

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 71/72 (1918)  
**Heft:** 13

**Artikel:** Hohlkehlschärfe und Dauerbiegung  
**Autor:** Stodola, A. / Schüle, F.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-34733>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 23.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

INHALT: Hohlkehlschärfe und Dauerbiegung. — Das alte Kirchlein zu Greifensee. — La Conception rationnelle et conséquente. — † Antoine Hotz. — Miscellanea: Automatische Umformerstation für 1200 Volt Spannung für Bahnbetrieb. Der Einfluss eines Kobalt-, Nickel- oder Kupfergehaltes auf den Rostangriff von Flusseisen. Hölzerne Dreigelenk-Bogenbrücke. Rodin-Museum und Rodin-Haus in Paris. La

Loutre-Staudamm in St-Maurice River. Ausbau des Königsberger Seekanals. Drahtlose Telegraphie. — Konkurrenz: Bauten für das Kraftwerk Mühlberg. — Berichtigung. — Vereinsnachrichten: Gesellschaft ehemaliger Studierender der Eidg. Technischen Hochschule: Stellenvermittlung.

Tafeln 18 und 19: Das alte Kirchlein zu Greifensee.

## Band 71.

Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

## Nr. 13.

### Hohlkehlschärfe und Dauerbiegung.

Von Prof. Dr. A. Stodola und Prof. F. Schüle, Zürich.

Wie verderblich die ungenügende Rundung von Hohlkehlen auf die Festigkeit von Maschinenteilen bei wiederholter Biegungsbeanspruchung wirken kann, ist dem erfahrenen Konstrukteur von manchem Vorkommnis des praktischen Betriebes her bekannt. Allein es fehlte bis anhin jeder Anhaltspunkt über den Zahlenbetrag der Schwächung, die eine bestimmte Hohlkehlschärfe hervorruft. Die bekannten für Kerb-, Biege- und Schlagproben der Materialprüfung benützten Probestäbe sind mit scharfen Einschnitten von so ausgesprochen schädlicher Form versehen, wie sie an Maschinenteilen nie erlaubt werden könnte. Es schien uns daher von Interesse, Dauerbiegeproben, d. h. tausendmal wiederholte Beanspruchungen auf Biegung mit Probestäben von derartiger Formgebung vorzunehmen, dass eine unmittelbare Anwendung auf den Maschinenbau möglich wäre. Die Versuche wurden in der, dem einen von uns unterstellten Eidgen. Materialprüfungs-Anstalt durchgeführt.

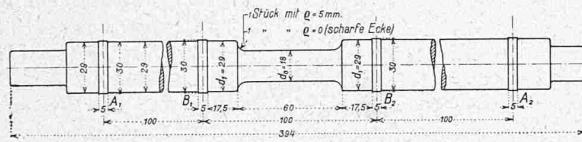


Abb. 1. Probestäbe für die erste Versuchsreihe.

Die in der ersten Versuchsreihe benützten Probestäbe besaßen die in Abb. 1 dargestellte Beschaffenheit. Die in der Mitte befindliche Prüfstrecke von 60 mm Länge bei  $d_0 = 18$  mm Durchmesser wird durch Hohlkehlen verschiedener Rundung in die Erweiterung von  $d_1 = 29$  mm Durchmesser übergeführt.  $A_1$  und  $A_2$  sind Arbeitsleisten zur Aufnahme der die Welle stützenden Kugellager,  $B_1$  und  $B_2$  Arbeitsleisten, auf die zwei innere Kugellager aufgepresst wurden, die durch eine darüber gelegene Traverse fest verbunden und zur Aufnahme der Belastung bestimmt waren. Diese wurde durch eine in der Mitte angebrachte Schneide übertragen, die ihrerseits in einem Hebel gelagert war, an dessen freiem Aussenende ein Belastungsgewicht den Druck beliebig zu bemessen gestattete. Diese kleine Welle wurde von einer Arbeitsmaschine mit 250 bis 300 Umläufen in der Minute in Drehung versetzt. Das andere Wellenende war mit einem Zählwerk verbunden, das beim Bruch der Welle, bzw. beim Auftreten starker Schwingungen selbsttätig ausgeschaltet wird und so die Zahl der Drehungen, die zum Bruche führten, abzulesen ermöglicht. Infolge dieser Belastungsart war der Mittelteil der Welle einem konstanten Biegungsmoment unterworfen; die Biegungsspannung variiert während der Umdrehung beständig zwischen einem positiven und einem negativen Höchstwert. Die Probewellen wurden aus Handelsflusseisen von 31 mm Durchmesser hergestellt mit folgenden Eigenschaften:

