt. Im allgemeinen waren die Abweichungen sehr gering, als

Maximum ergab sich 0,02 mm. An den gespaltenen Stäbchen waren mitunter optische Störungen wahrzunehmen; an den Stellen, wo das Messer aufgesetzt war, war bisweilen auch ein leichtes Aufblättern zu bemerken.

V. Biegungsversuche.

Allgemeines.

Die Belastung wurde stets auf die Bruchbelastung bezogen, die aus den Dimensionen des Querschnittes des betreffenden Stäbchens leicht nach der Formel unter III. berechnet werden konnte. Bei Beginn eines Versuches wurde das Stäbchen je nach der Höhe der Temperatur, bei der beobachtet werden sollte, mit 30 bis 80 % des für die Bruchbelastung berechneten Wertes belastet, der Ofen geschlossen und die Temperatur auf die erforderliche Höhe gebracht. Nun erst, nachdem die Temperatur erreicht war, wurde die Belastung langsam erhöht. Bei den ersten Versuchen wurden in gleichen Zeitabständen 2 oder 5 g der Belastung zugefügt, später fand die Belastungszunahme in Prozenten der Bruchbelastung statt. Anfangsbelastung und Zunahme wurden so niedrig gewählt, daß eine Biegung immer erst nach längerer Zeit (mindestens 1—2 Stunden nach Erreichung der Temperatur) eintreten konnte. Gewöhnlich wurden in längeren Zwischenräumen — der kleinste betrug 15 Minuten — langsam Beträge von 5 % der Bruchbelastung (im folgenden stets abgekürzt d. Bbl.) hinzugefügt. Sobald nun auf der Skala (Fig. 3 — Sk) die geringste Biegung abgelesen werden konnte, hörte die Vermehrung der Belastung auf. Die geringste Biegung, die sich durch die Hebelübertragung auf der Skala ablesen ließ, war 0,1 Skalenteil = 0,065 mm Senkung der Mitte des Stäbchens; kleinere Bewegungen bis zu 0,05 Skalenteil konnten nur beobachtet werden, wenn der Hebel sich in der Nähe eines Teilstriches der Skala befand. Die Belastung, bei der sich das Stäbchen bog, — im folgenden stets als Biegungsbelastung bezeichnet —, wurde bei den Versuchen unverändert bis zum Ende des Versuches bei-

behalten. War die Bieungsbelastung (stets ausgedrückt in Prozenten der Bruchbelastung) verschieden bei sonst gleichen Versuchsbedingungen, so konnte in diesen Fällen meistens auch eine verschiedene Schnelligkeit der Biegung beobachtet werden. Innerhalb eines Versuches wurde die Temperatur nach Möglichkeit konstant gehalten; Schwankungen bis zu $\pm 3^{\circ}$ konnten zwar nicht vermieden werden, beeinflussten jedoch den Versuch auch in keiner bemerkbaren Weise. Die Stäbchen wurden stets so auf die Schneiden gelegt, daß die Breite größer war als die Höhe. Das Verhältnis der Breite zur Höhe schwankte von 2 : 1 bis zu quadratischem Querschnitt. Ferner wurden einige Versuche mit geschliffenen Stäbchen ausgeführt, die zeigten, daß sich, selbstverständlich bei gleicher Bruchbelastung, Stäbchen mit dem umgekehrten Verhältnis der Breite zur Höhe nach Art und Schnelligkeit der Biegung anders verhielten. Genauere Angaben hierüber folgen weiter unten. Bei gespaltenen Stäbchen konnte ich entsprechende Beobachtungen nicht machen; hier erhielt ich bei Stäbchen mit quadratischem Querschnitt dieselbe Biegung in derselben Zeit und bei gleicher Bieungsbelastung, wie bei Stäbchen, deren Breite zur Höhe wie 2 : 1 war. (Siehe Tabelle I.)

A. Vorversuche.

(Versuche mit gespaltenen Stäbchen).

Mit gespaltenen Stäbchen wurde zunächst die Brauchbarkeit des Apparates geprüft und ferner Versuche angestellt, die wesentlich zur Prüfung der anzuwendenden Methode und der gegenseitigen Verhältnisse der in Betracht kommenden Faktoren dienen sollten. Da schon bei 200° C bei verhältnismäßig schwacher Belastung sehr erhebliche Biegungen erzielt wurden, und diese in verhältnismäßig sehr kurzer Zeit erfolgten, wurde diese Temperatur als obere Grenze festgehalten. Ebenso starke Biegungen konnten, wie die Versuche bald erkennen ließen, auch bei bedeutend niedrigeren Temperaturen erreicht werden; je-
 ---r aber die Temperatur sank, desto mehr nahmen die Ver-

suche neben mehr oder weniger erheblicher Verstärkung der Belastung größere Zeiträume in Anspruch, sodaß wir uns bisweilen mit dem Nachweis der Biegung bei niedrigen Temperaturen begnügen mußten und keine größere Zahl derartiger Versuche anstellen konnten. Durch diese Versuche wurde nachgewiesen, daß bis zu Zimmertemperatur herab an Steinsalzstäbchen eine plastische Deformation in Gestalt einer Biegung möglich ist. In vielen Fällen konnte, wie erwähnt, das Ende der Biegung wegen ihrer Langsamkeit nicht abgewartet werden, und der Versuch wurde absichtlich unterbrochen, wenn die Biegung genügend erschien, oder wenn das Stäbchen noch zu anderen Untersuchungen dienen sollte. Eine vorzeitige, unbeabsichtigte Endigung der Versuche konnte durch drei Ursachen herbeigeführt werden:

1) Die Stäbchen glitten während der Biegung von den Unterstützungsschneiden ab.

2) Die Stäbchen wurden wohl infolge von Unebenheiten der aufliegenden Fläche von den Schneiden festgehalten und die weitere Biegung somit erschwert oder verhindert.

3) Es trat Bruch ein, gewöhnlich bevor sich eine Biegung geltend machte oder nach einer ganz unbedeutenden Biegung.

Der erste Fall, das Abgleiten, trat naturgemäß besonders häufig bei kurzen Stäbchen ein, die mangels genügend zahlreicher langer Stäbchen zu den Vorversuchen benutzt werden mußten. Unter 120 Stäbchen wiesen ungefähr acht eine Länge von 45 bis 50 mm auf. Das als Grund für abweichendes Verhalten angenommene Festhalten der Stäbchen durch die Schneiden (Fall 2) ist nicht direkt nachgewiesen, doch deuten die bei einigen Versuchen beobachteten Erscheinungen auf eine derartige Ursache hin. Bei gespaltenen Stäbchen erfuhren nämlich bis dahin gleichmäßige Biegungen bisweilen eine Unterbrechung, ohne daß der plötzlich einsetzende Stillstand auf irgend eine andere Ursache zurückgeführt werden konnte. Nach einiger Zeit, oft auch erst nach Vergrößerung der Belastung (diese Ver-

suche wurden als unrein angesehen und in keiner Weise zu weiteren Betrachtungen herangezogen) bog sich das Stäbchen in der alten Weise oder in verstärktem Maße weiter. Daß die Begrenzungsflächen der Stäbchen nicht ganz eben waren, beweisen auch die nicht gerade sehr großen, so doch bemerkbaren Verschiedenheiten der Querschnittsdimensionen an verschiedenen Stellen einer Fläche eines Stäbchens, die bei Messungen unter dem Mikroskop festgestellt wurden.

Das Eintreten von Bruch, gleichviel ob mit oder ohne Biegung (Fall 3), war nur durch die Beschaffenheit des Materials bei den betreffenden Stäbchen zu erklären und ließ sich also nicht vermeiden. Bruch ohne Biegung wurde bei gespaltenen Stäbchen mit 2 bis 3 Ausnahmen nur bei Temperaturen unter 100° C beobachtet, trat hier aber häufiger ein, obwohl gerade bei niederen Temperaturen, um Bruch zu vermeiden, die Belastung stets sehr langsam gesteigert wurde.

Somit erschien für die Hauptversuche das Temperaturintervall von 100° bis 200° C besonders geeignet, doch muß nochmals hervorgehoben werden, daß bei Stäbchen von den angegebenen Dimensionen Biegungen auch bei niederen Temperaturen mehrmals nachgewiesen wurden.

Selbstverständlich kann Bruch nur in den Fällen als Ausdruck geringer Plastizität angesprochen werden, wo er sich häufig oder nahezu regelmäßig bei einer Belastung einstellte, die bei höheren Temperaturen zu bruchloser Biegung führte, also unter 100° . Als ein in allen Fällen zuverlässiger Ausdruck der Plastizität erwies sich die Biegungsgeschwindigkeit. Als solche wird stets die Senkung der Mitte des Stäbchens innerhalb einer Minute angesehen, als Durchschnittswert berechnet für die ganze Biegung oder den in Betracht kommenden charakteristischen Biegungsabschnitt (vergleiche die Kurven). Eine Abhängigkeit der Biegungsgeschwindigkeit von der Biegungsbelastung erscheint wahrscheinlich und besteht wohl auch, trat aber bei der von uns befolgten Versuchsanordnung bei gleichen Temperaturen nicht überall hervor, während andererseits

sich die Erhöhung der Plastizität und somit der Biegungsgeschwindigkeit mit zunehmender Temperatur bei allen diesen Vorversuchen sehr stark und deutlich geltend macht, wie aus folgender Tabelle hervorgeht.

Tabelle I. (Tafel I und II.)

