

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 105/106 (1935)
Heft: 14

Artikel: Die Dreh- und Biegewechselfestigkeit genuteter Probestäbe an einer Keilverbindung und die Erhöhung der Dauerhaltbarkeit durch das Oberflächendrücken
Autor: Foppl, Otto
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-47414>

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: 01.04.2025

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

INHALT: Die Dreh- und Biegewechselfestigkeit genuteter Probestäbe und einer Keilverbindung und die Erhöhung der Dauerhaltbarkeit durch das Oberflächendrücken. — Bestimmung der Rauheitszahl für Druckleitungen. — Der Baublock „Schmiede Wiedikon“ in Zürich. — Pfähle und Spundwände in U. S. A. — Von der Tätigkeit der Internationalen Vereinigung für Brückenbau und Hochbau. — Mitteilungen: Tiefe Temperaturen. Das Programm für öffentliche Bauten von Paris.

Internat. techn. Versuche mit Behältern. Eidg. Amt für Verkehr. Neue Stuttgarter Ortsbausatzung. Wasserschlag-Probleme. Leichtmetall-Tagung. „Mutatoren“. Internat. Verband für Wohnungswesen. Walzerzeugnisse von 53 m Länge. 3. schweiz. Verkehrskongress in Montreux. — Wettbewerbe: Gewerbliche Berufsschule Winterthur. Ganz billige Einfamilienhäuser. — Nekrologe: Jean Schnyder. G. D. Illich. Oskar Maria Smreker. Hans Haueter. — Literatur. — Mitteilungen der Vereine.

Band 105

Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

Nr. 14

Die Dreh- und Biegewechselfestigkeit genuteter Probestäbe und einer Keilverbindung und die Erhöhung der Dauerhaltbarkeit durch das Oberflächendrücken.

Von OTTO FÖPPL, VDI und WILHELM MEYER, VDI, Braunschweig, Wöhler-Institut.

A. EINLEITUNG.

In den letzten Jahren sind im Wöhler-Institut der Technischen Hochschule Braunschweig Versuche durchgeführt worden, die die Bestimmung der Wechselfestigkeiten für Biegung und Verdrehung von Probestäben mit Keilnuten und von Keilverbindungen für verschiedene Werkstoffe zum Ziele hatten ¹⁾. Neben der Ermittlung der Erniedrigung der Dauerhaltbarkeit der mit Keilnuten versehenen Probestäbe, bzw. der gesamten Keilverbindung (Passfederanordnung) sollte ferner festgestellt werden, wie weit bei solch ungünstigen Querschnittsformen die Erniedrigung der Dauerhaltbarkeit durch das Oberflächendrücken wieder ausgeglichen werden kann. Die genuteten Probestäbe wurden auf Verdrehung und Biegung beansprucht, während die mit Keil und Schwungmassen (Keilverbindung) versehenen Probestäbe bisher nur auf Biegeschwingungen untersucht wurden. Zur Zeit werden die Versuche im Wöhler-Institut in der Weise fortgeführt, dass die gesamte Keilverbindung auch auf Verdrehungsbeanspruchung untersucht wird.

B. DIE UNTERSUCHTEN WERKSTOFFE.

Zur Untersuchung gelangten verschiedene einfache und vergütete C-Stähle, sowie ein VCN-Stahl. Für die zuerst angestellten Versuche auf Verdrehung wurden Probestäbe nach Zahlentafel 1, für die Biegeversuche Probestäbe nach Zahlentafel 2 gewählt.

¹⁾ Die ausführlichen Versuchsergebnisse sind veröffentlicht in: 1. „Die Drehwechselfestigkeit genuteter Stäbe“, Dr. Ing. W. Meyer; 2. „Die Biegewechselfestigkeit genuteter Stäbe“, Dr. Ing. H. Wiecker; 3. „Die Biegewechselfestigkeit einer Keilverbindung“ (Passfederanordnung), Dr. Ing. H. Koch. Die drei Arbeiten sind erschienen als Heft 18, 19 und 20 der Mitteilungen des Wöhler-Instituts, Braunschweig. NEM-Verlag, Berlin.

Der Werkstoff für die Probestäbe der *Verdrehungs-* Versuche wurde in 3 bis 6 m langen 40 mm Vierkantstangen geliefert. Die kurzen dicken Probestäbe von 230 mm Länge wurden in ihrem mittleren Teil auf einer Länge von 90 mm auf 35 mm \varnothing abgedreht. Ein fertig bearbeiteter Probestab ist in Abb. 1 dargestellt. Der Werkstoff für die *Biegeschwings-* Probestäbe wurde in langen Stangen von 32 mm \varnothing angeliefert. Abb. 2 zeigt den fertig bearbeiteten Probestab. Bei der Keilverbindung sind jedoch statt der drei um 120° versetzten Keilnuten nur zwei um 180° versetzte Nuten angebracht. Die Keilnut erhielt abweichend von den Normvorschriften folgende Abmessungen: Länge = 60 mm; Breite = 10 mm; Tiefe = 4,5 mm.