	Nach Probe	I	2
Elastizitätskoeffizient	$E$	—	$2,161 \text{ t/cm}^2$
Proportionalitätsgrenze	$\sigma_p$	—	$2,76$ "
Streckgrenze	$\sigma_s$	$3,245$	$3,15$ "
Zugfestigkeit	$K_z$	$4,417$	$4,54$ "
Dehnung nach Bruch	$\lambda$	$26,8$	$27,9 \%$
Kontraktion	$\varphi$	$64$	$64 \%$
Qualitätskoeffizient	$K_z \lambda$	$1,18$	$1,27 \text{ tcm}$

Die Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle I vereinigt und in Abb. 2 graphisch dargestellt.

Für die zweite Versuchsreihe wurden aus Flusseisen ähnlicher Qualität Probestäbe lt. Abb. 3 (S. 146) hergestellt.

Der Durchmesser der schwächsten Stelle war gleich wie in der ersten Versuchsreihe, und es wurde die Stärke des unmittelbar angrenzenden Wellenteils  $d_1$  einmal mit 21 mm, dann mit 24 mm ausgeführt, während in der ersten Versuchsreihe  $d_1$  den Wert 29 mm besass. Hierdurch

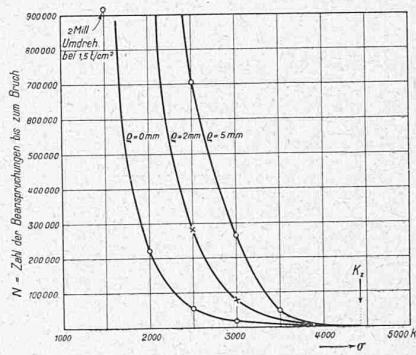


Abb. 2.

rückt das Verhältnis der schwachen Stelle zum verstärkten Wellenteil in die Nähe der praktisch vorkommenden Verhältnisse bei Kurbelwellen, wenn man sich unter  $d_0$  den Lagerhals, unter  $d_1$  die Wellenfortsetzung zum Schwungrad vorstellt. Die Lagerung und die Belastungsverhältnisse waren gleich wie in der ersten Versuchsreihe. Die Hohlkehle war dabei einmal scharf, einmal mit 2 mm Halbmesser gerundet. Bei 21 mm Durchmesser der Erweiterung ergibt sich der in Abb. 3 sichtbare Schnitt durch die Hohlkehle, wie er sich bei Schwungradwellen gelegentlich findet.

Eine umfassende Zerreissprobe ergab als:

Elastizitätskoeffizient	$E = 2,131 \text{ t/cm}^2$
Proportionalitätsgrenze	$\sigma_p = 2,89$ "
Streckgrenze	$\sigma_s = 3,28$ "
Zugfestigkeit	$K_z = 4,34$ "
Dehnung nach Bruch auf 20 cm	$\lambda = 28,6 \%$
Kontraktion	$\varphi = 68 \%$
Qualitätskoeffizient	$K_z \lambda = 1,24 \text{ tcm}$

Die Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle II und in Abb. 4 niedergelegt. In Bezug auf die Qualität des Materials und auf die Brucherscheinungen ist folgendes zu bemerken: Das Material der Wellen ist, wie erwähnt, Handelsflusseisen; Aetzproben zeigten in den Stangen der ersten und der zweiten Versuchserie Kern und Randbildung; der Wellenhals ist aus dem Kernmaterial. Die Zerreissproben mit Probestäben der beiden Reihen zeigen nur geringe

### 1. Versuchsreihe

Tabelle I

Wellenbezeichnung	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Durchmesser d. Eindrehung (Hals) $d_0$ mm	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Durchmesser des Anschlusses $d_1$ mm	29	29	29	29	29	29	29	29	29
Verhältnis der Durchmesser $d_0 : d_1$	0,621	0,621	0,621	0,621	0,621	0,621	0,621	0,621	0,621
Halbmesser der Hohlkehle $q$ mm	0	0	0	0	2	2	5	5	5
Verhältnis $q : d_0$	0	0	0	0	0,111	0,111	0,277	0,277	0,277
Biegungsbeanspruchung $\sigma$ $t/cm^2$ ±	1,5	2,0	2,5	3,0	2,5	3,0	2,5	3,0	3,5
Umdrehungen bis zum Bruch $N$	$> 2 \cdot 10^6$	220269	54836	18516	284676	77610	705396	265905	46902