Versuch Nr.	Dimensionen des Querschnittes (Breite—Höhe) mm	Entfernung der Unterstützungs- schneiden mm	Bruch- be- lastung g	Biegungs- belastung ‰ d. Bbl.	Größe der Gesamt- biegung mm	Zeit der Gesamt- biegung St. u. Min.	Ende des Versuches wegen:
Temperatur 200°							
1	(2.66—2.41)	30.3	356.9	60.0	4.64	31'	Abgleitens
2	(2.07—1.94)	30.0	181.8	91.2	5.55	30'	"
3	(1.77—1.50)	30.0	92.9	88.4	4.41	25'	Festhaltens
4	(2.25—1.43)	30.0	107.4	83.1	3.81	12'	"
5	(1.55—2.86)	30.5	291.0	55.0	12.90	39'	Unterbrechung
6	(1.58—2.44)	30.3	217.3	60.0	9.55	20'	Abgleitens
7	(1.50—2.53)	30.3	221.8	75.0	14.58	19'	"
8	(2.27—2.59)	30.3	351.8	75.0	15.55	12'	"
9	(2.25—1.63)	30.0	139.5	79.0	14.32	1'	"
Temperatur 100°							
10	(2.59—2.59)	30.3	401.4	79.7	5.29	38 ^h 0'	Festhaltens
11	(2.27—1.49)	30.3	116.4	85.2	0.39	3 ^h 24'	Bruch
12	(2.07—1.95)	30.3	181.8	98.9	0.26	3 ^h 55'	Festhaltens
13	(2.63—1.90)	30.3	219.3	73.6	4.77	10 ^h 15'	Abgleitens
14	(2.09—1.57)	30.3	119.0	94.1	0.65	1 ^h 1'	Bruch
15	(2.72—1.63)	30.3	167.0	84.6	3.61	5 ^h 17'	Festhaltens
16	(2.60—1.45)	30.3	126.3	85.7	0.84	1 ^h 0'	Bruch
17	(2.49—1.72)	30.5	169.1	75.0	5.03	5 ^h 15'	Abgleitens
18	(2.07—1.84)	30.5	160.8	85.0	6.39	4 ^h 15'	"
19	(2.45—1.30)	30.3	95.6	79.7	1.48	1 ^h 20'	opt. Unters.
20	(1.98—1.39)	30.3	88.4	91.4	6.45	1 ^h 45'	Abgleitens

Der Unterschied in der Biegungsgeschwindigkeit zwischen 200° und 100° ist überaus deutlich; auch das Fehlen von Bruch bei 200°, während bei 100° von 11 Stäben 3 nach schwacher Biegung zerbrachen, weist auf sehr verschiedenes Verhalten innerhalb der Reihe von 200°

und ebenso der von 100° hin. Sieht man, um mit den 200° -Versuchen zu beginnen, von den Versuchen 8 und 9, bei denen offenbar abweichende Verhältnisse vorherrschen, zunächst ab, so ist der Spielraum für die Biegungsgeschwindigkeiten immerhin noch sehr groß; noch auffallender ist aber, daß die Biegungsbelastung überaus verschieden ist und dabei ein Einfluß auf die Schnelligkeit der Biegung in keiner Weise sich geltend macht. Ähnlich liegen die Verhältnisse bei den Versuchen bei 100° , wenn auch die Unterschiede, besonders bei der Biegungsbelastung, nicht ganz so groß sind.

Eine Erklärung für diese Unregelmäßigkeiten liefert vielleicht die Beobachtung, daß die gespaltenen Stäbchen öfters gekrümmt sind, durch den Schlag also schon Verschiebungen stattgefunden haben, die die weitere Verschiebung günstig, in gewissen Fällen vielleicht aber auch ungünstig beeinflussen. Eine besonders günstige Beeinflussung muß jedenfalls für die Versuche 8 und 9 mit ihrer auffallend großen Biegungsgeschwindigkeit angenommen werden, ebenso bei den 100° -Versuchen für Versuch 20; umgekehrt läßt bei Versuch 1 die geringe Biegungsgeschwindigkeit im Vergleich mit der ungewöhnlich großen Belastung, die zur Erzielung einer Biegung erforderlich war, auf eine Erschwerung der Translation schließen.

In der Annahme, daß bei den Biegungserscheinungen die Gestalt des Querschnittes sich in irgend einer Weise abweichend von der Abhängigkeit der Bruchbelastung geltend mache, wurden bei 200° einige Versuche mit hohen Stäbchen, d. h. Stäbchen, die das Verhältnis Breite zur Höhe wie 1 : 2 hatten, angestellt. Wie die Tabelle zeigt (Versuch 5, 6, 7 und 8), machten sich weder in der Belastung noch in der Art und Weise der Biegung Unterschiede irgend welcher Art bemerkbar.

Ferner wurde versucht, das Maß der Biegungsgeschwindigkeiten bei höheren Temperaturen durch verstärkte Belastung auch bei niederen zu erreichen. Bei 6 Versuchen (1 bei 170° , 3 bei 150° , 2 bei 135° und 2 bei 120°) bewirkte tatsächlich eine durchschnittliche Biegungsbe-

lastung von 90% d. Bbl., mit Schwankung von 83—96 %, ähnliche Biegungsgeschwindigkeiten wie bei 200°. Es ergänzen sich mithin innerhalb gewisser, allerdings nicht sehr weiter Grenzen, höhere Temperatur und höhere Biegungsbelastung zur Erzielung gleicher Wirkungen.

Schließlich wurden noch einige Versuche bei niederen Temperaturen (70°—20°) angestellt. Vergleicht man die Ergebnisse dieser Versuche mit denjenigen bei höherer Temperatur, so tritt die vorwaltende Einwirkung der Temperatur auf die Nachgiebigkeit gegen Druck und besonders auf die Schnelligkeit der Biegung sehr stark hervor. Um in mehreren Stunden eine Biegung zu erhalten, mußten schon bei Temperaturen von 70° 100 % der berechneten Bruchbelastung stets überschritten werden. Selbst innerhalb von 25 Stunden konnte bei dieser Belastung nur eine Biegung von 0,19 mm erreicht werden. Die größte Biegung, die auf diesem Wege erhalten wurde, war 0,32 mm, und jeder Versuch endete mit Bruch. 30% der Stäbchen brachen, ohne eine Biegung zu zeigen, obwohl die Belastungszunahme sehr langsam erfolgte.

Erheblich günstiger gestalten sich die Verhältnisse für die Biegung, wenn man den Stäbchen mehr Zeit läßt. Für derartige Versuche wurde ein Stäbchen von 2,88 mm Breite und 1,25 mm Höhe, mithin mit einer Bruchbelastung von 103,8 Gramm, mit 73 % belastet, und der Apparat unter einer Glasglocke im Keller aufgestellt; die Feuchtigkeit wurde durch konzentrierte Schwefelsäure nach Möglichkeit ferngehalten. Innerhalb von 25 Tagen war keine Biegung zu beobachten; am 27. Tage vormittags 10 Uhr war eine Biegung von 2,18 mm zu verzeichnen.

Am 27. Tage nachm. 5 Uhr	betrug die Biegung				2,35 mm
„ 28. „ vorm. 10 „	„	„	„	„	2,48 mm
„ 28. „ nachm. 1 „	„	„	„	„	3,68 mm
„ 29. „ vorm. 10 „	„	„	„	„	4,64 mm

Eine Stunde später war Bruch eingetreten.

Man kann somit sagen, daß innerhalb ziemlich weiter Grenzen die Erhöhung der Temperatur für die Erzielung

einer bestimmten Biegung wesentlich beschleunigend wirkt; bei niederen Temperaturen kann eine entsprechende Biegung durch bedeutend längere Dauer der Einwirkung erzielt werden. Der angestellte Versuch zeigte dies für eine recht beträchtliche Biegung, wie die mitgeteilten Zahlen lehren.

Die zum Biegen mitunter ungeeignete Beschaffenheit der Begrenzungsflächen der Stäbchen, die sich in einem unregelmäßigen Verlauf der Biegung kundgab, sowie die verschiedenen Beanspruchungen, die die Stäbchen beim Spalten erfuhren, was besonders bei den Differenzen der Biegungsbelastung trotz gleicher Temperaturen zum Ausdruck kam, machten es notwendig, für die Hauptversuche Stäbchen von gleicher Beschaffenheit anzuwenden. Daher wurden geschliffene Stäbchen benutzt, die einerseits gleiche Behandlung erfahren und andererseits gleichbeschaffene Begrenzungsflächen haben mußten.

B. Versuche mit geschliffenen Stäbchen.

Obwohl die gespaltenen Stäbchen die Abhängigkeit der Plastizität von der Temperatur deutlich erkennen ließen, so legten doch die erwähnten Unregelmäßigkeiten im Verhalten dieser Stäbchen die Verpflichtung auf, zu versuchen, ob durch Abänderung der Herstellungsart der Stäbchen gleichmäßigere Ergebnisse zu erzielen seien. Es mußten ferner Versuche bei verschiedener Temperatur an Stäbchen von gleichem Querschnitt, ferner bei gleicher Temperatur an Stäbchen von verschiedenem Querschnitt und verschiedener Bruchbelastung und an solchen von gleicher Bruchbelastung aber verschiedenem Querschnitt angestellt werden. Schließlich mußte das Material zu den verschiedenen Versuchen möglichst einem Kristall entnommen werden.

Die größtmögliche Annäherung an ideale Versuchskörper war durch vorsichtiges Schleifen der Stäbchen aus einem großen, an sich durchaus homogenen und einschlußfreien Kristall zu erzielen; ein solcher lag in einem großen Spaltungsstück aus dem „Salinenwerk von Heilbronn“ vor.

Aus ihm wurde von dem optischen Institut Dr. Steeg und Reuter mit großer Sorgfalt eine beträchtliche Anzahl Stäbchen geschnitten und geschliffen. Der Querschnitt wurde für Bruchbelastungen von annähernd 100, 200, 300 und 400 Gramm berechnet. Die Oberfläche war zwar matt, d. h. nicht poliert, aber ausreichend glatt und, wie das Mikroskop zeigte, überall gleichmäßig. Die Dimensionen des Querschnitts waren bei dem

100 g-Stäbchen	ungefähr	2,00 mm	breit	1,50 mm	hoch		
200 „	„	2,10	„	2,00	„	„	„
300 „	„	3,34	„	2,00	„	„	„
500 „	„	2,84	„	2,50	„	„	„

Die Versuche wurden ausgeführt bei 200°, 150° und 100°. Da im Gegensatz zu den gespaltenen Stäbchen schon bei 100° oft Bruch ohne Biegung erfolgte und außerdem die Biegung sehr langsam vor sich ging, — oft war eine meßbare Biegung erst in mehreren Tagen zu erreichen —, so wurden Versuchsreihen bei Temperaturen unter 100° ausgeschlossen. Die Anfangsbelastung wurde je nach der Temperatur verschieden bemessen: gewöhnlich betrug sie bei 200° 30—40%, bei 150° 50—60% und bei 100° 70—80% der Bbl. Bei den meisten Versuchen wurde nach Ablauf einer Viertelstunde die Belastung gesteigert und die Zuführung der betreffenden Menge Schrotkörner auf eine Minute verteilt. In bestimmten Fällen ließ ich die Belastung langsamer anwachsen, um zu sehen, ob bei längerer Einwirkung vielleicht schon bei einer geringeren Belastung eine Biegung zu erzielen sei. Bei der Besprechung der einzelnen Versuchsgruppen soll hierauf noch näher eingegangen werden. Vor jedem Versuch wurde der Ofen erwärmt, um die Feuchtigkeit aus den Asbestplatten zu entfernen, damit sie nicht auf das Stäbchen während des Versuches wirken konnte; nach dem Schließen des Ofens wurde gewöhnlich in einer Stunde die gewünschte Temperatur erreicht. Die Belastung erfolgte auch hier durch feines Schrot, da sich dieses Verfahren bei den Vorversuchen bewährt hatte; das Schrot wurde vorher

in kleinen Gläschen zu 5% d. Bbl. abgewogen und floß langsam, im Laufe von ungefähr einer Minute, auf die Schale, wobei Stöße und Schwingungen nach Möglichkeit vermieden wurden. In keinem Falle führte diese Art, die Belastung zu vermehren, zu irgend einer Störung; sowohl Biegung wie Bruch erfolgten in den meisten Fällen einige Zeit nach der Belastung und waren daher nicht der Art der Zuführung zuzuschreiben.

a. Versuche bei 200°.

