

EINIGE NEUERE MESSERGEBNISSE ÜBER DEN KERBFAKTOR GEKERBTER FLACHSTÄBE

Von

I. BÁNKI

Lehrstuhl für Technische Mechanik, Technische Universität Budapest

(Eingegangen am 29. Juni, 1965)

Vorgelegt von Prof. Dr. Gy. KOZMANN

1. Einleitung

Für die Berechnung der Kerbfaktoren in Stäben beliebiger Kerbtiefe sind von NEUBER [1] Formeln bzw. Nomogramme angegeben worden. Sie fußen teilweise auf Meßergebnissen, teilweise auf theoretischen Untersuchungen. Als Kerbfaktor wird das Verhältnis

$$a_k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n}$$

der im Kerbgrund auftretenden Spannungsspitze σ_{\max} zu der den homogenen Spannungszustand voraussetzenden Nennspannung σ_n bezeichnet. Versuche

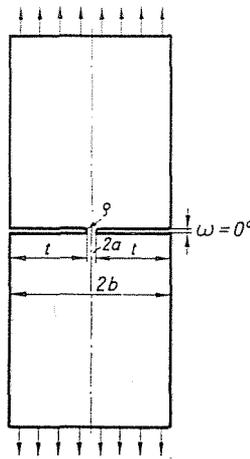


Abb. 1. Der untersuchte gekerbte Zugstab

zur experimentellen Bestimmung der Kerbfaktoren sind bereits von vielen Forschern durchgeführt worden, wobei die Meßergebnisse oft erheblich von den von Neuber angegebenen Werten abweichen. Die angeführten Meßergebnisse erstrecken sich jedoch nicht auf den ganzen von Neuber angegebenen

Bereich der Kerbtiefe, Verfasser setzte sich somit zum Ziel zu untersuchen, welche Abweichungen im ganzen von Neuber angegebenen Bereich von $\frac{a}{\rho}$ und $\frac{t}{\rho}$ gegenüber den von ihm angegebenen und spannungsoptisch zu ermittelnden Werten der Kerbfaktoren zu erwarten sind. Die Messungen wurden an beiderseits gekerbten, auf Zug beanspruchten Stäben mit einem Flankenwinkel von 0° durchgeführt. Die Skizze des untersuchten Modells ist aus Abb. 1 ersichtlich. Die Abbildung zeigt auch die benutzten Bezeichnungen.

2. Beschreibung der Meßeinrichtung

Entsprechend dem Ziel der experimentellen Überprüfung theoretischer Ergebnisse wurde auf die Meßgenauigkeit besonderer Wert gelegt. Dies bedingte gut auswertbare Isochromatenbilder mit möglichst hohen Isochromatenwerten. Der Abrundungsradius ρ , bei dem mit der benutzten Einrichtung noch gut zu unterscheidende Isochromatenbilder zu erhalten waren, hat sich auf Grund von Vorversuchen zu 2 mm ergeben. Abb. 2 veranschaulicht das Isochromatenbild einer Kerbe mit diesem Abrundungsradius. Die höchsten Parameterwerte, für die von Neuber noch Zahlenwerte der Kerbfaktoren angegeben wurden, betragen im Falle beiderseitiger Kerben mit einem Flankenwinkel 0°

$$\sqrt{\frac{a}{\rho}} = 8 \quad \text{bzw.} \quad \sqrt{\frac{t}{\rho}} = 7.3$$

(Gl. 45 auf Seite 174 von [1] mit $\varepsilon = 0$, $\rho = \rho_1$). Daraus ergaben sich für $\rho = 2 \text{ mm}$

$$a = \rho \left(\frac{a}{\rho} \right) = 2 \cdot 8^2 = 128 \text{ mm}.$$

Da bei $t = 0$ die ganze Breite des Modells $2b = 2a$ ist (s. Abb. 1), wurde sie zu

$$2b = 2a = 2 \cdot 128 \approx 260 \text{ mm}$$

angenommen. Für die Bestimmung der Länge des Modells war die Forderung maßgebend, daß die an seinen Enden angebrachte gleichmäßige verteilte Belastung ausreichend genau den richtigen Randbedingungen für den unendlich langen Streifen entsprechen muß. TIMOSHENKO—GOODIER [2] geben eine theoretische Lösung für den in Abb. 3 gezeigten Belastungsfall an. Nach dieser beträgt die größte Abweichung der Längsspannung σ von der gleichmäßigen Verteilung im Abstand $c = 2b$ von den Streifenenden bei konzentrier-