C. DIE VERSUCHSEINRICHTUNGEN.

Für die Untersuchungen der genuteten Probestäbe auf Drehwechselfestigkeit stand die Drehschwingungsmaschine Bauart Föppl-Busemann zur Verfügung, während für die Untersuchung der Probestäbe auf Biegung die bekannte Dauerbiegemaschine des Wöhler-Institutes mit umlaufendem Probestab benutzt wurde ²⁾. Beim Betrieb der Drehschwingungsmaschine wird der Verdrehungswinkel φ der Schwungmasse abgelesen. Die jeweilige Randspannung τ_0 wird vor Inbetriebnahme der Maschine durch Aufnahme einer statischen Eichkurve in Abhängigkeit vom Verdrehungswinkel φ festgestellt. Abb. 3 zeigt die schematische Anordnung der Eichvorrichtung. Bei der Berechnung der Randspannungen wurde für beide Beanspruchungsarten das Widerstandsmoment für den *vollen* Kreisquerschnitt zu Grunde gelegt, da es hauptsächlich darauf ankam, Vergleichswerte zu er-

²⁾ Föppl, Becker, v. Heydekampf: „Die Dauerprüfung der Werkstoffe“. Springer, Berlin 1929.

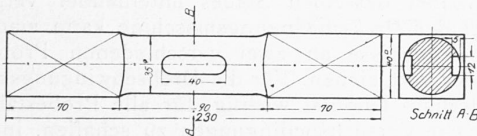


Abb. 1. Probestab für Verdrehungsversuche.

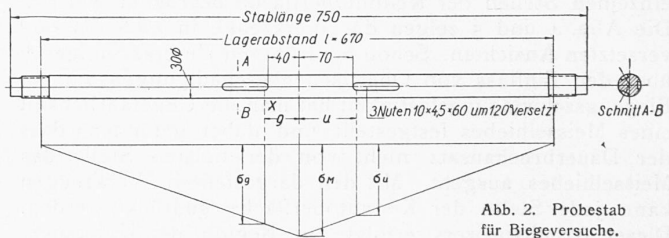


Abb. 2. Probestab für Biegeversuche.

Zahlentafel 1: Untersuchte Werkstoffe.

Werkstoff	St. 37.12	St. 50.11	A. 12.0 entspr. St. C. 60 61	A. 7.0 entspr. St. C. 35.61
	Firma	Peiner Walzwerk	Peiner Walzwerk	Krupp Essen
Zusammensetzung	C = 0,14 % Mn = 0,48 % P = 0,03 % S = 0,035 %	C = 0,33 % Si = 0,18 % Mn = 0,90 % P = 0,028 % S = 0,024 %	C = 0,63 % Si = 0,31 % Mn = 0,65 % P = 0,025 % S = 0,024 %	C = 0,33 % Si = 0,33 % Mn = 0,53 % P = 0,012 % S = 0,021 %
Bruchfestigkeit	42,8 kg/mm ²	56,2 kg/mm ²	88,4 kg/mm ²	65,4 kg/mm ²
Streckgrenze	21,4 kg/mm ²	31,5 kg/mm ²	53,0 kg/mm ²	50,4 kg/mm ²
Dehnung	$\delta_{10} = 25 \%$	$\delta_{10} = 22 \%$	$\delta_5 = 20 \%$	$\delta_5 = 26,3 \%$
Biegeschwingsfestigkeit	—	—	43,0 kg/mm ²	32,0 kg/mm ²
Drehwechselfestigkeit	—	—	24 bis 25 kg/mm ²	18 bis 19 kg/mm ²

Zahlentafel 2: Untersuchte Werkstoffe.

Werkstoff	St. 37.11	St. 34.11	St. 50.11	VCN 25 h
	Firma	Wusag Braunsch.	Peiner Walzwerk	Peiner Walzwerk
Zusammensetzung	—	C = 0,075 % Mn = 0,40 % P = 0,24 % S = 0,028 %	C = 0,34 % Mn = 0,91 % P = 0,029 % S = 0,030 % Si = 0,17 %	C = 0,32 % Ni = 2,57 % Cr = 0,91 % Mn = 0,56 % Si = 0,23 % P = 0,014 % S = 0,01 %
Bruchfestigkeit	44,2 kg/mm ²	36,7 kg/mm ²	58,5 kg/mm ²	82,2 kg/mm ²
Streckgrenze	—	24,7 kg/mm ²	36,0 kg/mm ²	75,2 kg/mm ²
Dehnung	$\delta_{10} = 30,6 \%$	$\delta_{10} = 27,5 \%$	$\delta_{10} = 20,3 \%$	$\delta_5 = 22,5 \%$