Bei 200° wurden 11 Versuche angestellt; die Daten für sie sind in folgender Tabelle vereinigt.

Tabelle II. (Tafel III und IV.)

Versuch Nr.	Dimensionen des Querschnitts Breite-Höhe mm	Entfernung der Unterstützungs- schneiden mm	Bruch- belastung g	Biegungs- belastung ‰ d. Bbl.	Größe der Gesamt- biegung mm	Zeit der Gesamt- biegung St. u. Min.	Biegungs- geschwindig- keit I. g	Zeit der ersten sichtbaren Biegung Min.	Biegungs- geschwindig- keit II. g	Ende des Ver- suches wegen
1	1.97—1.47	30.3	98.3	70.0	6.65	40 ¹ / ₂ '	0.16	17'	0.28	} Abgleitens
2	1.98—1.50	30.3	102.9	70.0	8.84	33'	0.27	8'	0.35	
3	2.04—1.52	30.3	108.9	70.0	9.29	38 ¹ / ₂ '	0.24	5'	0.28	
4	2.09—2.00	30.3	193.1	65.0	4.84	26'	0.19	4'	0.22	
5	2.10—2.00	30.3	194.0	70.0	11.67	42'	0.24	1'	0.24	
6	2.39—1.91	30.5	200.1	70.0	7.93	31'	0.26	1'	0.26	
7	3.34—2.04	30.3	321.1	65.0	1.68	3'	—	—	—	Bruch
8	3.34—2.03	30.3	318.0	60.0	12.64	62'	0.20	5'	0.22	} Ab- gleitens
9	3.32—2.00	30.3	306.8	63.5	10.26	3 ^h 10 ¹ / ₂ '	0.05	6'	0.05	
10	2.84—2.50	30.3	410.1	63.0	13.74	2 ^h 50 ³ / ₄ '	0.08	9'	0.08	
11	2.87—2.50	30.3	414.4	60.0	9.23	3 ^h 49'	0.04	10'	0.04	

Von diesen Versuchen muß 7 wegen Bruches, der nach einer geringen Biegung erfolgte und wohl auf einen Fehler im Stäbchen selbst zurückzuführen ist, ausgeschaltet werden. Die verschiedene Größe der Gesamtbiegung ist wohl von der Art des Gleitens auf den Schneiden abhängig: wenn das Stäbchen gleichmäßig auf beiden Seiten glitt, konnte naturgemäß eine stärkere Biegung erfolgen.

Die Biegung vollzog sich sehr gleichmäßig, wie der Verlauf der Kurven zeigt (Tafel III und IV); die Ergebnisse konnten nicht in einer Tafel zusammengefaßt werden, weil durch das Zusammentreffen vieler Linien das Bild für die ersten Stadien der Biegung unklar wurde. Auch die Biegungsbelastung bewegte sich für alle diese Versuche in verhältnismäßig engen Grenzen. Ebenso regelmäßig erfolgte die erste sichtbare Biegung von 0,1 Skalenteil innerhalb 1—17 Minuten.

Die drei ersten Versuche mit 100 g-Stäbchen erfolgten bei gleicher Biegungsbelastung (70 %) in ungefähr gleicher Zeit fast gleichstark. Dabei war die Zeit, in der vom Beginn des Versuches an die Biegungsbelastung erreicht wurde, sehr verschieden. Die Anfangsbelastung wurde bei Versuch 1 in Zwischenräumen von 15 Minuten, bei 2 in Zwischenräumen von 30 Minuten um je 5 % bis zum Eintritt der Biegung gesteigert, und bei dem Versuch 3 wirkte eine Belastung von 65 % sogar 2 $\frac{1}{2}$ Stunde, ohne daß eine merkliche Biegung eintrat. Als bei diesem Versuch die Belastung auf 70 % gesteigert wurde, trat schon nach 5 Minuten eine sichtbare Biegung ein.

Die Versuche 4, 5 und 6 beziehen sich auf 200 g-Stäbchen; sie unterscheiden sich weder in der Art noch in der Zeit der Biegung von den 100 g-Stäbchen; nur in einem Falle (4) war die Biegungsbelastung um 5 % kleiner als bei der ersten Gruppe. Hingegen war bei den folgenden Versuchen bei 300- und 400 g-Stäbchen die Biegungsbelastung stets unter 65 % d. Bbl. Als Folge der schwächeren Belastung ist wohl die bedeutend langsamere Biegung anzusehen, die besonders die drei letzten Versuche aufweisen, wie einerseits die Kurven auf Tafel IV erkennen lassen, andererseits die Biegunsgeschwindigkeit innerhalb einer Minute nach der ersten sichtbaren Biegung in der Tabelle zum Ausdruck bringt. Führen wir auf der Tafel die Kurven bis zu ihrem Anfangspunkt zurück, so ist bei fast jeder für die erste sichtbare Biegung (0,1 Skalenteil = 0,065 mm) eine weitaus größere Zeit gebraucht, wie für dieselbe Biegungsgröße im weiteren Verlauf. Da nun

dieser Umstand für die Biegungsgeschwindigkeit sich sehr stark geltend macht, müssen wir zwei Geschwindigkeiten aufstellen, und zwar Biegungsgeschwindigkeit I, bezogen auf die Größe und Zeit der Gesamtbiegung, und Biegungsgeschwindigkeit II, berechnet aus der Biegung und der Zeit nach Eintritt der ersten sichtbaren Biegung (0,1 Skalenteil). Dieser Unterschied mußte gemacht werden, da bei den meisten Versuchen für die erste sichtbare Biegung — besonders bei Versuchen bei niederen Temperaturen — eine bedeutend größere Zeit nötig war als eine gleichstarke Biegung im späteren Verlauf des Versuches in Anspruch nahm. Als Maß für die Plastizität ist aber Biegungsgeschwindigkeit II besser geeignet, da sie uns die Hauptrichtung der Kurve erkennen läßt. Bei dickeren Stäbchen erweist sich auch hier die Biegungsbelastung kleiner als bei den dünneren.

Fassen wir nun Versuch 1—6 einerseits und 8—11 andererseits zusammen, so ergibt sich für die erste Gruppe bei einer durchschnittlichen Biegungsbelastung von 70 % d. Bbl. in 1 Minute eine Durchbiegung von 0,27 mm und für die zweite Gruppe bei einer Biegungsbelastung von 61,5 % in 1 Minute eine Durchbiegung von 0,11 mm, wobei allerdings zu bemerken ist, daß der Wert von Versuch 8 beträchtlich nach oben abweicht.

Zur Ergänzung des Gesagten und der Kurven sollen zwei typische Versuche dienen (Versuch 5 und 11). Bei beiden war die Anfangsbelastung, mit der das Stäbchen auf den Schneiden ausgerichtet und der Ofen geschlossen wurde, 30 % d. Bbl., die Belastungszunahme erfolgte regelmäßig mit 5 % in Zwischenräumen von 15 Minuten. In der ersten Vertikalreihe ist die Zeit in Minuten angegeben, die seit dem Zuführen der letzten 5 % Belastung verstrichen ist, während in der zweiten Reihe die Biegung in mm verzeichnet ist, die in dieser Zeit erfolgte.

Versuch 5. (Tabelle II.)

Zeit in Minuten	Biegung in mm	Zeit in Minuten	Biegung in mm	Zeit in Minuten	Biegung in mm	Zeit in Minuten	Biegung in mm
0	0	11	1.48	22	5.00	32	7.35
1	0.06	12	1.87	23	5.35	33	7.61
2	0.13	13	2.19	24	5.55	34	7.93
4	0.19	14	2.52	25	5.87	35	8.19
5	0.26	15	2.84	26	6.10	36	8.58
6	0.32	16	3.16	27	6.32	37	8.83
7	0.39	17	3.48	28	6.58	38	9.29
8	0.58	18	3.87	29	6.71	39	9.87
9	0.77	19	4.06	30	6.90	40	10.32
10	1.10	20	4.32	31	7.16	41	10.97
		21	4.64			42	11.67

(Ende wegen Abgleitens der Enden von den Schneiden).

Versuch 11. (Tabelle II.)

Zeit in Minuten	Biegung in mm	Zeit in Minuten	Biegung in mm	Zeit in Minuten	Biegung in mm	Zeit in Minuten	Biegung in mm
0	0	33	2.06	55	3.61	18	6.06
10	0.06	34	2.13	59	3.81	20	6.13
14	0.13	35	2.19	1 ^h 10	4.32	21	6.19
17	0.19	36	2.26	15	4.45	22	6.26
19	0.26	37	2.33	22	4.64	24	6.32
20	0.32	38	2.52	27	4.84	26	6.39
21	0.45	39	2.58	30	4.90	32	6.45
22	0.52	40	2.64	34	5.01	33	6.51
23	0.65	41	2.71	39	5.16	36	6.58
24	0.71	42	2.77	45	5.32	40	6.64
25	0.81	43	2.84	50	5.42	44	6.71
26	0.90	44	2.90	57	5.61	45	6.77
27	1.16	45	3.03	58	5.68	46	6.90
28	1.29	48	3.23	59	5.74	3 ^h 9	7.55
29	1.48	49	3.29	2 ^h 0	5.81	(Ende wegen Abgleitens der Enden von den Schneiden).	
30	1.61	50	3.35	4	5.87		
31	1.74	52	3.42	8	5.94		
32	1.94	53	3.48	15	6.00		

b. Versuche bei 150°.