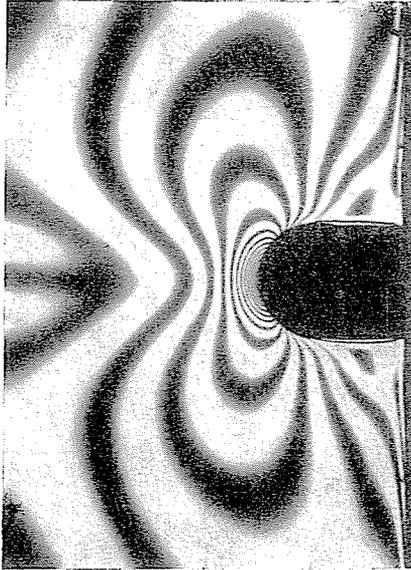


Abb. 2. Isochromatenaufnahme eines Vorversuches zur Ermittlung der kleinsten Abrundungsradien (Abrundungsradius 2 mm)

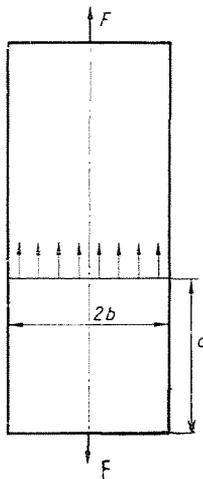


Abb. 3

tem Kraftangriff in der Symmetrieebene des Modells weniger als 3%. Wird nun ein 260 mm breites und 524 mm langes Modell hergestellt und an den Rändern eine gleichmäßig verteilte Belastung als Randbedingung aufgebracht, so bleibt die Ungenauigkeit in der Verwirklichung der theoretisch richtigen Randbedingung für $2a \approx 0$, d. h. für annähernd »konzentrierten«

Kraftangriff an der Kerbe unter 3%. Bei weniger tiefer Kerbe ist die Verwirklichung der Randbedingung noch weit genauer. Um auch für $2a \approx 0$ eine höhere Genauigkeit als 3% zu erhalten, wurde die Länge des Modells statt 524 mm mit 660 mm festgesetzt.

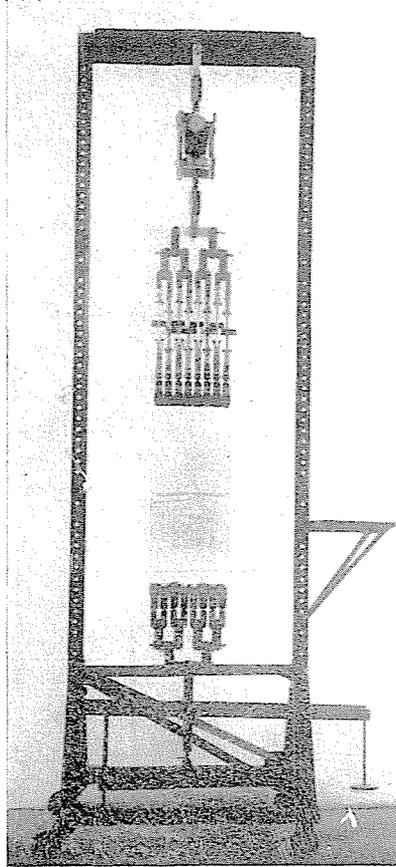


Abb. 4. Belastungsvorrichtung

Abb. 4 zeigt das Lichtbild der Belastungsvorrichtung. Sie besteht aus einem auf einen hohen Rahmen aufgehängten Dynamometer, aus der anschließenden Kraftverteilverrichtung und aus besonderen Kraftmeßelementen. Diese letzteren sind zwischen die Kraftverteilverrichtung und die am Modell angebrachten Einspannköpfe eingesetzt und messen die an den einzelnen Einspannköpfen übertragene Kraft. Die Kraftverteilverrichtung besteht aus einer Aufeinanderfolge von zweiarmigen Hebeln. Sie gestattet die Feineinstellung der einzelnen Hebelarme, wodurch die gleichmäßige Kraftverteilung gesichert ist. Der Dynamometer mißt die gesamte auf das Modell übertragene Kraft,

die durch Gewichtsbelastung unter Zwischenschaltung einer zweiten Kraftverteilvorrichtung auf das untere Ende des Modells ausgeübt wird.