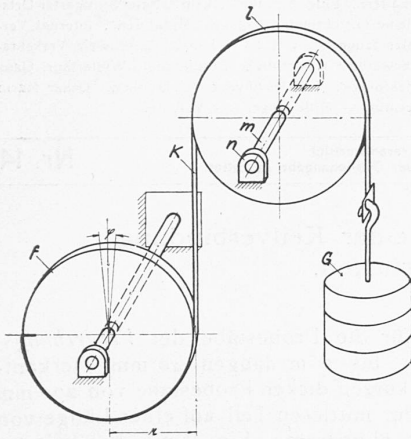


Abb. 3. Schematische Darstellung der Eichvorrichtung.

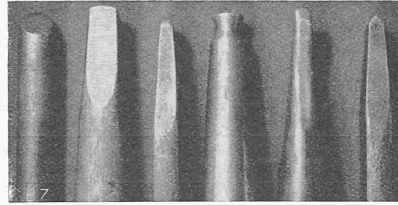


Abb. 4 u. 5. Drückwerkzeuge: links von vorn, rechts Seite.

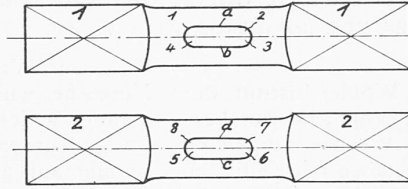


Abb. 6. Darstellung der Bruchansätze.

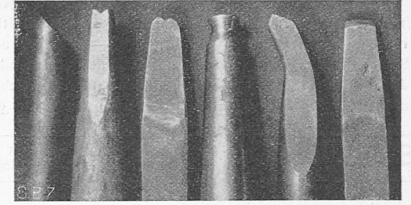


Abb. 7. Dauerbruchansatz Stab 699 (Stab nach der Dauerprüfung statisch verdreht).

Zahlentafel 3: Versuchsergebnisse.

Werkstoff	Art der Dauerprüfung	Erniedrigung der Dauerhaltbarkeit infolge der Keilnuten		Einfluss des Oberflächendrucks bei plangefrästen Stäben	
		Versuchsreihe: U	Versuchsreihe: UP	Versuchsreihe: GP	bei der Passfederverbindung
St. 37.12	Drehschwingungen	22 %	13,8 %	5 ÷ 20 %	—
St. 37.11	Biegeschwingungen	46,5 %	41,4 %	—	∞ 15 %
	Passfederverbindung	62,2 %			
St. 34.11	Biegeschwingungen	—	—	11,5 ÷ > 16 %	∞ 19,0 %
	Passfederverbindung	54 %			
St. 50.11	Dreh- u. Biegeschwingungen	Drehschwingung 29,5 %	Drehschwingung 27,7 %	Drehschwingung 5 ÷ 7 %	∞ 20 %
	Passfederverbindung	67 %		Biegeschwingung bis 16 %	
St. C. 60.61	Drehschwingungen	47,5 %	47,5 %	4 ÷ 24 %	—
St. C. 35 61	Drehschwingungen	36,2 %	36,2 %	15 ÷ 20 %	—
VCN 25 h	Biegeschwingungen	—	—	16 ÷ > 20 %	—

halten. Da die Biegeschwingungsprobestäbe zu beiden Seiten des Mittellagers mit zwei bzw. drei Nuten versehen waren, pendelte der Wert für das Widerstandsmoment tatsächlich bei jeder Umdrehung des Stabes zwischen einem Grösst- und einem Kleinstwert.

Für das Oberflächendrücker wurden nach und nach verschiedene Werkzeuge entwickelt, mit deren Hilfe die einzelnen Stellen der Keilnutoberfläche bearbeitet wurden. Die Abb. 4 und 5 zeigen die Werkzeuge in zwei um 90° versetzten Ansichten. Schon bei früheren Untersuchungen³⁾ über den Einfluss von Oberflächenbeschädigungen auf die Biegungsschwingungsfestigkeit hat man die Ungefährlichkeit eines Meisselhiebes festgestellt und dabei gefunden, dass der Dauerbruchansatz nicht von der tiefsten Stelle des Meisselhiebes ausgeht. Mit den dargestellten Werkzeugen kann jede Stelle der Keilnutoberfläche gedrückt werden. Dieser Arbeitsprozess erfolgte zu Beginn der Untersuchungen zunächst von Hand. Der Nachteil einer solchen Arbeitsweise ist klar: Irgendwelche Grössen, die für das Drücken von Bedeutung sein können, sind zahlenmässig nicht zu erfassen; der individuelle Einfluss ist zu stark, so dass ein Vergleich mehrerer Probestäbe infolge dieser verschieden starken Einflüsse nicht möglich ist.