Bei 150° wurden 10 Versuche angestellt.

Tabelle III. (Tafel V.)

Versuch Nr.	Dimensionen des Querschnitts Breite-Höhe mm	Entfernung der Unterstützungs- schneiden mm	Bruch- belastung g	Biegungs- belastung ‰ d. Bbl.	Größe der Gesamtbiegung mm	Zeit der Gesamt- biegung St. u. Min.	Biegungs- geschwindig- keit I. Min.	Zeit der ersten sichtbaren Biegung Min.	Biegungs- geschwindig- keit II. Min.	Ende des Versuches wegen:
1	1.95—1.51	30.5	102.0	80	0.45	5 ^h 26'	0.001	4 ^h 10'	0.005	Bruch
2	2.00—1.51	„	104.6	80	0.45	3 ^h 42½'	0.002	1 ^h 45'	0.003	„
3	2.01—1.50	„	103.8	85	8.64	18 ^h 28½'	0.008	29'	0.008	Abgleitens
4	1.98—1.51	„	103.6	85	0.58	2 ^h 35'	0.004	2 ^h 0'	0.015	Bruch
5	2.00—1.50	„	103.3	80	7.74	11 ^h 45'	0.011	3 ^h 30'	0.016	abgebr. z. opt. Unters.
6	2.00—1.51	„	104.6	80	0.26	2 ^h 5'	0.002	35'	0.002	Bruch
7	1.98—1.50	„	102.3	80	0.65	1 ^h 0'	0.011	40'	0.029	„
8	3.33—2.00	„	305.7	75	7.16	10 ^h 7½'	0.012	24'	0.012	Abgleitens
9	3.33—2.03	„	314.9	70	0.32	22'	0.015	14'	0.040	Bruch
10	2.87—2.50	„	411.7	70	1.81	1 ^h 13'	0.025	20'	0.033	„

Von 7 Stäbchen mit 100 g Bruchbelastung (Versuch 1—7) betrug die Biegungsbelastung in 5 Fällen 80 % d. Bbl.; sie ist somit um 10 % größer als bei 200°. Auch lassen die Versuche eine erhebliche Abnahme der Plastizität erkennen: von 10 Versuchen führten 7 nach verhältnismäßig schwacher Biegung zum Bruch, und beide Biegungsgeschwindigkeiten sind bei allen Versuchen erheblich geringer als bei 200°. Die Höhe der Biegungsgeschwindigkeit, wie sie die Versuche bei 200° aufweisen, konnte nicht erreicht werden. Bei den Versuchen 3, 5 und 8 erreichte die Biegung zwar die gleiche Stärke wie bei den 200°-Versuchen, aber es war hierfür die 40fache Zeit erforderlich. Die Versuche, die nach geringer Zeit mit Bruch enden, zerfallen nach der Biegungsgeschwindigkeit I in zwei Gruppen. Die eine zeigt eine geringere Biegungsgeschwindigkeit (Versuch 1, 2, 4, 6), als die Stäbchen, die eine starke Biegung ausgehalten haben (Versuch 3, 5 und 8). Die zweite Gruppe ist durch verhältnismäßig große Biegungsgeschwindigkeit ausgezeichnet. Bei der Biegungsgeschwindigkeit II. tritt

dieselbe Gruppe ebenfalls durch ganz besonders große Werte hervor. Dies deutet auf ein plötzliches Emporschnellen der Kurve nach einer Biegung von 0,1 Skalenteil (siehe Tafel V). Bei den übrigen Versuchen verlaufen die Kurven flacher. Die Biegungsbelastung ist bei den dickeren Stäbchen auch hier merklich kleiner als bei den dünneren.

Da die erste sichtbare Biegung nach langer Zeit erfolgte, mußte die Belastungszunahme langsamer vollzogen werden. Versuch 2. und 6. zeigten mit 75 % d. Bbl. innerhalb von 2 Stunden keine Biegung; diese erfolgte erst bei einer Belastung von 80 % und zwar bei 2. nach einer Stunde 45 Minuten und bei 6. nach 35 Minuten. Bei den ganzen Versuchen wurde mit einer durchschnittlichen Biegungsbelastung von 80 % in 1 Minute eine Biegung von 0,012 mm erzielt. Als Beispiel für diese Reihe folgt ein Versuch, bei dem das Stäbchen nach geringer Belastung brach, und ein zweiter, der nach 1 Stunde eine sehr starke Biegung erreichte.

Versuch 4 (Tabelle III).

Zeit der Biegung	Biegung in mm	Zeit der Biegung	Biegung in mm
0 ^h 0'	0.00	2 ^h 23'	0.32
2 ^h 0'	0.06	27'	0.38
8'	0.13	30'	0.45
14'	0.19	33'	0.52
19'	0.26	35'	0.58
		(Ende wegen Bruch)	

Versuch 5. (Tabelle III).

Zeit der Biegung	Biegungsgröße in mm	Zeit der Biegung	Biegungsgröße in mm	Zeit der Biegung	Biegungsgröße in mm
0 ^h 0'	0.00	6 ^h 12'	1.29	10 ^h 55'	6.39
3 ^h 30'	0.06	17'	1.36	11 ^h 5'	6.58
4 ^h 15'	0.13	22'	1.42	15'	6.81
35'	0.19	28'	1.48	25'	7.10
43'	0.26	33'	1.55	35'	7.35
50'	0.32	39'	1.61	45'	7.74
5 ^h 1'	0.38	7 ^h 24'	2.26	(Versuch abgebrochen)	
7'	0.45	28'	2.32		
13'	0.51	45'	2.64		
19'	0.58	49'	2.71		
26'	0.65	8 ^h 10'	3.03		
31'	0.71	30'	3.35		
36'	0.77	52'	3.61		
42'	0.84	9 ^h 9'	4.00		
47'	0.90	39'	4.45		
52'	0.97	10 ^h 5'	5.10		
55'	1.03	15'	5.39		
59'	1.10	24'	5.72		
6 ^h 3'	1.16	35'	5.93		
7'	1.23	45'	6.13		

c. Versuche bei 100°.

Bei 100° wurden 11 Versuche angestellt. Da hier erhebliche Belastungen, stets über 80 %, erforderlich waren, wurde den Stäbchen nach jeder erforderlichen Vermehrung der Belastung hinlänglich Zeit zur Biegung gelassen; je 5 % d. Bbl. wurden in 1—5 Stunden zugefügt. Trotzdem konnte nur in 4 Fällen eine sichtbare, größere Biegung erreicht werden; in den meisten Fällen trat schon zwischen 85 und 90 % Bruch ohne Biegung ein. Die beobachteten Versuche waren folgende.

Versuch 1. Tabelle IV. (Tafel VI.)

Dimensionen des Stäbchens: (2.00 mm — 1.52 mm) Entfernung der
Schneiden 30.5 mm Bruchbelastung 106.1 g Biegungsbelastung 95%

Belastung :

Biegung bei der Belastung von 95%:

Belastung:			Biegung bei der Belastung von 100 %:			
			Zeit	Bieungsgröße	Zeit	Bieungsgröße
Anfangsbelastung	80 %					
nach	1 ^h 0'	85 %	0 ^h 0'	0.000	2 ^h 0'	0.194
„	3 ^h 0'	90 %	1 ^h 0'	0.065	2 ^h 20'	0.258
„	5 ^h 0'	95 %	1 ^h 30'	0.129	2 ^h 28'	0.323
			(Ende wegen Bruch)			

Versuch 2.

Dimensionen des Stäbchens: (2.88 mm — 2.52 mm) Entfernung der
Schneiden 30.5 mm Bruchbelastung 419.7 g Biegungsbelastung 80%

Belastung:		Biegung bei der Belastung von 80 %:	
		Zeit	Biegungsgröße
Anfangsbelastung	70 %		
nach 1 ^h	75 %	0 ^h 0'	0.000
„ 2 ^h	80 %	5 ^h 0'	0.065
		6 ^h 30'	0.129
		8 ^h 30'	0.194
		9 ^h 0'	0.258
		9 ^h 3'	(Ende wegen Bruch)

In beiden Fällen trat ohne äußere Veranlassung nach kurzer Biegung Bruch ein. Erwähnenswert ist vielleicht die Tatsache, daß auch hier das dickere Stäbchen bei geringerer Belastung sich biegt, als das dünnere.

Die folgenden beiden Versuche nahmen mehrere Tage in Anspruch; während dieser Zeit schwankte die Temperatur um $\pm 5^{\circ}$.

Versuch 3.

Dimensionen des Stäbchens: (2.00 mm — 1.50 mm) Entfernung der
Schneiden 30.5 mm Bruchbelastung 103.3 g Biegungsbelastung 85%

Zeit an dem betreffenden Tage	1. Tag	Biegungsgröße
	Belastung	
2 ^h 45' p. m.	65 %	0
3 ^h 0' „ „	70 %	0
3 ^h 15' „ „	75 %	0
3 ^h 30' „ „	80 %	0
	2. Tag	
7 ^h 30' a. m.	85 %	0
	3. Tag	
8 ^h 0' p. m.		0.032 mm
	4. Tag	
8 ^h a. m.		0.065 mm
7 ^h p. m.		0.126 „
12 ^h „ „		0.161 „
	5. Tag	
7 ^h 30' a. m.		0.968 mm
8 ^h 10' „ „		1.032 „
8 ^h 45' „ „		1.097 „
9 ^h 15' „ „		1.161 „
9 ^h 40' „ „		1.226 „
9 ^h 56' „ „		1.258 „
		(Ende wegen Bruch)

Versuch 4.