Die Untersuchungen wurden mit einem spannungsoptischem Gerät Fabrikat *Meopta* durchgeführt. Die im Durchmesser 30 cm messenden Großflächenpolarisatoren dieses Gerätes ermöglichten Gesamtaufnahmen des Korbquerschnitts. Die Isochromatenbilder wurden in Natriumdampflicht aufgenommen.

Für die Aufnahme der spannungsoptischen Bilder wurde eine Exakta-Varex in Verbindung mit einem Zeiss-Sonnar 4/300 mm benützt. Dank der großen Brennweite des Objektivs wurden Bildfehler infolge schiefen Strahlenganges durch das Modell weitgehend vermieden.

3. Modellmaterial und Eichversuch

Modelle und Eichstab wurden aus dem 8 mm dicken Kunststoff Marke CR 39 der Homalite Corp. (USA) hergestellt. Der Eichversuch wurde an einem

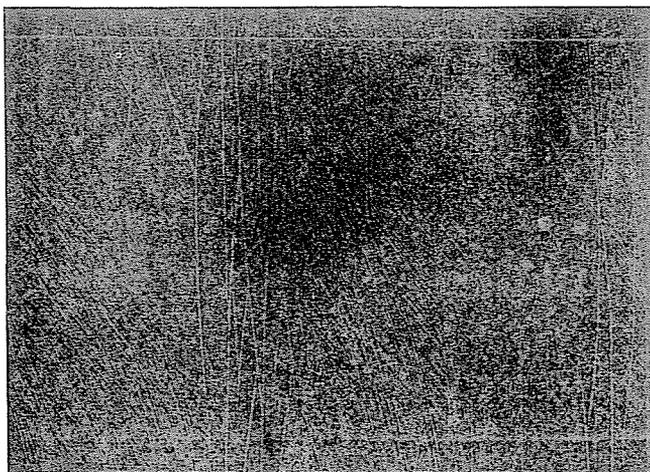


Abb. 5a. Nullaufnahme und Isochromatenbild des auf reine Biegung beanspruchten Eichstabes

Biegestab nach den Versuchen von HILTSCHER [3] durchgeführt. Abb. 5a zeigt die Nullaufnahme des Biegestabes, Abb. 5b hingegen die Aufnahme des belasteten Biegestabes nach 2 Minuten Belastungsdauer. Die Isochromatenbilder des Biegestabes wurden in einem Meßmikroskop ausgemessen. Die Ausmessung ergab die Spannungsverteilung der Abb. 6. Danach war die Spannungsverteilung an der Druckseite genau linear, auf der Zugseite ergab sich nach 2 Min. Belastungsdauer eine Abweichung von 1% von der linearen Spannungsverteilung am Modellrand. Die Randspannung betrug beim Eichversuch 194 kp/cm^2 , die Höhe des Biegestabes 20 mm.

