

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

Artikel: Hohlkehlenschärfe 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. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 02.04.2025

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. — Konkurrenzen: Bauten für das Kraftwerk Mühleberg. — 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 Biegebungsbeanspruchung 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.

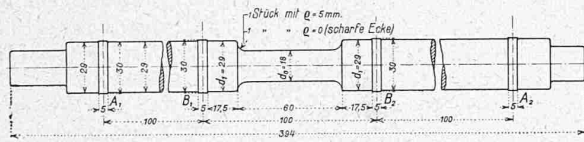


Abb. 1. Probestäbe für die erste Versuchsreihe.

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 aufgedrückt 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 Biegemoment 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	1	2
Elastizitätskoeffizient	E	—	2,161 t/cm ²
Proportionalitätsgrenze	σ_p	—	2,76 "
Streckgrenze	σ_s	3,245	3,15 "
Zugfestigkeit	K_z	4,417	4,54 "
Dehnung nach Bruch	λ	26,8	27,9 %
Kontraktion	φ	64	64 %
Qualitätskoeffizient	$K_z \lambda$	1,18	1,27 tcm

Die Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle 1 vereinigt und in Abb. 2 graphisch dargestellt.

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

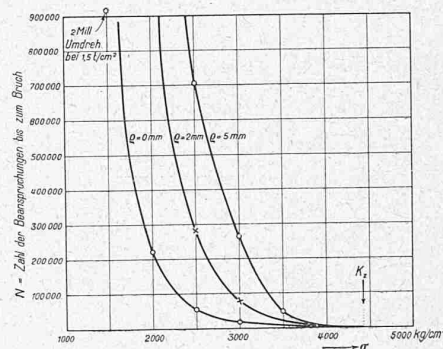


Abb. 2.

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

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 vorfindet.

Eine umfassende Zerreißprobe ergab als:

Elastizitätskoeffizient	$E = 2,131$ 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	$K_z \lambda = 1,24$ 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

Tabelle I

1. Versuchsreihe

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
Biegebungsbeanspruchung σ 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	$> 2 \cdot 10^6$	220 269	54 836	18 516	284 676	77 610	705 396	265 905	46 902

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 ϱ 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
Biegungsbeanspruchung σ 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

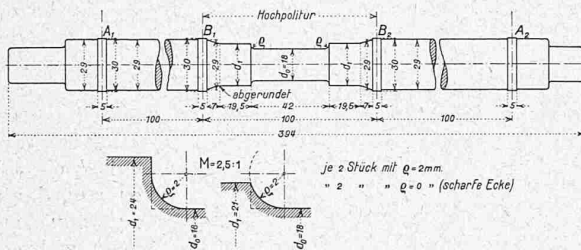


Abb. 3. Probestäbe für die zweite Versuchsreihe.

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 Amslerschen Fallhammer, ausgedrückt in kgm/cm^2 des Bruchquerschnittes an der Kerbe, betrug bei dem Wellenmaterial der

	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 kgm/cm^2 Kerbzähigkeit geschätzt.

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

$\varrho = 0$ wurden unmittelbar vor dem Bruch in der scharfen Ecke ringsum rissig; die Bruchflächen (siehe Abb. 5, Nr. 1 und 2) zeigen einen scharfen, 0,1 bis 0,2 mm hervortretenden Rand und sind ins Innere des stärkern Wellenteiles leicht konkav; der Kern wurde im letzten Moment gewaltsam zerissen und hat infolgedessen eine gröbere Struktur.

Die Wellen mit $\varrho = 2$ 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 und 6) ist leicht konkav gegen das

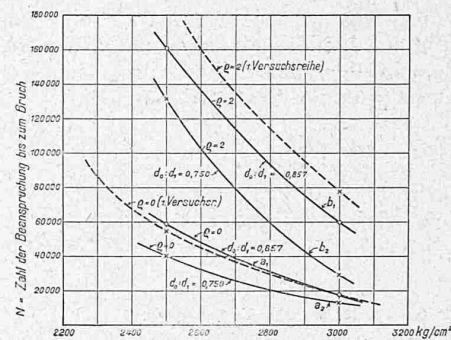


Abb. 4.

starke Ende der Welle; ringsum sind kleinere Zacken aufgetreten, die auf sehr feine verwalzte Blasen im Material hindeuten.

Die Wellen mit der stärkern Abrundung ($\varrho = 5$ mm) sind an einer Stelle (Abb. 5, Nr. 7) oder an 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 Anschluss teil eintritt.