Dimensionen des Stäbchens (2.87 mm — 2.51 mm) Entfernung der
Schneiden 30.5 mm Bruchbelastung 415.0 g Biegungsbelastung 85%

1. Tag			(2. Tag)	
11 ^h a. m.	75 %	} Be- lastung	Zeit	Größe
12 ^h „ „	80 %		4 ^h 30'	0.903 mm
3 ^h p. m.	85 %		5 ^h 30'	0.968 „
Biegung			6 ^h 30'	1.032 „
Zeit		Größe	8 ^h 30'	1.097 „
3 ^h p. m.	0.000 mm		10 ^h 30'	1.161 „
5 ^h 15'	0.065 „		12 ^h 30'	1.226 „
6 ^h 15'	0.129 „		3. Tag	
7 ^h 30'	0.194 „		8 ^h a. m.	1.290 „
8 ^h 30'	0.258 „		12 ^h „ „	1.484 „
9 ^h 30'	0.323 „		2 ^h p. m.	1.548 „
10 ^h 30'	0.388 „		8 ^h „ „	1.677 „
12 ^h 30'	0.452 „		10 ^h „ „	1.742 „
2 ^h 30'	0.517 „		4. Tag	
2. Tag			9 ^h a. m.	1.871 „
9 ^h 30' a. m.	0.645 mm		3 ^h p. m.	1.935 „
12 ^h „ „	0.709 „		9 ^h „ „	1.867 „
2 ^h 30' p. m.	0.774 „		(Versuch abgebrochen)	
3 ^h 30' „ „	0.839 „			

Der letzte Versuch wurde abgebrochen, da einerseits die Biegung, andererseits der sehr langsame Verlauf der Biegung ausreichend nachgewiesen war.

Im Vergleich mit den Versuchen bei 150° war bei diesen keine erhebliche Zunahme der Biegungsbelastung erforderlich, wohl aber machte sich eine sehr beträchtliche Verlangsamung der Biegung geltend, wie besonders Versuch 3. und 4. zeigen. Die Belastung bei Versuch 1. ist hoch (95%); eine Folge davon ist wohl einerseits die größere Schnelligkeit der Biegung, andererseits der vorzeitige Bruch. Für die Biegungsgeschwindigkeit in 1 Minute ergibt sich 0.0006 mm, ein Wert, der im Verhältnis zu den 200°- und 150°-Versuchen als überaus klein bezeichnet werden kann.

Der Unterschied im Verhalten gespaltener und geschliffener Stäbchen bei 100° war so auffallend — gespaltene Stäbchen bogen sich in einer Stunde um mehr

als 6.45 mm und Brüche ohne Biegung traten niemals ein, während geschliffene Stäbchen für kleinere Biegungen mehrere Tage brauchten, wenn das Stäbchen nicht überhaupt, ohne eine Biegung gezeigt zu haben, durchbrach, — daß man an eine Änderung des stark beanspruchten Apparates denken mußte. Es wurden daher zwischen die Versuche mit geschliffenen Stäbchen solche mit gespaltenen Stäbchen eingeschaltet; da sie ausnahmslos in der gleichen Weise verliefen, wie die Vorversuche, war festgestellt, daß diese Unterschiede Veränderungen am Apparat nicht zuzuschreiben sind.

c. Verhalten der Stäbchen von verschiedenem Querschnitt und bei gleicher Bruchbelastung.

Alle Biegungsversuche wurden auf Bruchbelastung bezogen; es mußte daher geprüft werden, ob tatsächlich Bruchbelastung und Biegungsbelastung von der Gestalt des Querschnitts in gleicher Weise abhängig waren. Für extreme Fälle war eine derartige Annahme von vornherein unwahrscheinlich; die Prüfung mußte sich hauptsächlich auf den Einfluß bei Querschnitten von nicht zu sehr abweichenden Seitenlängen beziehen.

Es wurden daher 2 Reihen Stäbchen von annähernd gleicher Bruchbelastung (ungefähr 200 g) parallel den Würfelflächen geschliffen; die 1. Reihe mit 2.39 mm Breite und 1.90 mm Höhe, — im folgenden als breite Stäbchen bezeichnet — und die 2. Reihe mit 1.52 mm Breite und 2.39 mm Höhe — im folgenden als hohe Stäbchen bezeichnet. Die Versuche wurden bei 200° angestellt, damit mit Sicherheit eine größere Biegung zu erwarten war.

Ein Versuch mit einem breiten Stäbchen zeigte bei 70 % der Bbl. als Biegungsbelastung in 31 Minuten eine Biegung von 7.93 mm. In der Minute betrug die Biegung mithin 0.256 mm, der Versuch ließ sich daher in unsere bereits behandelte Gruppe sehr gut einordnen und wurde auch in die Tabelle aufgenommen (Tabelle II, Versuch 6). Die drei Versuche mit den hohen Stäbchen ergaben genau übereinstimmende Werte, sowohl für Biegungsbelastung

wie für Art und Größe der Biegung; zum Vergleich wird in der folgenden Tabelle an letzter Stelle der entsprechende Versuch mit dem breiten Stäbchen hinzugefügt.

Versuch Nr.	Biegungs- belastung	Größe der Gesamtbiegung	Zeit der Gesamtbiegung	Biegungs- geschwindigkeit	Ende
1	70%	4.19	23 ^h 0'	0.003	abgebrochen
2	70%	4.13	23 ^h 15'	0.003	"
3	70%	2.84	22 ^h 40'	0.002	"
4	70%	7.93	31'	0.256	abgleiten

Die Biegung erfolgt mithin bei den hohen Stäbchen unverhältnismäßig viel langsamer als bei den breiten; Versuch 3 zeigte in den letzten 10 Stunden nur noch eine Biegung von 0,1 Skalenteil, sodaß wegen der Langsamkeit der Versuch abgebrochen wurde. Nicht ganz so stark aber immerhin bemerkbar ist die Abnahme der Biegungsschnelligkeit am Ende der beiden anderen Versuche 1. und 2. Auch hier zeigte sich ein eigentümlicher Unterschied zwischen gespaltenen und geschliffenen Stäbchen. Bei gespaltenen Stäbchen verhielten sich hohe und breite annähernd gleich, wie Tabelle I und die zugehörigen Kurven erkennen lassen. Versuch 3. und 4. zeigen in der folgenden Tabelle deutlich die hervorgehobenen Unterschiede.

Versuch 3. (hohes Stäbchen).

Dimensionen des Stäbchens (1.51—2.29) Bruchbelastung 197.9

Biegungsbelastung 70%.

Zeit:	Biegung:	Zeit:	Biegung:
0'	0.00 mm	2 ^h 3'	1.29 mm
11'	0.07 „	3 ^h 17'	1.67 „
20'	0.13 „	35'	1.74 „
30'	0.19 „	57'	1.80 „
37'	0.26 „	4 ^h 16'	1.87 „
43'	0.32 „	26'	1.94 „
50'	0.38 „	40'	2.00 „
60'	0.45 „	5 ^h 4'	2.06 „
1 ^h 5'	0.51 „	32'	2.13 „
9'	0.58 „	9 ^h 35'	2.52 „
15'	0.65 „	11 ^h 0'	2.64 „
20'	0.71 „	12 ^h 30'	2.77 „
25'	0.77 „	22 ^h 40'	2.84 „
30'	0.83 „	(Versuch abgebrochen)	

Versuch 4. (breites Stäbchen).

Dimensionen des Stäbchens (2.39—1.91) Bruchbelastung 200.1 g

Biegungsbelastung 70%.

Zeit:	Biegung:	Zeit:	Biegung:
0'	0.00 mm	16'	3.48 mm
1'	0.07 „	17'	3.68 „
2'	0.16 „	18'	3.87 „
3'	0.39 „	19'	4.00 „
4'	0.65 „	20'	4.13 „
5'	1.16 „	21'	4.32 „
6'	1.42 „	22'	4.25 „
7'	1.74 „	23'	4.77 „
8'	2.00 „	24'	5.03 „
9'	2.19 „	25'	5.35 „
10'	2.45 „	26'	5.74 „
11'	2.64 „	27'	6.13 „
12'	2.84 „	28'	6.43 „
13'	3.03 „	29'	7.03 „
14'	3.23 „	30'	7.42 „
15'	3.35 „	31'	7.93 „
(Versuch abgebrochen)			

C. Die optischen Erscheinungen bei gebogenen Stäbchen.

Die Oberflächen der gebogenen Stäbchen zeigen vielfach, wenn auch in Folge der geringen Biegung mitunter schwächer ausgeprägt, den unbewaffneten Augen, besser noch bei mikroskopischer Betrachtung, die auf Translation hinweisenden Streifungen, wie sie Milch (N. J. d. M. 1909 I. S. 60) beschrieben hat; bei starken Biegungen finden sich die sich kreuzenden Systeme, wobei die einzelnen, wie l. c. angegeben, oft einen deutlich geschwungenen Verlauf besitzen.

Auf die weite Entfernung von der Schmelzkurve, bei der die Biegungen ausgeführt wurden, ist wohl die sehr deutliche Entwicklung optischer Störungen zurückzuführen, die unter dem Polarisationsmikroskop zwischen gekreuzten Nicols am besten nach Einschiebung eines Gipsblättchens, für sich das Rot erster Ordnung zeigend, hervortreten. Hierbei lassen sich verschiedene Erscheinungen feststellen. Bezeichnet man die großen das Prisma begrenzenden Flächen mit (001) und (100) und läßt den Druck senkrecht auf (001) und parallel (010) wirken, so zeigen sich, wenn man das Stäbchen auf (100) legt, in bestimmten Stellungen des Stäbchens in der Mitte dieser Fläche stark doppelbrechende Streifen, die meistens durch das ganze Stäbchen verlaufen und sich der Deformation des gebogenen Stäbchens anpassen. In der Mitte waren die doppelbrechenden Streifen breiter und die Doppelbrechung stärker als an den Enden. Die Erscheinung kommt dadurch zu Stande, daß durch die Verschiebungen im Stäbchen sich Lamellen nach einer Rhombendodekaederfläche bilden, deren Längsrichtungen abwechselnd Richtung größerer und kleinerer Elastizität sind. Von der Mittellinie nach der (konkaven) Angriffsseite der Belastung zu wiegen die optisch negativen, nach der konvexen Seite die optisch positiven Lamellen vor; demgemäß erscheint in bestimmten Stellungen der mittlere Teil des Stäbchens bei Anwendung eines Gipsblattes nach der konkaven Seite entgegengesetzt gefärbt wie nach der konvexen. Kreuzen sich die Lamellen-

züge, so wird die Erscheinung wesentlich komplizierter, doch kommt auch hier die entgegengesetzt gefärbte Mittelzone häufig dadurch zu Stande, daß in der einen Richtung von der Mittellinie aus der eine Lamellenzug, in der anderen Richtung der senkrecht auf dem ersten stehende Lamellenzug vorherrscht. In anderen Fällen wurde jedoch durch Vorherrschen eines Lamellenzuges in den die Mittellinie beiderseitig begrenzenden Teilen eine mehr fleckige Färbung beobachtet. Alle diese Erscheinungen sind am deutlichsten in dem stärkstgebogenen Teil des Stäbchens, um die Angriffsstelle der Belastung herum, ausgeprägt; von der Angriffslinie der Belastungsschneide aus sind immer, wenn auch mit wechselnder Deutlichkeit, 2 aufeinander senkrecht stehende, besonders breite Lamellen zu beobachten auch dort, wo sonst nur ein Lamellenzug auftritt. Treten 2 Lamellenzüge auf, so sind sie in dem von den Schenkeln dieses rechten Winkels umschlossenen Gebiet am deutlichsten entwickelt.