Es wurde dann eine Vorrichtung geschaffen, die nach dem bewährten Prinzip der Drückrolle arbeitet, die beim Oberflächendrücker zylindrischer Stäbe verwendet wird. Diese Vorrichtung wurde jedoch bald wieder verlassen, da die Erfolge, die mit ihr erreicht wurden, zum grössten Teil geringer waren, als die beim Hämmern von Hand. So wurde wieder auf das Hämmern der Oberfläche mit den bereits erwähnten Werkzeugen zurückgegriffen. Um hierbei

die Grösse des Druckes messen zu können, ist als Schlagwerkzeug ein Presslufthammer angewandt worden.

D. DIE DURCHFÜHRUNG DER DAUERVERSUCHE.

Die Probestäbe der Biegeschwingungsmaschine haben hinsichtlich der Versuchsauswertung den grossen Vorzug, dass man die Ergebnisse der beiden, verschieden behandelten Hälften desselben Stabes miteinander vergleichen kann. Bei der Drehschwingungsmaschine kann man immer nur die Ergebnisse an zwei verschiedenen Probestäben miteinander vergleichen. Für die Drehschwingungsversuche war es deshalb äusserst wichtig, für alle Probestäbe möglichst gleiche Versuchsbedingungen zu schaffen, indem sie alle gleichmässig sauber bearbeitet wurden.

Um die Zeit für die Durchführung der Dauerversuche abzukürzen, wurde die Schwingungsfestigkeit für alle Probestäbe auf $\rho = 2 \cdot 10^6$ Lastwechsel bezogen. Die Beanspruchung in der ersten Belastungsstufe wurde so gewählt, dass der Stab in dieser ersten Stufe nicht bricht. Nach Ueberstehen der zwei Millionen Schwingungen wird die Beanspruchung um 10 % gesteigert, und so fort, bis in irgendeiner Stufe der Bruch des Stabes eintritt. Die Bestimmung der Wechselfestigkeit bei nicht voll durchlaufenen Stufen wird durch Interpolation vorgenommen, wie es von O. Föppl⁴⁾ angegeben ist. Die Anfangsspannung wird so gewählt, dass der Stab in der zweiten oder dritten Stufe bricht.

Bei den umlaufenden Probestäben der Biegeschwingungsmaschine werden die Keilnuten auf den beiden Stabhälften in verschiedenen Entfernungen von der Stabmitte angebracht. Die näher nach der Stabmitte zu liegenden Nuten (höhere Beanspruchung) werden mit entsprechenden Werkzeugen an ihrer Oberfläche gedrückt. Da eine grad-

³⁾ W. Zander und K. Günther: „Der Einfluss von Oberflächenbeschädigungen auf die Biegungsschwingungsfestigkeit“, Heft 1 und 2 der Mitteilungen des Wöhler-Institutes. NEM-Verlag Berlin 1929.

⁴⁾ O. Föppl: Maschinenbau 1922/23, Heft 25/26.

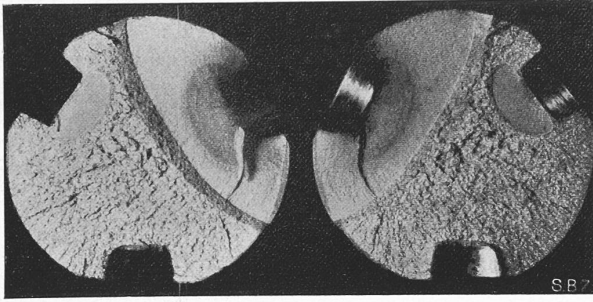


Abb. 8. Bruchfläche des Stabes 758 mit Rastlinien.

linige Momenten- und damit Biegespannungsverteilung über die ganze Länge des Probestabes angenommen wird (Abb. 2), kann aus der Lage des Bruches die Spannung ermittelt werden. Tritt der Dauerbruch in den ungedrückten Nuten ein, so werden beim folgenden Stabe die ungedrückten Nuten noch weiter aus der Mitte entfernt angeordnet, bis die Stabhälfte mit den gedrückten Nuten bricht. Der Einfluss des Oberflächendrucks auf die Erhöhung der Dauerhaltbarkeit wird in Prozenten angegeben, bezogen auf die Schwingungsfestigkeit des ungedrückten Stabes.

Bei den Probestäben der Drehschwingungsmaschine war es nötig, von jeder der untersuchten Werkstoffsorte einige Stäbe im ungedrückten Zustande zu untersuchen. Auf den hieraus gefundenen Mittelwert der Schwingungsfestigkeit unter Berücksichtigung der Keilnuten wird der Einfluss des Drückens bezogen.