Tabelle II

## 2. Versuchsreihe

Wellenbezeichnung . . . . .	10	11	12	13	14	15	16	17
Durchmesser d. Eindrehung (Hals) $d_0$ mm	18	18	18	18	18	18	18	18
Durchmesser des Anschlusses $d_1$ mm	21	21	24	24	21	21	24	24
Verhältnis der Durchmesser $d_0 : d_1$ . . .	0,857	0,857	0,750	0,750	0,857	0,857	0,750	0,750
Halbmesser der Hohlkehle $\varrho$ mm	0	0	0	0	2	2	2	2
Verhältnis $\varrho : d_0$ . . . . .	0	0	0	0	0,111	0,111	0,111	0,111
Biegsungsbeanspruchung $\sigma$ $t/cm^2$ ±	2,5	3,0	2,5	3,0	2,5	3,0	2,5	3,0
Umdrehungen bis zum Bruch $N$ . . .	58937	17896	40257	13119	160676	59976	131453	29328

Unterschiede in ihren Ergebnissen. Es ist aber zu beachten, dass der Bruch bei langsam zunehmender Belastung wie bei der Zerreissprobe ein interzellulärer Bruch mit sehniger Struktur ist; bei Dauerbiegeproben finden abwechselnd Zug- und Druckspannungen statt, die zuletzt den Bruch ohne vorherige Streckung des Materials verursachen; dieser Bruch ist feinkörnig im Aussehen und extrazellulär; er findet statt in der Abgrenzung der Ferritzellen.

Die Kerbschlagbiegeprobe kann Aufschluss geben über das Verhalten des Materials bei plötzlichem Bruch. Zu

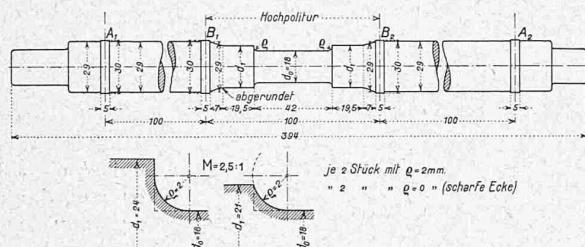


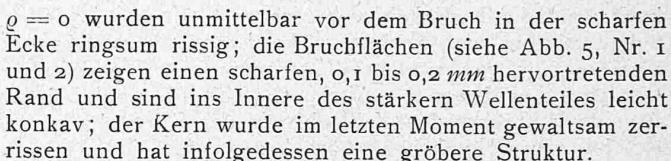
Abb. 3. Probestäbe für die zweite Versuchsreihe.

diesem Zwecke sind je zwei Probestäbe von  $8 \times 1 \times 1$  cm aus dem Kern beider Wellenstäbe entnommen worden und die Kerbe von 2 mm Durchmesser und 2,5 mm Tiefe einmal nach aussen und einmal nach innen gebohrt worden. Die Kerbzähigkeit, ermittelt (aus zwei Versuchen) am vertikalen Amsler'schen Fallhammer, ausgedrückt in  $kgm/cm^2$  des Bruchquerschnittes an der Kerbe, betrug bei dem Wellenmaterial der I. Serie 2. Serie

	1. Serie	2. Serie
Kerbe aussen	16,1	5,50 $kgm/cm^2$
Kerbe innen	11,4	8,7 " "

An der Bruchstelle zeigen alle Proben eine deutliche Einschnürung; wenn die obigen Werte unter sich sehr verschieden sind, so deuten sie doch nicht auf brüchiges Material. Die Grenze für letzteres wird gewöhnlich mit  $4 \text{ kgm/cm}^2$  Kerzhäufigkeit geschätzt.

Die Dauerbiegeproben zeigten drei verschiedene Arten von Brucherscheinungen; die Wellen beider Reihen mit



Die Wellen mit  $q = 2 \text{ mm}$  sind ebenfalls ringsum kurz vor dem Bruch rissig geworden und zwar in der Rundung dicht am zylindrischen Teil; der zuletzt gebrochene Kern liegt etwas exzentrisch; die Bruchfläche (Abb. 5, Nr. 5

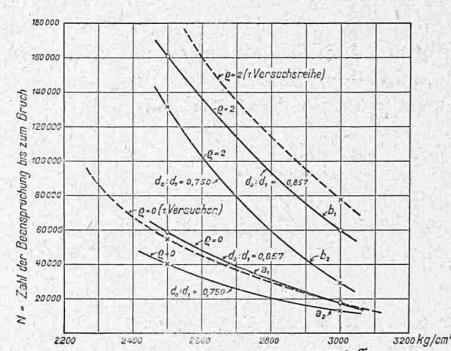


Abb. 4.