D. Zusammenfassung.

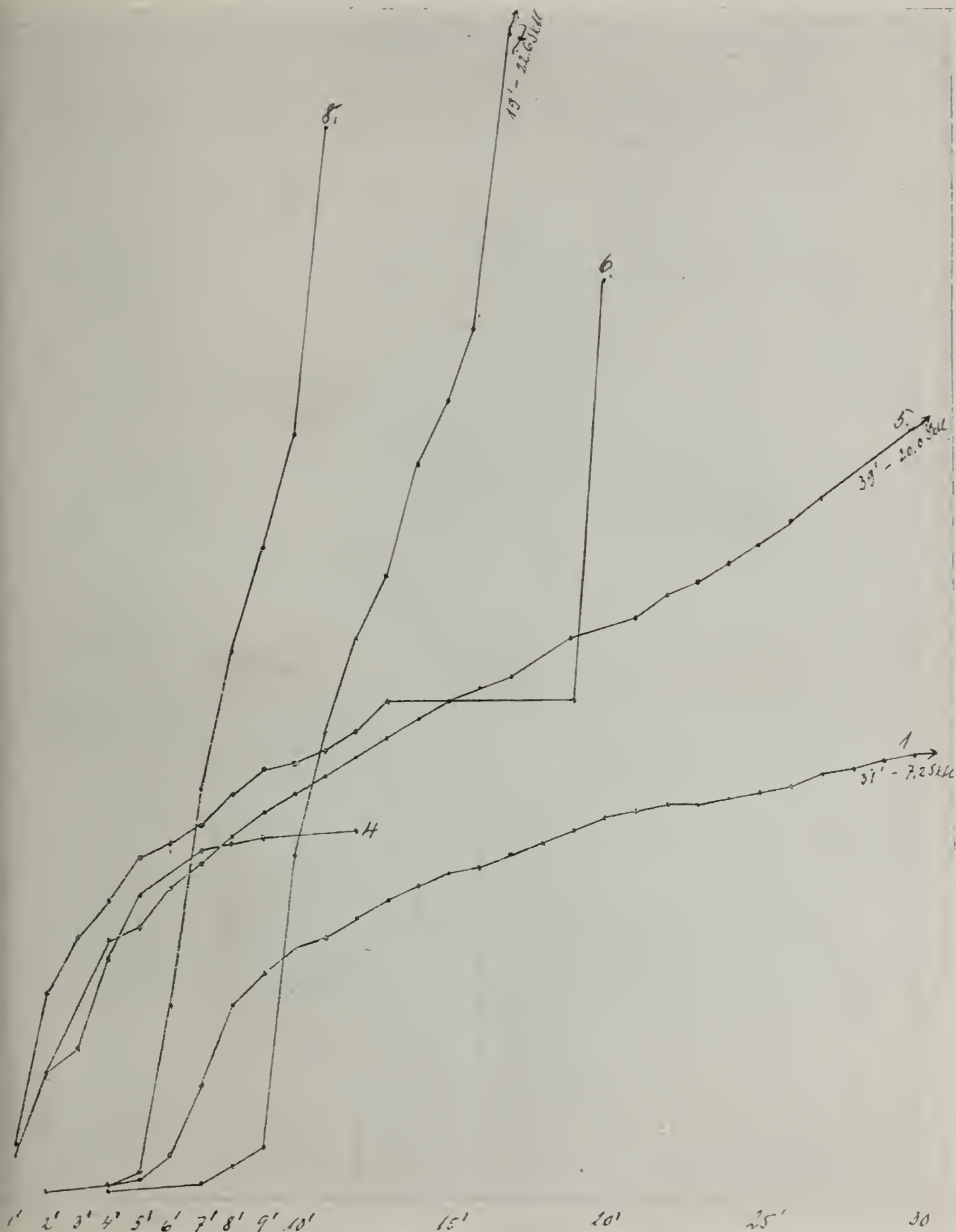
Der verschiedene Verlauf der Biegungen bei verschiedener Temperatur und das abweichende Verhalten der gespaltenen und geschliffenen Stäbchen ist in der Tafel VII dargestellt; aus jeder Versuchsreihe wurden charakteristische Versuche ausgewählt. Die Biegungen wurden hier, wie auch in den anderen Tafeln, in Skalenteilen (1 Skalenteil = 0.645 mm) eingetragen. Die Kurven der bei 200°, 150° und 100° mit geschliffenen Stäbchen angestellten Versuche zeigen deutlich die mit der erhöhten Temperatur zunehmende Plastizität, und jede Reihe läßt, für sich betrachtet, wenn man die unvermeidlichen Fehlerquellen berücksichtigt, einen überraschend gleichmäßigen Verlauf der Kurven erkennen. Die Abweichung von 9 II und 11 II erscheint nur in Folge der Wahl der Einheiten verhältnismässig bedeutend, und diese Kurven unterscheiden sich auch bei der die Unterschiede stark betonenden Art der Darstellung scharf von den für 150° charakteristischen Kurven.

Der Unterschied im Verhalten der gespaltenen und geschliffenen Stäbchen wird bei niederen Temperaturen besonders deutlich. Bei 200° ist das Verhalten noch recht ähnlich — bei dieser Temperatur biegen sich auch die geschliffenen Stäbchen sehr schnell, doch steigt bei gespaltenen die Kurve noch steiler an. Bei 150° aber macht sich ein sehr bedeutender Unterschied geltend, da sich gespaltene Stäbchen bei dieser Temperatur ganz ähnlich wie bei 200° verhalten, während geschliffene Stäbchen sich viel langsamer biegen. Hier macht sich auch das verschiedene Verhalten in der Häufigkeit des Bruches und der geringen erreichten Biegung der geschliffenen Stäbchen deutlich geltend. Dieser Unterschied erklärt sich, wie oben ausgeführt, vielleicht durch 2 Beobachtungen: durch die Spaltung wird vielfach eine Krümmung angeregt, da viele Spaltungsstäbchen sich direkt als merklich gekrümmt nachweisen ließen und zweitens fand bei der Herstellung von Stäbchen durch Spaltung offenbar eine Auslese statt. Stellt man nämlich durch Spaltung Stäbchen her, so ist die Zahl der für den Versuch brauchbaren Stäbchen recht gering: aus einem Würfel, der mit Leichtigkeit durch Schleifen 15 für die Versuche geeignete Stäbchen lieferte, gelang es mir durch Spalten höchstens 4 Stäbchen herzustellen, die für die Versuche lang genug waren; die übrigen zerbrachen beim Spalten. Es bleiben somit offenbar nur die für eine Biegung geeigneten Stäbchen übrig; die anderen widerstehen der Erschütterung beim Spalten nicht: man kann somit annehmen, daß bei den hier zu Versuchen verwendeten gespaltenen Stäbchen der Widerstand gegen die Biegung in viel höherem Grade als bei den geschliffenen schon überwunden ist. Zu dem bei geschliffenen Stäbchen häufig zu beobachtenden Bruch geben wohl auch die feinen, beim Schleifen unvermeidlichen Risse in den Oberflächenschichten Veranlassung. Auf das zu den Versuchen benutzte Material der Stäbchen ist das verschiedene Verhalten sicher nicht zurückzuführen, da es zum großen Teil aus einem Steinsalzwürfel hergestellt wurde.

Bei den Hauptversuchen mit geschliffenen Stäbchen ist, wenn man Durchschnittswerte berechnet, mit fallender

Temperatur 200° — 150° — 100° eine regelmäßige Zunahme der Biegungsbelastung zu beobachten und zwar bei 200° — 70 % der Bbl., 150° — 80 % der Bbl. und 100° — 90 % der Bbl., wobei als Biegungsbelastung hier bekanntlich die zur Wahrnehmung einer Biegung in verhältnismäßig kurzer Zeit — 15 Minuten bis 4 Stunden — notwendige Belastung bezeichnet wird. Trotz dieser höheren Belastung nimmt die Biegungsgeschwindigkeit mit sinkender Temperatur, innerhalb der Grenzen der Versuche sehr schnell ab; sie beträgt im Durchschnitt in 1 Minute bei 200° — 0.18 mm, bei 150° — 0.016 mm und bei 100° — 0.0006 mm. Bei Zimmertemperatur sind überhaupt nur in Monaten merkliche Biegungen zu erzielen. Diese beiden Momente, Biegungsbelastung und Biegungsgeschwindigkeit, sind für den Plastizitätsgrad des Steinsalzes bestimmend; in Luft sind sie beide, besonders aber die Biegungsgeschwindigkeit, bei kristallographisch gleich orientierten Stäbchen von der Temperatur abhängig, sodaß die Temperatur den weitaus größten Einfluß hat.