E. DIE VERSUCHSERGEBNISSE.

In der Zahlentafel 3 sind die Versuchsergebnisse kurz zusammengestellt.

Bei dem weitaus grössten Teil der untersuchten Probestäbe auf Drehschwingungen setzte der Dauerbruch an der oberen Keilnutkante an der Stelle an, wo die gradlinige Begrenzung in die Rundung übergeht. Der Bruch verläuft unter 45° zur Stabaxe. Bei Verdrehungsbeanspruchung treten unter 45° zur Stabaxe reine Normalspannungen auf. Diese haben bei den meisten Stäben den Dauerbruch verursacht. Die Abb. 6 zeigt eine schematische Darstellung der Bruchansätze.

In der letzten Vertikalspalte der Zahlentafel 3 ist der prozentuale Einfluss des Oberflächendrucks angegeben. Dazu ist zu bemerken, dass sich die geringeren Werte auf das Oberflächendrücker mit der Drückrolle und auf das Drücken mit den Werkzeugen von Hand beziehen, während die besseren Ergebnisse bei Verwendung des Presslufthammers erreicht wurden. Die Höhe des Luftdruckes richtete sich natürlich nach der Härte des jeweiligen Werkstoffes, um eine zu starke Verformung der Keilnuten zu vermeiden.

Eine Erhöhung der Dauerhaltbarkeit von 20 % gleicht beim St. 37.12 den Einfluss der Keilnuten nahezu aus; der Dauerbruch kann von irgendeiner Stelle der Staboberfläche seinen Ausgang nehmen. Der Stab 699 (Abb. 7), bei dem durch das Oberflächendrücker eine 20 %ige Erhöhung erreicht wurde, zeigt einen Dauerbruchansatz im vollen Querschnitt.

Schwierigkeiten, die beim Drücken der oberen Keilnutkante mit der Drückrolle auftraten, führten dazu, diese obere Kante abzufräsen. Damit wird erreicht, dass diese obere Begrenzung in eine Ebene fällt. Bei den weicheren Werkstoffsorten bedingt diese Massnahme eine Steigerung der Dauerhaltbarkeit um etwa 10 %. Dagegen konnte bei den Stahlorten St. C. 60.61, St. C. 35.61 und VCN 25 h eine Erhöhung durch das Abfräsen nicht nachgewiesen werden.

Eine typische Dauerbruchfläche mit dem grobkörnigen statischen Restbruch und mit klar hervorstechenden Rastlinien zeigt der Stab 758 der Biegeschwingungstäbe (Abbildung 8). Die Rastlinien zeigen die Entwicklung des

Dauerbruches und geben auch über die Geschwindigkeit seines Fortschreitens Aufschluss. Bei $8,47 \cdot 10^6$ Lastwechseln hatte die Maschine bei Erhöhung der Belastung etwa 2 h gestanden. Nach $8,64 \cdot 10^6$ Umdrehungen schaltete sie infolge unruhigen Laufes aus und stand etwa 3 h. Da der im Grunde bereits eingetretene Dauerbruch nicht bemerkt war, wurde die Maschine wieder in Betrieb genommen. Nach $8,74 \cdot 10^6$ Umdrehungen setzte sich die Maschine still. Der Dauerbruch war jetzt ausserhalb der Nuten am Umfang des Stabes sichtbar; der Stab wurde in der Werdermaschine abgerissen. Die Rastlinien geben die Ausbreitung des Dauerbruches zur Zeit der beiden Pausen an. Die Bruchfront schritt von der ersten Rastlinie bis zur zweiten während 165 500 Schwingungen fort und hatte dabei die Flanken der Nut noch nicht durchlaufen. Von der zweiten Pause bis zum Ausbau des Stabes ist der Dauerbruch während 89 700 Lastwechseln viel schneller fortgeschritten. Es ist fast der halbe Stabquerschnitt vom Dauerbruch zerstört. Der Verlauf der Bruchbegrenzung ist nicht mehr ellipsenförmig, sondern verhältnismässig flach. Am Umfang des Stabes schreitet der Bruch schneller fort als in der Tiefenrichtung auf die Stabmitte zu.