Zwei Stellen (Abbildung 5, Nr. 8) rissig geworden. Durch ferneres Drehen der belasteten Welle ist der Riss sichelförmig erweitert worden, die Schwingungen wurden am Ende so stark, dass der Versuch unterbrochen werden musste. Die Welle wurde hierauf durch einfache Biegung gewaltsam gebrochen. Der Riss ist beim Uebergang des zylindrischen Teiles in die Rundung entstanden.

Die im Betrieb vorkommenden Wellen- oder Achsenbrüche sind durch Abbildung 5, Nr. 7, charakterisiert. Aus den besprochenen Dauerbiegeproben geht hervor, dass die Ausdehnung des Risses über den ganzen Umfang der Welle nur bei scharfem Uebergang des Wellenhalses im Anschlussteil eintritt.

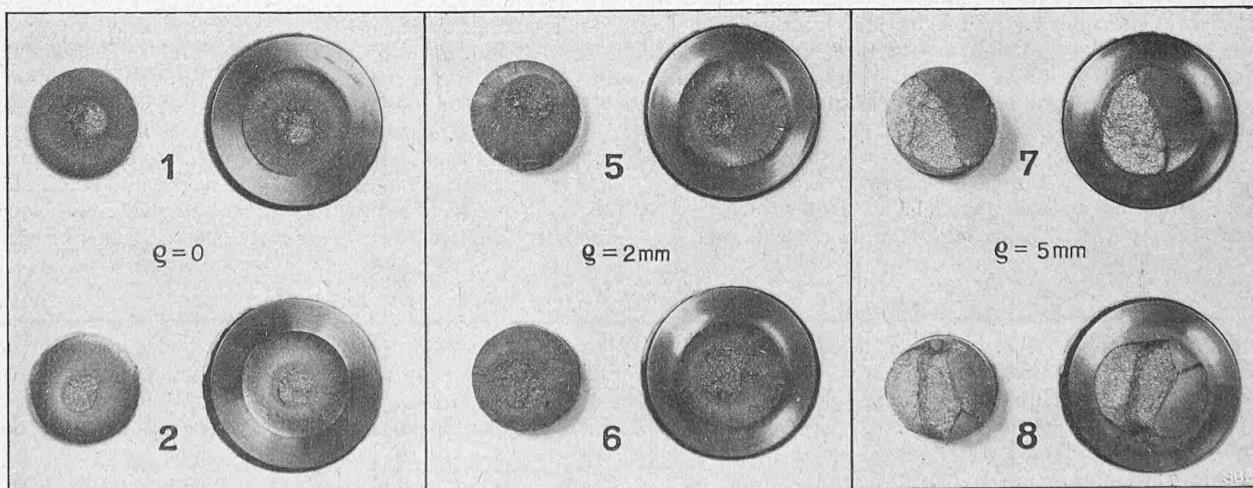


Abb. 5. Bruchflächen der Versuchstäbe mit verschiedenen Hohlikchenschärfen; oben Stäbe der ersten, unten Stäbe der zweiten Versuchsreihe.

Als Erklärung für diese Unterschiede möge folgende angeführt werden: Der Bruch bei Dauerbiegeproben entsteht durch „Ermüdung“ des Materials, z. B. durch Anhäufung bleibender Dehnungen, die auch unterhalb der auf den ganzen Querschnitt bezogenen Fließgrenze auftreten können bei lokaler Ueberanstrengung des Materials; insbesondere a) infolge von Einschlüssen oder von verwalzten Blasen<sup>1)</sup>, b) infolge der Wirkung der Hohlkehle.

Bei relativ grossem Halbmesser der Hohlkehle (hier  $\varrho = 5 \text{ mm}$ ) überwiegt die unter a) erwähnte Ursache; der Bruch beginnt an einer Stelle durch einen feinen Riss der nach und nach sich schellförmig im Querschnitt ausdehnt. Bei scharfer Abrundung ( $\varrho = 0 \text{ bis } 2 \text{ mm}$ ) überwiegt die unter b) erwähnte Ursache; ringsum ist an der Uebergangsstelle des Wellenhalses in das stärkere Wellenende die Gefahr der Rissbildung gleichzeitig vorhanden.