G. Schröder: Studien über die Zunahme der Plastizität etc.



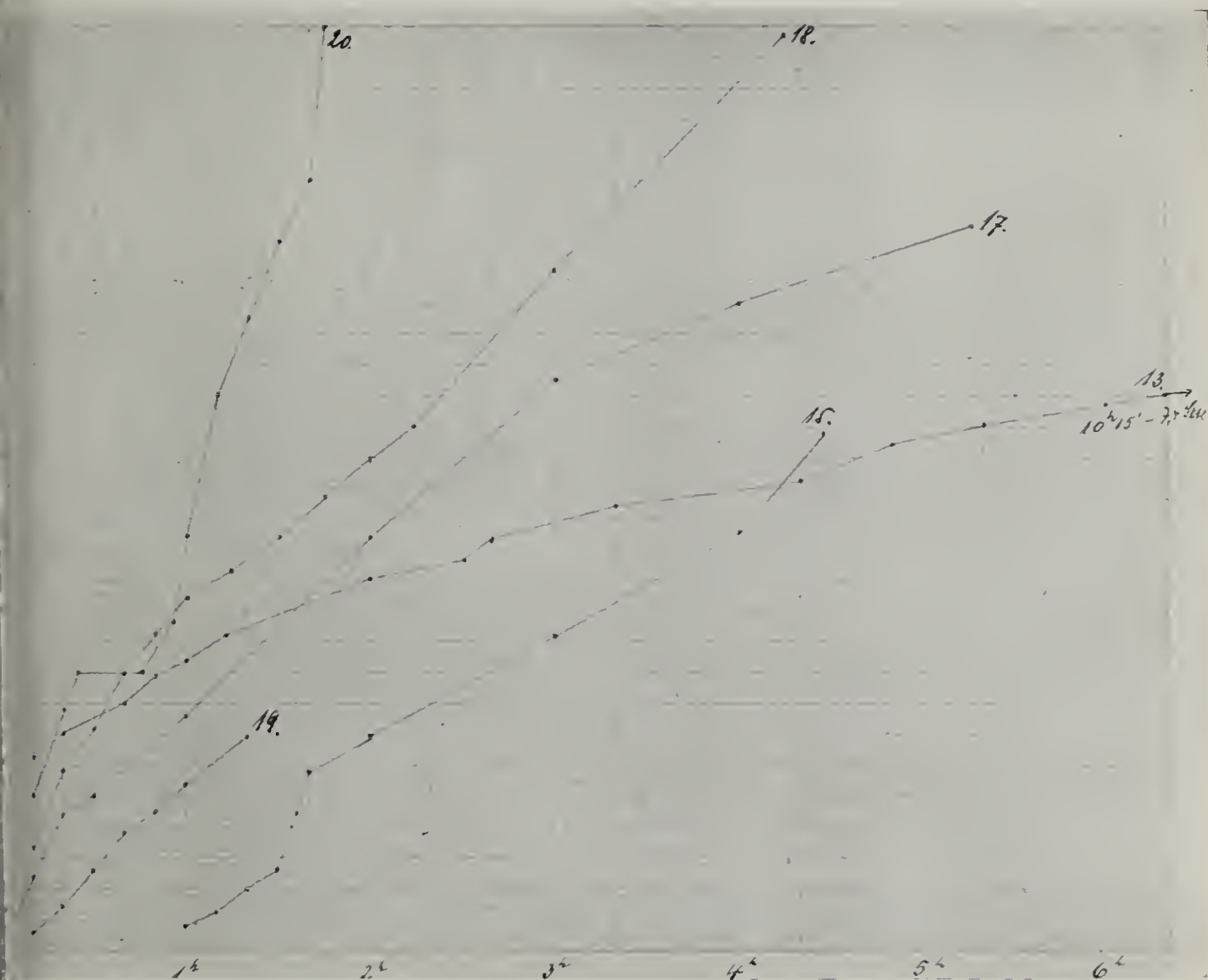
Tafel I zu Tabelle I.

Versuche mit gespaltenen Stäbchen bei 200°.

(Ordinate 1 mm = 0.1 Skalentheil = 0.065 mm Senkung der Mitte des Stäbchens. Abscisse 1 mm = $\frac{1}{5}$ Minute.)

[Berichtigung: Kurve 8 endet 12' — 24,1 Sktl.]

G. Schröder: Studien über die Zunahme der Plastizität etc.

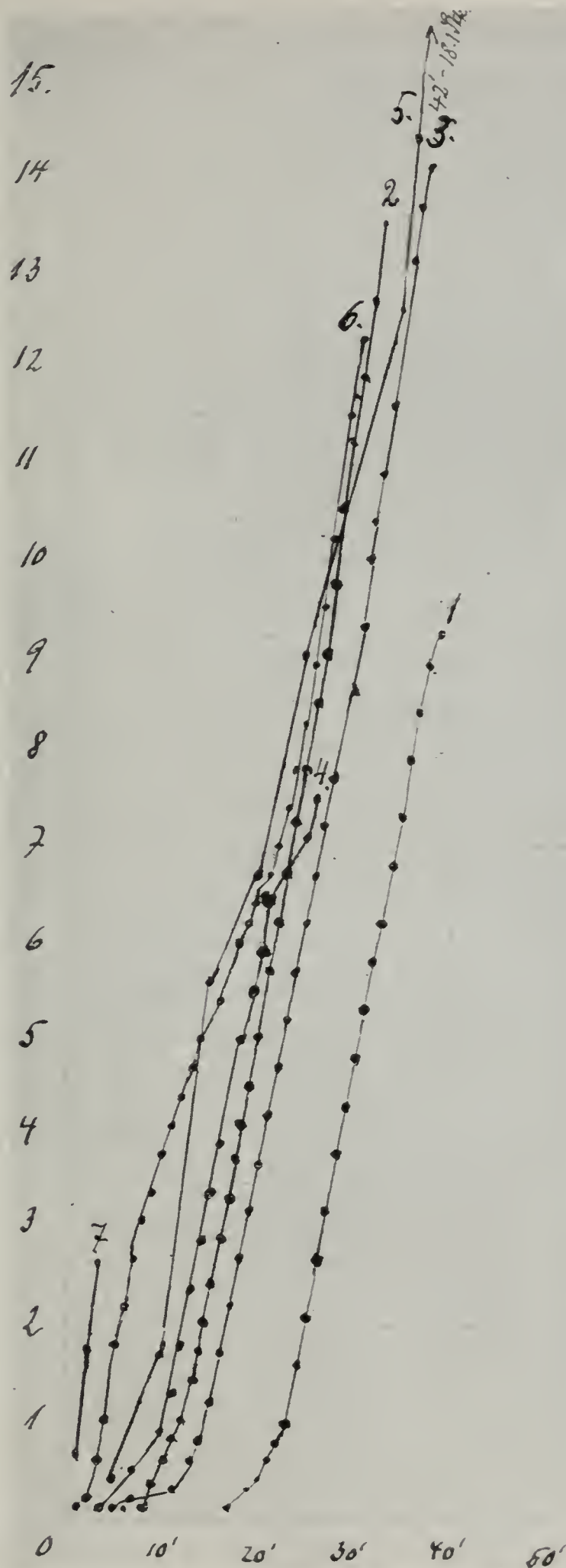


Tafel II zu Tabelle I.

Versuche mit gespaltenen Stäbchen bei 100° .

(Ordinate 1 mm = $\frac{1}{15}$ Skalenteil. Abscisse 1 mm = 2 Minuten.)

G. Schröder: Studien über die Zunahme der Plastizität etc.

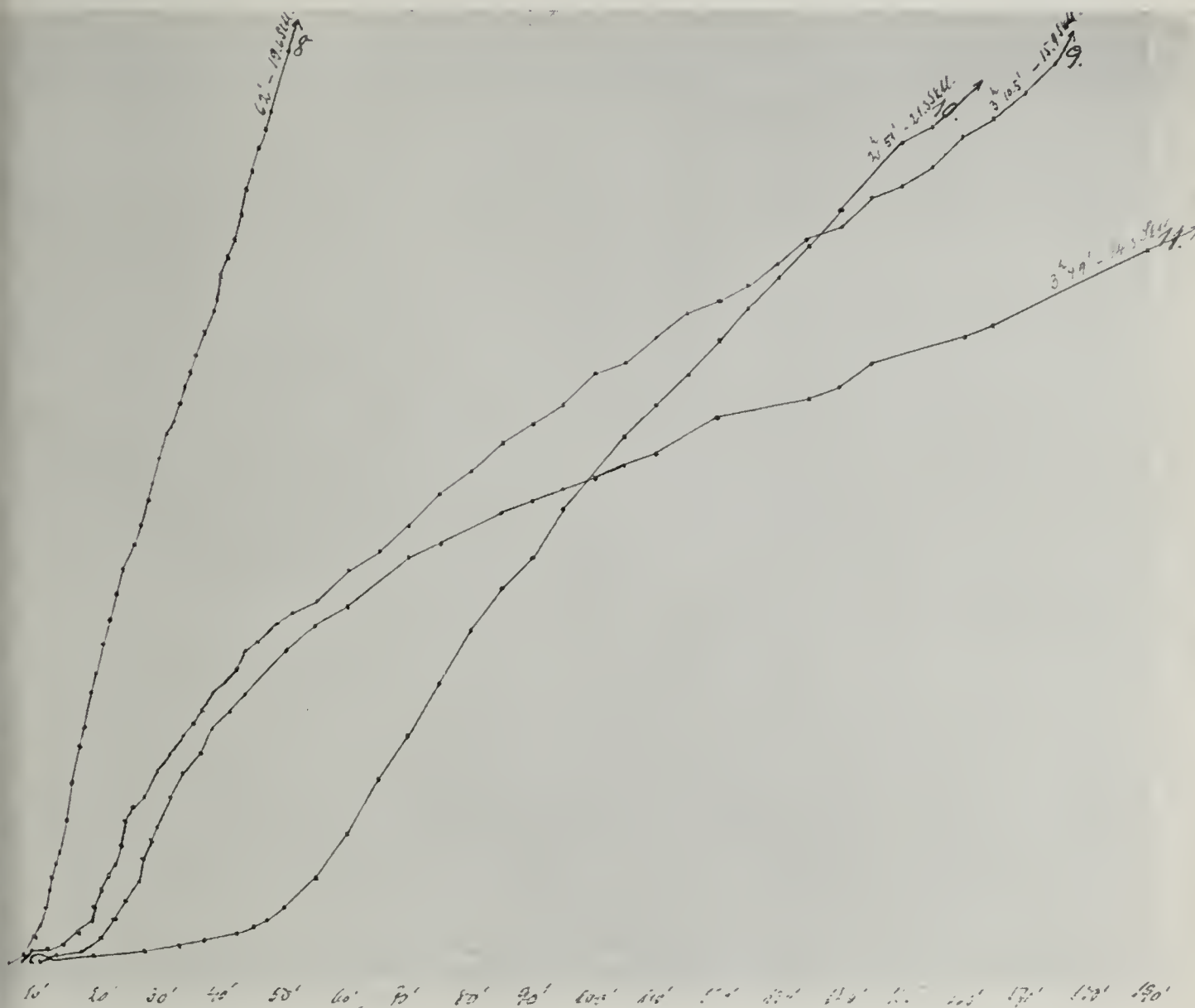


Tafel III zu Tabelle II.