An einigen Stäben des Werkstoffes St. 50.11 sind die Versuche nicht in stufenweiser Belastung durchgeführt worden. Es sind bei gleicher Belastung gedrückte und ungedrückte Stäbe untersucht worden. Die Zahl der Lastwechsel bis zum Bruch wurde verglichen. Die Beanspruchung für die Mitte wurde so gewählt, dass an der Stelle X (Abb. 2) etwa die Schwingungsfestigkeit der ungedrückten Stäbe $\sigma_{schw. (\rho = 2 \times 10^6)}$ erreicht war. Für die ungedrückten, genuteten und abgefrästen Stäbe wurde an der Bruchstelle im Mittel die Schwingungsfestigkeit $\sigma_X (\rho = 2 \times 10^6) = 16,76 \text{ kg pro mm}^2$ gefunden. Diesem Wert entspricht bei einer Entfernung der Nuten von 70 mm von Mitte Stab ein Wert $\sigma_{X \text{ Mitte } (\rho = 2 \times 10^6)} = 21,6 \text{ kg/mm}^2$. Bei dieser Beanspruchung liefern die Stäbe dieser Versuchsreihe in der Biegeschwingungsmaschine bis zum Bruch. Für die ungedrückten Stäbe hätte der Bruch eigentlich bei einer Lastwechselzahl $2 \cdot 10^6$ eintreten müssen, da diese Stäbe gerade mit der Schwingungsfestigkeit bezogen auf $\rho = 2 \cdot 10^6$ beansprucht worden sind. Dass die ungedrückten Stäbe schon nach weniger als zwei Millionen Lastwechseln brachen, ist wohl darauf zurückzuführen, dass sie bei den vorliegenden Versuchen gleich mit der Höchstspannung beansprucht, also nicht hochtrainiert worden sind.

Die Versuche zeigen einwandfrei die Erhöhung der bis zum Bruch erforderlichen Lastwechselzahl durch das Oberflächendrücker. Sämtliche gedrückten Stäbe überdauerten mehr als 25 Millionen Lastwechsel, ohne Bruchansätze zu zeigen, während alle ungedrückten Stäbe bei weniger als zwei Millionen Lastwechseln brachen.

Zahlentafel 4.

Stab Nr.	Art des Drückens für Nut 1 bis 6	Erreichte Lastwechselzahl bei $\rho = 2 \cdot 10^6 = 16,76 \text{ kg/mm}^2$	Bemerkungen
770	ungedückt	1 793 600	mehrere Dauerbruchansätze
771	"	1 086 100	" "
774	"	1 330 200	" "
769	2.1 ; 6.2,0 atü	25 000 000	kein Dauerbruchansatz
772	2.1 ; 6.2,0 "	25 000 000	" "
773	2.1 ; 6.2,0 "	25 000 000	" "

Eine Beziehung zwischen der erreichten Erhöhung der Dauerhaltbarkeit und einem bestimmten Druck bzw. einer gewissen Schlagarbeit konnte durch die Untersuchungen nicht ermittelt werden. Es war auch nicht möglich, eine Gesetzmässigkeit beim Entstehen und in der Reihenfolge des Auftretens der Dauerbrüche zu erkennen.

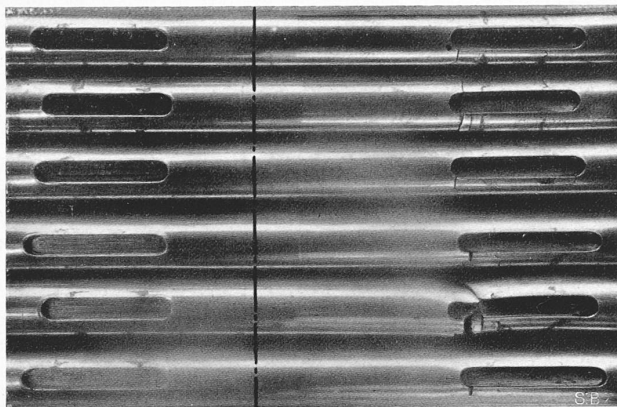


Abb. 12. Stäbe in der Nutenanordnung 120-0-70, bei denen ein einwandfreier Erfolg des Oberflächendrucks erzielt wurde. Links ungedrückte, rechts gedrückte Keilnuten. Vorderansicht.

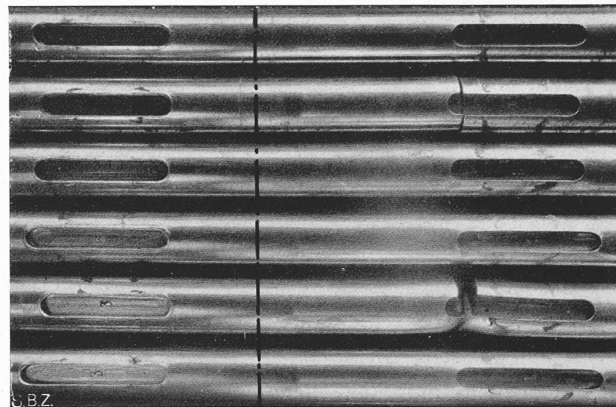


Abb. 13. Stäbe in der Nutenanordnung 120-0-70, bei denen ein einwandfreier Erfolg des Oberflächendrucks erzielt wurde. Links ungedrückte, rechts gedrückte Keilnuten. Rückansicht.