Zum Vergleiche des Verhaltens des Materials beider Reihen bei der Dauerbiegeprobe wurde mit Material der zweiten Versuchsreihe die Welle Nr. 18 abgedreht wie Nr. 7 der ersten Reihe, d. h. mit  $\varrho = 5 \text{ mm}$  und mit  $2,5 \text{ t/cm}^2$  auf Biegung beansprucht. Der Bruch trat ein nach 824263 Umdrehungen, gegenüber 705396 bei Welle Nr. 7. Das Aussehen der Bruchfläche war dasselbe wie bei Nr. 7. Der nicht sehr grosse Unterschied in den Umdrehungszahlen röhrt wohl daher, dass bei Welle Nr. 8 eine lokale Schwächung infolge von Einschlüssen oder verwalzten Blasen später eintrat wie bei Nr. 7.

Die Grösse der Beanspruchung, die durch die Hohlkehle bei variabler Abrundung verursacht wird, ist theoretisch selbst innerhalb des Gebietes der vollständigen Elastizität nicht ermittelbar; umso weniger ist dies der Fall, wenn örtlich die Elastizitätsgrenze oder Streckgrenze überschritten wurde<sup>2)</sup>. Hingegen liegt es auf der Hand, dass die Grösse der Ueberbeanspruchung in der Hohlkehle nicht von der absoluten Grösse des Krümmungshalbmessers sondern lediglich von seinem Verhältnisse zum Wellendurchmesser und vom Verhältnisse des Wellendurchmessers im Lagerhals und in der Verstärkung abhängt. Die Länge des Lagerhalses betrug zwar nur 60 mm, doch dürfte sich die Spannungstörung der Hohlkehle innerhalb des Halses und in der Verstärkung genügend ausgeglichen haben, so dass man den Hals theoretisch als unendlich lang ansehen kann. In der zweiten Versuchsreihe schien es nun zweckmässig, die Länge des Lagerhalses auf 42 mm herabzusetzen, damit der Uebergang durch den Zwischendurchmesser  $d_1$  in den gegebenen Aussendurchmesser von 29 mm ein genügend sanfter sei. Auch hier ist die Annahme vollständigen Ausgleichs für die Schätzung zulässig, da der Halbmesser der an diesen Stäben verwendeten Hohlkehlen nur bis auf 2 mm heraufreicht.

Ueberblicken wir die graphische Darstellung der Ergebnisse, so erkennen wir mit voller Klarheit, wie sehr durch die zunehmende Schärfe der Hohlkehle die Biegungsfestigkeit bei gleicher Belastung abnimmt. Wir können die bei Welle Nr. 1 eingestellte Beanspruchung als Grenzwert für die scharfe Hohlkehle betrachten, da hier nach rund zwei Millionen Biegungen die Festigkeit noch dermassen wenig gelitten hat, dass der Stab bei einer Beanspruchung mit  $2,0 \text{ t/cm}^2$  noch 252680 Biegungen bis zum Bruche ausgehalten hat. Extrapoliert man der Schätzung nach die Kurven für die Hohlkehlen von 2 und 5 mm Hohlkehlenhalbmesser, so wird man auf etwa 2,0 t und  $2,3 \text{ t}$  als Grenzen der Festigkeit geführt. Diese Werte sind als Abhängige des Verhältnisses  $\varrho : d_0$ , wo  $\varrho$  den Hohlkehlenhalbmesser bedeutet, in Abbildung 6 dargestellt. Rechnen wir die Grenzbiegungsfestigkeit  $K_{bg}$ , die im wesent-

lichen dasselbe ist, wie die sogen. Schwingungsfestigkeit, in Teilen der statischen Zugfestigkeit  $K_z$  bzw. der Streckgrenze  $\sigma_s$  aus, so erhalten wir folgende Verhältnisse:

Verhältnis $\frac{\varrho}{d_0}$	0	0,111	0,277
Grenzbiegungsfestigkeit $K_{bg} \text{ t/cm}^2$	1,5	2,0	2,3
Verhältnis $K_{bg}$ : Zugfestigkeit	0,338	0,453	0,522
Verhältnis $K_{bg}$ : Streckgrenze	0,461	0,616	0,708