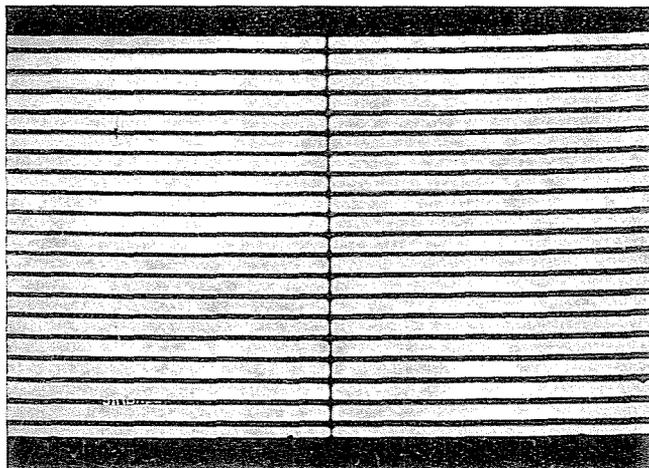


Abb. 5/b

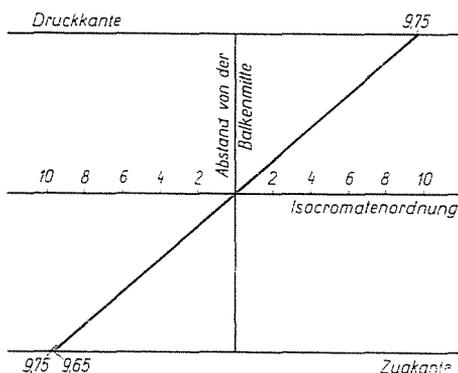


Abb. 6. Verteilung der Isochromatenordnungen über die Höhe des auf reine Biegung beanspruchten Eichstabes

4. Verlauf und Ergebnisse der Messungen

Um genaue Modellkonturen zu erhalten, wurde das Modell durch Fräsen bearbeitet. Für die verschiedenen Kerbtiefen wurde das gleiche Modell benutzt, indem die Kerbe nach jeder Messung tiefer gefräst wurde. Bei der tiefsten Kerbe betrug der Wert $2a$ etwa 20 mm.

Die Messungen wurden um den Randeffekt nach Möglichkeit zu vermeiden, sogleich nach der Modellbearbeitung durchgeführt. Es wurden zunächst Nullaufnahmen gemacht, die nur dann gemessen wurden, wenn der Randeffekt weniger als 0,15 Ordnung betrug.

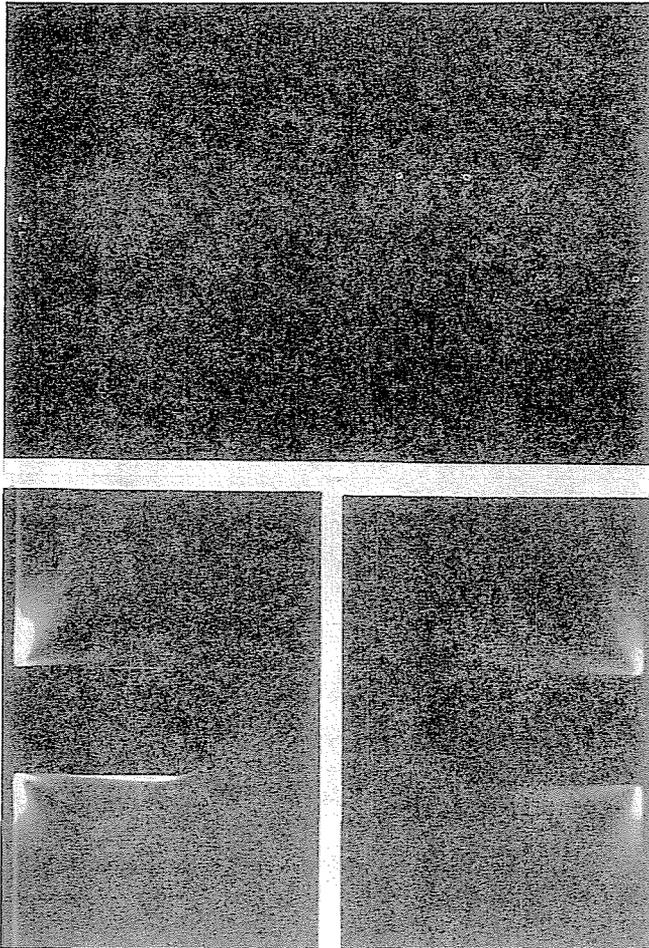


Abb. 7. Nullaufnahme und Gesamt- bzw. Teilaufnahme des Isochromatenbildes eines gekerbten Zugstabes

Nach dem Einsetzen des Modells in die Belastungsvorrichtung wurde zunächst die optische Achse der photographischen Kamera senkrecht auf die Modellfläche ausgerichtet. Jeweils 2 Minuten nach der Belastung wurden Nahaufnahmen vom Kerbgrund gemacht, wobei die Kamera stets so eingestellt war, daß die optische Achse des Objektivs das Modell möglichst genau im betreffenden Kerbgrund traf. Anschließend wurde noch eine Gesamtaufnahme von dem die beiderseitigen Kerben enthaltenden Teil des Modells gemacht. Eine solche Aufnahmenserie zeigt die Abb. 7. Die Belastung wurde so gewählt, daß im Kerbgrund stets eine Isochromatenordnung von etwa 10 auftrat.