Der Erfolg des Oberflächendrucks war bei den vorliegenden Versuchen auf Drehschwingungen im Verhältnis zu den an zylindrischen Stäben gewonnenen Ergebnissen gering. Zum Teil ist das darauf zurückzuführen, dass die vorliegenden Probestäbe verhältnismässig dick (35 mm \varnothing) waren, und dass allgemein bei dicken Stäben keine so grosse Steigerung der Dauerhaltbarkeit durch das Oberflächendrücken erreicht wird wie bei dünnen Stäben.

F. ERGEBNISSE AN PASSFEDERVERBINDUNGEN ZWISCHEN WELLE UND SCHWUNGMASSE.

1. *Das Scheuern.* Die Dauerfestigkeit der Versuchsstäbe in dieser Anordnung wird durch die Passfeder und Schwungmassen stark beeinflusst. Eine der auffälligsten Erscheinungen, die meistens den Dauerbruchansatz verursacht, ist das Scheuern der zur Berührung kommenden Teile. Auf die Gefährlichkeit des Scheuerns weisen vor allem Thum und Wunderlich hin⁵⁾.

Bei den vorliegenden Versuchen wird die Randfaser des Probestabes abwechselnd auf Zug und Druck beansprucht; sie ist also bei Zugbeanspruchung einer Dehnung, bei Druckbeanspruchung einer Stauchung unterworfen. Dieser Längenänderung entsprechend tritt durch das Gleiten der Staboberfläche unter den Kanten der Schwungmassen Scheuern ein. Bei der wechselnden Durchbiegung des Stabes scheuert die Passfeder an den Wandungen der Keilnut. An den Enden der Keilnut sind diese Scheuerbewegungen besonders gross; am stärksten sind sie an dem nach der Stabmitte zu liegenden Keilnutende. Bei fast allen Probestäben sind deshalb nach dem Ausbau aus der Prüfmaschine und nach dem Abnehmen der Schwungmassen und Passfedern an den Aussenkanten der Auflageflächen der Schwungmassen rostbraune Flecken zu erkennen. Ebenso sind die Wandungen der Keilnutenrundungen bis einige Millimeter über den Uebergang in die geradlinig verlaufende Nutflanke hinaus mit einem rostbraunen Belag vollkommen bedeckt (Abb. 9).

2. *Ausgang des Dauerbruches und Bruchfläche.* Der Dauerbruch beginnt in der Regel an der Stelle, wo die Sitzfläche der Passfeder oder der Schwungmassen besonders stark gedrückt wird. Die Wandungen der Keilnut in den Rundungen bis in die geradlinig verlaufende Nutflanke und die Staboberfläche unter den Schwungmassen sind der Gefahr des Bruchansatzes ausgesetzt. Die meisten Probestäbe brechen am Uebergang der Rundung an dem nach der Stabmitte zu liegenden Nutende. Die Nuten haben infolge der Verringerung des Widerstandsmomentes des Querschnittes einen Spannungsanstieg zur Folge. Scheuern die Schwungmassen stark, so ist der Teil der Staboberfläche besonders gefährdet, der unter den nach der Mitte zu liegenden Aussenkanten der Schwungmassen liegt.

⁵⁾ A. Thum und F. Wunderlich, „Dauerbiegefestigkeit von Konstruktionsteilen“. VDI-Verlag, 1934.

Abb. 10 zeigt die Keilnut eines Probestabes, der dadurch, dass die Bruchansätze nicht früh genug erkannt wurden, stark über seine Wechselfestigkeit beansprucht worden ist. Er zeigt infolgedessen viele Anrisse und lässt die Gefährlichkeit jeder Druckstelle deutlich erkennen. In Abb. 11 sind Bruchausgangsstellen seitlich der Keilnut als Folge von Scheuerstellen erkennbar. Einen weiteren Dauerbruchansatz findet man aber auch am Uebergang der Keilnut in die Rundung.

3. *Die Biegewechselfestigkeit und der Erfolg des Oberflächendrucks.* Die Ergebnisse der Schwingungsfestigkeit der zusammengesetzten Passfederanordnung und die Steigerung der Haltbarkeit durch das Drücken sind gleichfalls mit in die Zahlentafel 3 aufgenommen. Beim Vergleich der Ergebnisse an den Probestäben für die Biegeschwingungen mit denen an der Passfederanordnung ist zu beachten, dass sich das Widerstandsmoment beim Umlauf des Stabes ändert, und der Querschnitt einmal drei, das andre Mal jedoch nur zwei Nuten enthält.