Der Einfluss des Verhältnisses der Wellenstärke im Hals und in der sich anschliessenden Fortsetzung tritt uns deutlich in Abb. 4 entgegen. Die Abnahme der Grenzfestigkeit ist hiernach um so grösser, je kleiner das Verhältnis  $d_0 : d_1$  gewählt wird. Allerdings fallen die mit den Baustoffen der zweiten Serie gewonnenen Werte aus der Reihe derjenigen der ersten Versuchsreihe heraus, was auf die erwähnte Ungleichheit der Baustoffe zurückzuführen ist. Bemerkenswert ist, dass dieser Unterschied bei der scharfen Hohlkehle sozusagen verschwindet und dass hier auch der Einfluss des Verhältnisses  $d_0 : d_1$  fast vernachlässigbar ist. Wenn man sich erlaubt, die gewonnenen Kurven anhand der in der ersten Versuchsreihe gewonnenen Schaulinien zu extrapoliieren, so würde sich als Grenzbiegungsfestigkeit für die Kurven  $a_1$ ,  $a_2$  etwa 1,4 bis 1,6  $\text{t/cm}^2$ , für die Kurven  $b_1$ ,  $b_2$  1,7 bis 1,8  $\text{t/cm}^2$  ergeben. Diese Werte sind in Abb. 7 graphisch dargestellt, deren Ergänzung durch weitere Punkte wohl sehr wünschbar wäre, um eine Extrapolation nach abnehmenden und zunehmenden Werten des Verhältnisses  $d_0 : d_1$

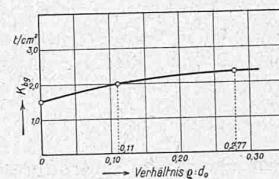


Abb. 6.

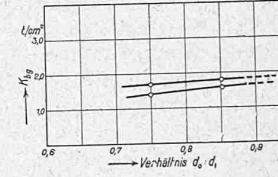


Abb. 7.

zu ermöglichen. Allein schon das vorhandene Material lehrt, dass in unzähligen Fällen der Praxis durch Eindrehung eines Wellenhalses in durchgehende Wellen eine erhebliche und unvermutete Schwächung dieses Maschinenteiles hervorgerufen worden ist. In der Tat wird ein Rundungshalbmesser von 11% des Wellendurchmessers, den man selten ausführt, schon als sehr gut gelten können; trotzdem wird die Dauerbiegungsfestigkeit im Vergleich mit derjenigen einer glatten Welle, wie die Schaubilder lehren, in bedeutendem Masse herabgesetzt. Schätzen wir die Grenzfestigkeit der unversehrten Welle, da sie grösser sein muss als die Festigkeit bei 5 mm Hohlkehlenhalbmesser, zu etwa  $2,5 \text{ t/cm}^2$  ein, so erleidet sie durch die Hohlkehle mit  $\frac{\varrho}{d_0} = 0,11$  eine Einbusse von  $\frac{0,5}{2,5} = 20\%$ . Die Einbusse vergrössert sich, wenn sich die Hohlkehle der scharfen Ecke nähert auf  $\frac{1,0}{2,5} = 40\%$ . Die übliche Rechnungsart ist daher in Bezug auf den wahren Sicherheitsgrad von abgesetzten Wellen in einer Täuschung befangen und die vorliegenden Versuche dürften geeignet sein, die Aufmerksamkeit des Konstrukteurs auf den verkannten Gefahrpunkt zu lenken.

#### Zusammenfassung.

Der Einfluss der Hohlkehle auf die Festigkeit von Wellen mit eingedrehtem Lagerhals bei wiederholter Biegungsbeanspruchung („Dauer-Biegung“) wurde in den praktisch benützten Grenzen des Rundungshalbmessers untersucht. Bei einem Verhältnis des Rundungshalbmessers zum Wellendurchmesser von 0,28 bis 0 (scharfe Ecke) sinkt die Dauerbiegungsfestigkeit auf 52% bzw. 34% der ursprünglichen Zugfestigkeit. Je kleiner das Verhältnis des Lagerhalsdurchmessers zum Wellendurchmesser ist, desto stärker tritt die Schwächung durch die Hohlkehle hervor.

<sup>1)</sup> Siehe Schüle, « Sitzungsberichte der schweizer. Mitglieder des Internationalen Verbandes für die Materialprüfungen der Technik », Nr. 2. Zürich 1909, Verlag der Eidg. Materialprüfungsanstalt.

<sup>2)</sup> Bis jetzt liegen nur für den Einfluss von runden Bohrungen im unendlich ausgedehnten Blech von Kirsch und für halbkreisförmige Kerben am Rande eines Stabes von Leon Lösungen vor. Wir verweisen auf die wertvollen Erörterungen des letztern über Ermüdungserscheinungen an Baustoffen in der Z. d. V. d. I. 1917, Seite 192.