Die Meßergebnisse sind in der Tabelle I zusammengefaßt. Das aus ihnen konstruierte Diagramm der Kerbfaktoren ist in Abb. 8 aufgetragen.

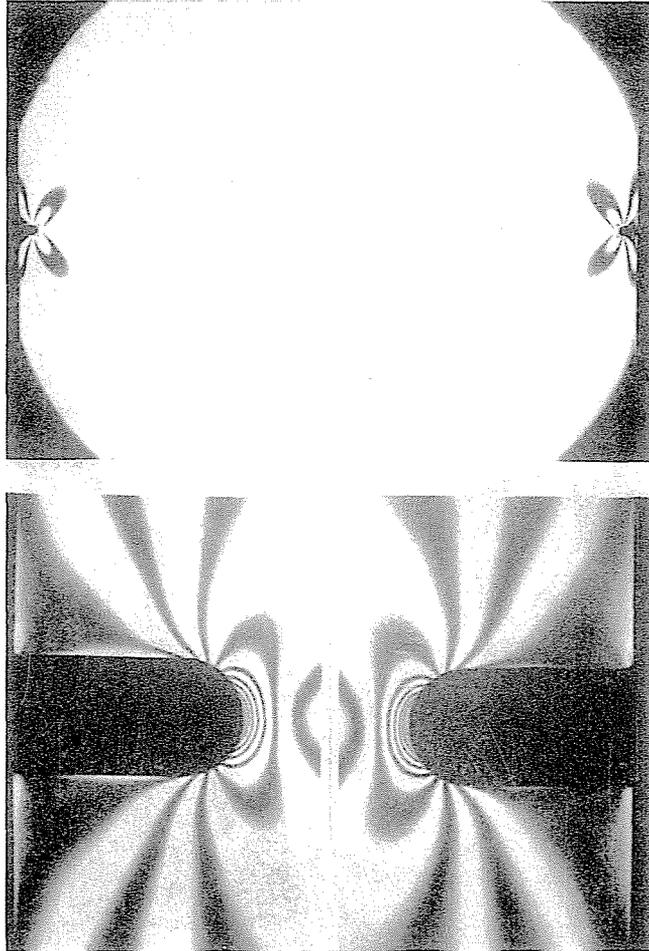


Abb. 7/b

Tabelle I

ω	t mm	a mm	ϱ mm	$\frac{t}{\varrho}$	$\sqrt{\frac{t}{\varrho}}$	$\sqrt{\frac{a}{\varrho}}$	α_k Neuber	α_k gemessen	Abweichung %
0°	1,9	128	2,02	0,94	0,97	7,96	3	2,69	11,5
	8,1	121,8	2,02	4,01	2	7,77	4,9	4,18	17,2
	17,9	112	2,02	8,86	2,98	7,45	6,7	5,3	26,4
	32,1	97,8	2,02	15,89	3,99	6,96	7,8	5,97	30,7
	50,2	79,7	2,02	24,85	4,99	6,28	8,05	6,18	30,3
	71,7	58,2	2,02	35,5	5,96	5,37	7,5	5,65	32,8
	98,2	31,7	2,02	48,61	6,97	3,96	5,85	4,05	44,4
	119,6	10,3	2,02	59,2	7,69	2,26	3,3	2,58	28

Aus dem Vergleich der gemessenen mit den von Neuber angegebenen Werten können folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Die Abweichungen der gemessenen Werte gegenüber den von Neuber angegebenen sind beträchtlich. Die maximale Abweichung beträgt 44,4%.

2. Die relativ beste Übereinstimmung zwischen den Meßwerten und den Neuberschen Werten ergibt sich im Bereich der flachen und der ganz tiefen Kerben.