Versuche mit geschliffenen Stäbchen bei 200°.

(Ordinate 1 mm = 0.1 Skalenteil = 0.065 mm Senkung der Mitte des Stäbchens. Abscisse 1 mm = 1 Minute.)

G, Schröder: Studien über die Zunahme der Plastizität etc.

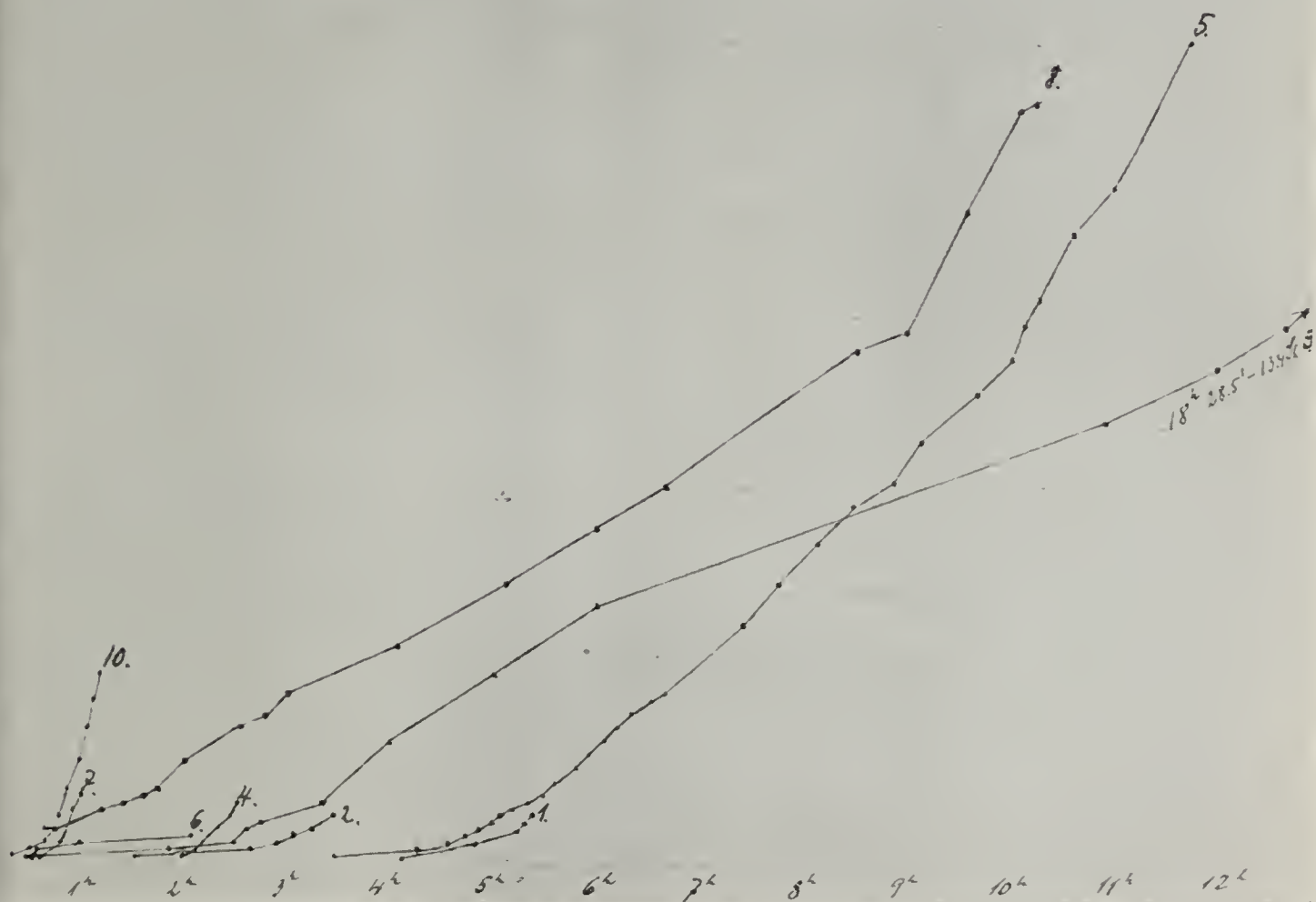


Tafel IV zu Tabelle II.

Versuche mit geschliffenen Stäbchen bei 200°.

(Ordinate 1 mm = 0.1 Skalenteil = 0.065 mm Senkung der Mitte des Stäbchens.) Abscisse 1 mm = 1 Minute.)

G. Schröder: Studien über die Zunahme der Plastizität etc.



Tafel V zu Tabelle III.

Versuche mit geschliffenen Stäbchen bei 150°.

(Ordinate 1 mm = 0.1 Skalentheil = 0.065 mm Senkung der Mitte des Stäbchens. Abscisse 1 mm = 4 Minuten.)

G. Schröder: Studien über die Zunahme der Plastizität etc.



Tafel VI zu Tabelle IV.

Versuche mit geschliffenen Stäbchen bei 100°.

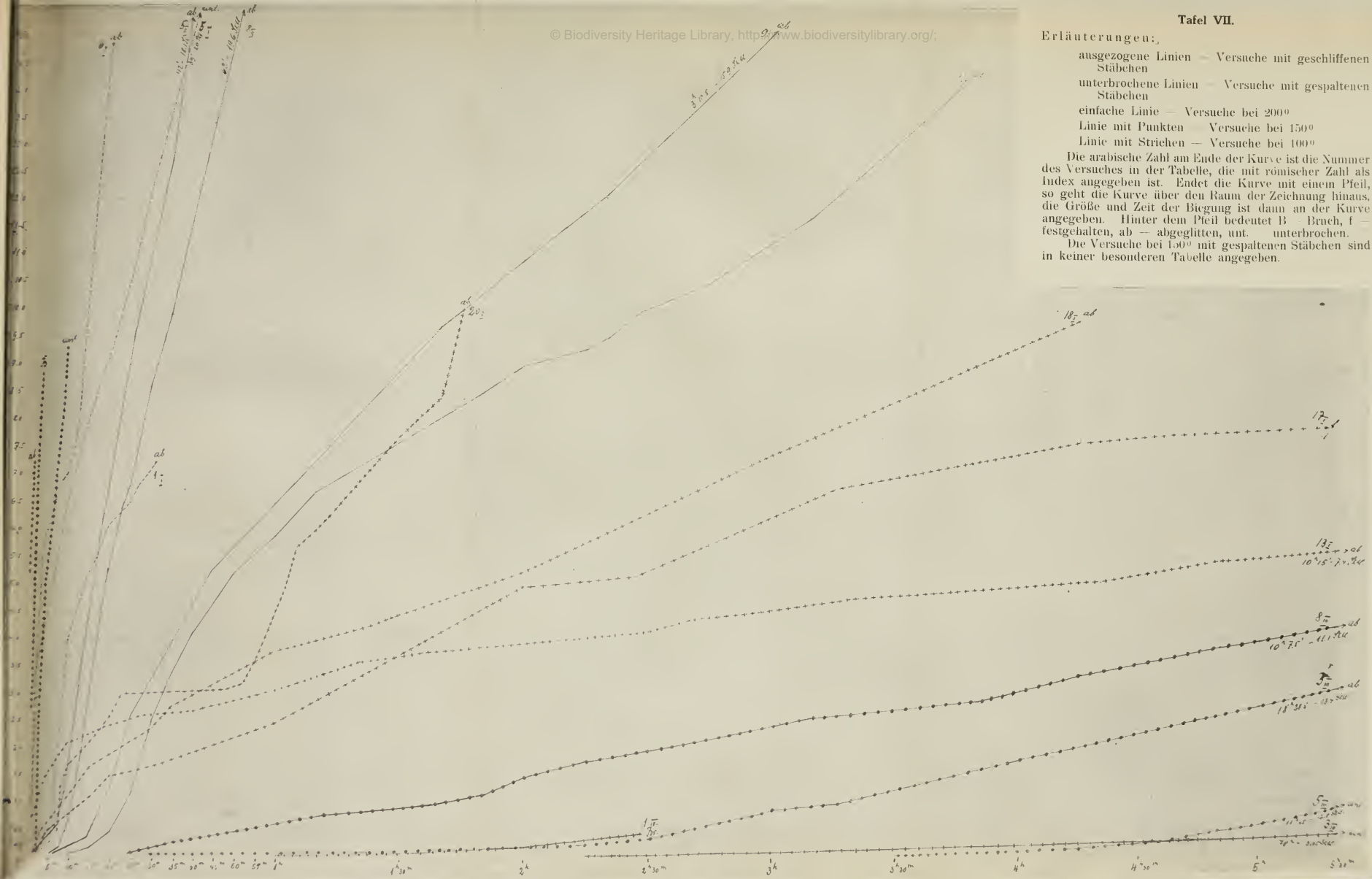
(Ordinate 1 mm = 0.02 Skalenteil = 0.013 mm Senkung der Mitte des Stäbchens. Abscisse 1 mm = 12 Minuten.)

Erläuterungen:

- ausgezogene Linien = Versuche mit geschliffenen Stäbchen
- unterbrochene Linien = Versuche mit gespaltenen Stäbchen
- einfache Linie = Versuche bei 200^o
- Linie mit Punkten = Versuche bei 150^o
- Linie mit Strichen = Versuche bei 100^o

Die arabische Zahl am Ende der Kurve ist die Nummer des Versuches in der Tabelle, die mit römischer Zahl als Index angegeben ist. Endet die Kurve mit einem Pfeil, so geht die Kurve über den Raum der Zeichnung hinaus, die Größe und Zeit der Biegung ist dann an der Kurve angegeben. Hinter dem Pfeil bedeutet B — Bruch, f — festgehalten, ab — abgeglitten, unt. — unterbrochen.

Die Versuche bei 100^o mit gespaltenen Stäbchen sind in keiner besonderen Tabelle angegeben.



ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Mittheilungen aus dem naturwissenschaftlichen Vereine von Neu-Vorpommern und Rügen](#)

Jahr/Year: 1913

Band/Volume: [45](#)

Autor(en)/Author(s): Schröder Georg

Artikel/Article: [Studien über die Zunahme der Plastizität beim Steinsalz durch Temperaturerhöhung 1-41](#)