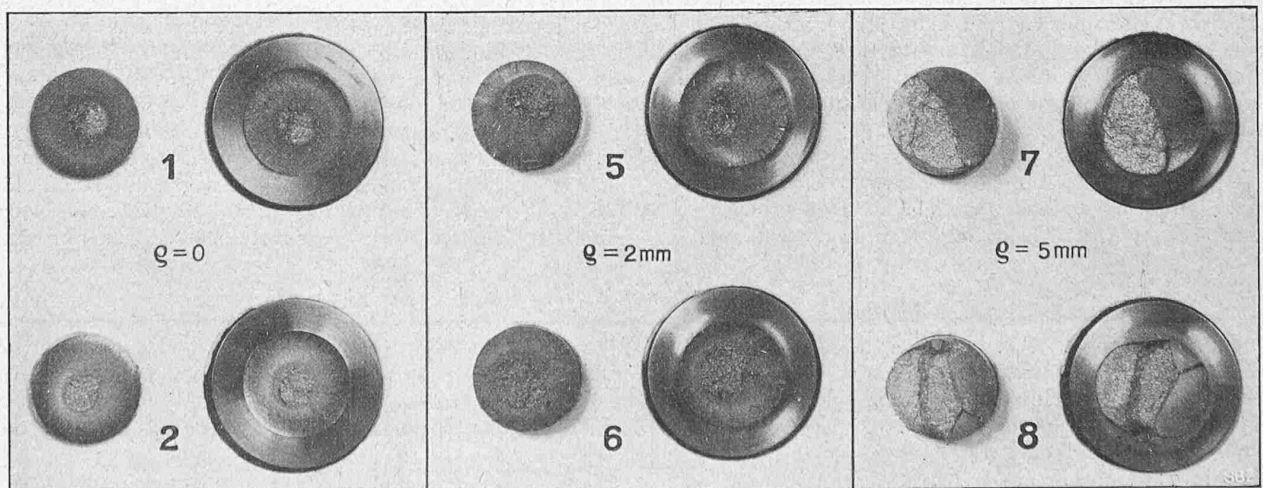


Abb. 5. Bruchflächen der Versuchstäbe mit verschiedenen Hohlkehlenschärfen; oben Stäbe der ersten, unten Stäbe der zweiten Versuchsreihe.

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 Blasen¹⁾,
- b) infolge der Wirkung der Hohlkehle.

Bei relativ grossem Halbmesser der Hohlkehle (hier $\rho = 5 \text{ mm}$) überwiegt die unter a) erwähnte Ursache; der Bruch beginnt an einer Stelle durch einen feinen Riss der nach und nach sich sichelförmig im Querschnitt ausdehnt. Bei scharfer Abrundung ($\rho = 0$ bis 2 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 $\rho = 5 \text{ mm}$ und mit $2,5 \text{ t/cm}^2$ auf Biegung beansprucht. Der Bruch trat ein nach 824 263 Umdrehungen, gegenüber 705 396 bei Welle Nr. 7. Das Aussehen der Bruchfläche war dasselbe wie bei Nr. 7. Der nicht sehr grosse Unterschied in den Umdrehungszahlen rührt 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 wurde²⁾. 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, sodass 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 Biegefestigkeit 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 252 680 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 $2,0 \text{ t}$ und $2,3 \text{ t}$ als Grenzen der Festigkeit geführt. Diese Werte sind als Abhängige des Verhältnisses $\rho : d_0$, wo ρ den Hohlkehlenhalbmesser bedeutet, in Abbildung 6 dargestellt. Rechnen wir die Grenzbiegefestigkeit K_{bg} , die im wesent-

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

Verhältnis $\frac{\rho}{d_0}$	0	0,111	0,277
Grenzbiegefestigkeit $K_{bg} \text{ t/cm}^2$	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 extrapolieren, so würde sich als Grenzbiegefestigkeit 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 $d_0 : d_1$

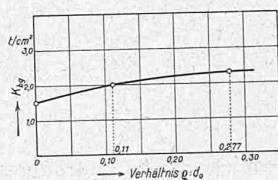


Abb. 6.

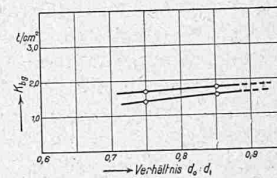


Abb. 7.

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 Dauerbiegefestigkeit im Vergleich mit derjenigen einer glatten Welle, wie die Schaubilder lehren, in bedeutender 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 $\frac{\rho}{d_0} = 0,11$ 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 Gefahrenpunkt zu lenken.

Zusammenfassung.

Der Einfluss der Hohlkehle auf die Festigkeit von Wellen mit eingedrehtem Lagerhals bei wiederholter Biegebeanspruchung („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 Dauerbiegefestigkeit 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.

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

²⁾ 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.