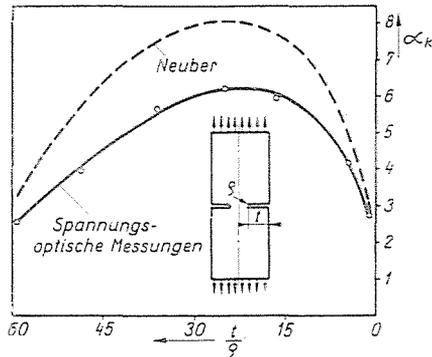


Abb. 3. Die berechneten und gemessenen Werte der Kerbfaktoren

5. Fehlerdiskussion

Es sollen nun die möglichen Fehlerquellen und deren ziffernmäßiger Einfluß auf die Meßergebnisse untersucht werden.

Da die beim Eichversuch am Biegestab auftretende Randspannung etwa die gleiche Größe hatte, wie die Spannungsspitze im Kerbgrund des Modells, dürfte der Fehler, den das nichtlineare Verhalten des Modellwerkstoffes verursacht, ebenfalls höchstens etwa 1% betragen, wie er beim Eichversuch ermittelt wurde.

Die Isochromatenaufnahmen wurden stets 2 Minuten nach dem Aufbringen der Belastung gemacht. Da die spannungsoptische Konstante ebenfalls aus einer Aufnahme des Eichstabes 2 Minuten nach der Belastung ermittelt wurde (s. Abb. 5), dürfte der Einfluß des Kriechens des Modellwerkstoffes ausreichend ausgeschaltet gewesen sein.

Der Randeffect betrug, wie schon erwähnt, höchstens 0,15 Ordnung. Da die kleinste Isochromatenordnung im Kerbgrund, die bei den Messungen an der Stelle der Spannungsspitze auftrat, die 8. Ordnung war, entsteht durch den Randeffect ein Fehler von höchstens 1,9%.

Fehler können auch aus der nicht genauen Einstellung der optischen Achse des abbildenden Systemes entstehen.

Um den Gesamtfehler abschätzen zu können, wurde die Messung an einem ungekerbten, jedoch mit einer kleinen zentrischen Bohrung versehenen Modell durchgeführt. Für diesen Fall ergeben die bekannten Formeln von KIRSCH einen Kerbfaktor von $\alpha_k = 3$.

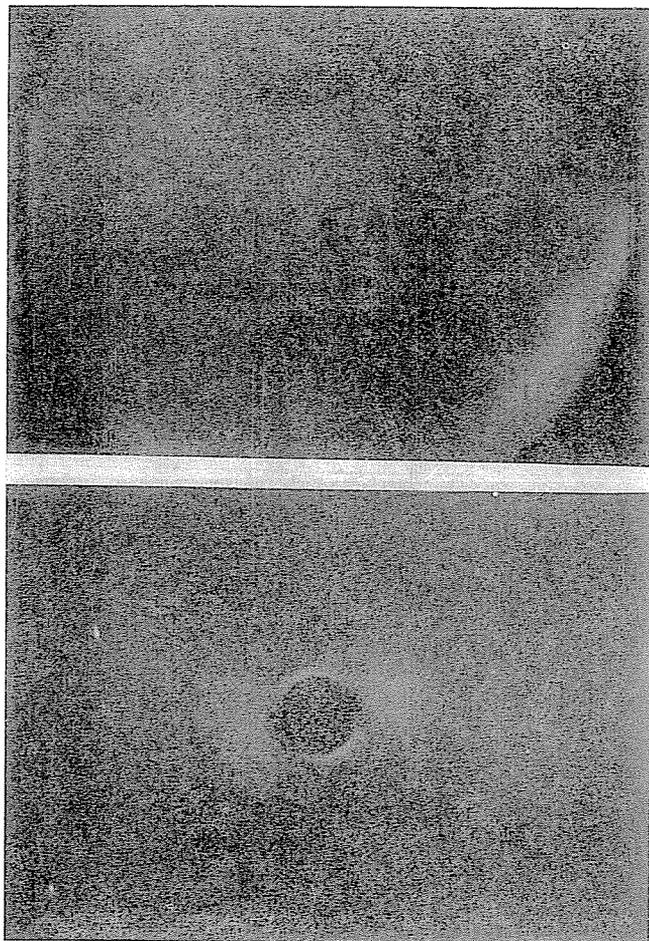


Abb. 9/a. Nullaufnahme und Gesamt- bzw. Teilaufnahme des Isochromatenbildes eines mit einer kleinen Bohrung versehenen Zugstabes

Das Modell war 540 mm lang, 259,5 mm breit und mit einer Bohrung mit einem Durchmesser von 5,875 mm versehen. Es war von demselben Material hergestellt und in derselben Belastungsvorrichtung eingespannt worden wie die gekerbten Modelle.

Die Isochromatenaufnahmen sind in Abb. 9 wiedergegeben. Das Modell nähert die Verhältnisse in einem unendlich breiten Zugstab mit zentrischer

Bohrung gut an, da das Verhältnis von Bohrungsdurchmesser d zur Modellbreite $2b$ in diesem Falle

$$\frac{d}{2b} = \frac{5,875}{259,5} \cdot 100\% = 2,26\%$$

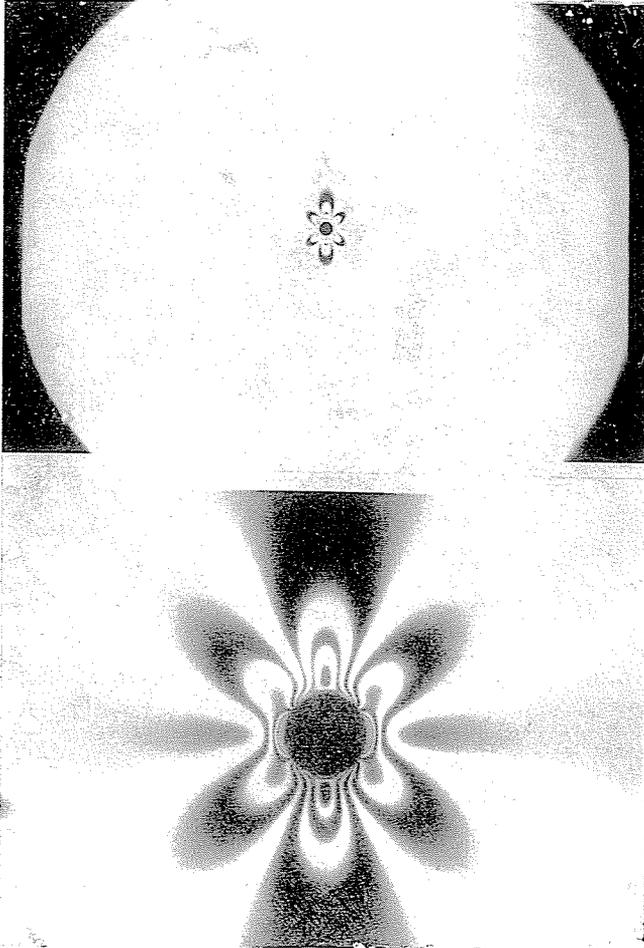


Abb. 9/b

beträgt. Da die Messung einen Kerbfaktor von $a_k = 2,86$ ergab, beträgt die Abweichung von dem theoretisch ermittelten Wert

$$\frac{2,86 - 3}{3} \cdot 100\% = -4,66\%.$$

Diese Abweichung ist also um eine Größenordnung kleiner als die in der Tabelle I enthaltenen Abweichungen zwischen den gemessenen und den von Neuber angegebenen Kerbfaktorenwerten.

6. Zusammenfassung

Es wurde angestrebt, möglichst genaue Werte der Kerbfaktoren für beiderseits gekerbte Zugstäbe im ganzen von Neuber angegebenen Parameterbereich zu erhalten. Die gemessenen Kerbfaktorenwerte zeigen beträchtliche Abweichungen gegenüber den a_k -Werten, die aus den Diagrammen von Neuber ermittelt werden können. Aus der Untersuchung der möglichen Fehlerquellen geht hervor, daß die Meßfehler klein sind und nicht die Ursache der Abweichung zwischen Messung und Rechnung bilden können.

Schrifttum

1. NEUBER, H.: Kerbspannungslehre. Zweite Auflage Springer Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1958.
2. TIMOSHENKO, S.—GOODIER, J. N.: Theory of Elasticity, Second Edition Mc Graw-Hill Book Company Inc., New York/Toronto/London, 1951. S. 46—52.
3. HILTSCHER, R.: Gütebeurteilung spannungsoptischer Modellwerkstoffe: Forschung Bd. 20, 66—76.

Imre BÁNKI, Budapest XI., Műgyetem rkp. 3. Ungarn.