Einige Stäbe der beiden Werkstoffsorten St. 34.11 und St. 50.11, an denen ein einwandfreier Erfolg des

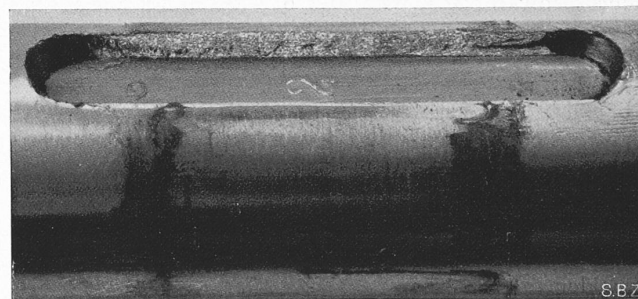


Abb. 9. Keilnut unmittelbar nach dem Ausbau aus der Prüfmaschine.

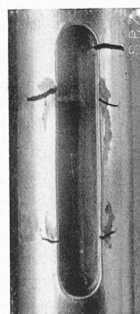


Abb. 10. Stark zerstörte Keilnut des Stabes 638 nach dem statischen Aufweiten.

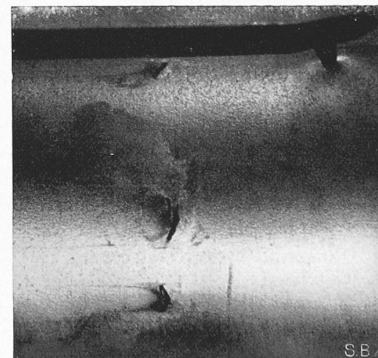


Abb. 11. Bruchausgangsstellen seitlich der Keilnut als Folge des Scheuerns der Schwungmassen. (Stab 632; statisch aufgeweitet.)

Oberflächendrücken bei der Anordnung der Nuten 120-0-70 erreicht worden ist, sind in Abb. 12 und 13 zusammengestellt. Der Einfluss des Drückens auf die Erhöhung der Dauerhaltbarkeit beträgt bei ihnen durchschnittlich mehr als 20 %.

G. ZUSAMMENGESETZTE VERBINDUNGEN MIT NEUER KEILFORM.

Bei den Versuchen mit den zusammengesetzten Keilverbindungen ging der Dauerbruch entweder von der Scheuerstelle der Schwungmasse am Probestab, oder von der Keilrundung aus. Im zweiten Fall kann man die Dauerhaltbarkeit durch eine besondere Formgebung des Keils steigern.

Die Schwächung der Welle im vorderen Ende des Keils (also in der Keilrundung) ist darauf zurückzuführen, dass dort das Trägheitsmoment der Welle plötzlich in das viel grössere Trägheitsmoment der Nabe übergeht. An dieser Stelle hört deshalb die Verdrehung der Welle auf, die dem Verdrehungsmoment zugeordnet ist, da die Nabe ein so grosses Trägheitsmoment hat, dass sie als starr gegenüber der Welle angesehen werden kann. Man kann diese ausgezeichnete Stelle dadurch entlasten, dass man statt des starren Keils (Abb. 14 a) einen solchen mit nachgiebigen Flanken (Abb. 14 b und c) verwendet. Die Zungen des Keils biegen sich etwas durch, sodass die Kraftübertragung von der Welle auf die Nabe nicht plötzlich am vorderen Ende, sondern allmählich vorgenommen wird.

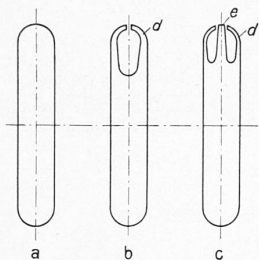


Abb. 14. a alter Keil; b neuer Keil für Passfederanordnung; c neuer Keil mit Anzug.

Der Keil nach Abb. 14 b ist dann ungeeignet, wenn er nicht als Passfeder, wie bei den vorstehend beschriebenen Versuchen, sondern als eigentlicher Keil mit Anzug verwendet wird, weil sich die Keilflanken d beim Festkeilen verbiegen würden. Für einen Keil mit Anzug wählt man deshalb zweckmässig die in Abb. 14 c wiedergegebene Form, bei der ein Mittelsteg e die Kraft in Achsrichtung aufnehmen kann, die beim Festkeilen von der Welle auf die Nabe übertragen wird.

Mit den Keilen nach Abb. 14 a und b sind Vergleichsversuche unter sonst gleichen Bedingungen angestellt worden, die sich auf eine Passfederanordnung beziehen. Die Steigerung der Haltbarkeit, die durch Verwendung des neuen Keils erzielt werden konnte, betrug etwa 6 %. Wenn das auch kein sehr grosser Betrag ist, so ist er doch durch Vergleichsversuche am gleichen Probestab einwandfrei festgestellt worden. Es ist ferner zu beachten, dass die Mehrkosten, die durch Verwendung des Keils Abb. 14 b gegenüber dem nach 14 a entstehen, nur gering sind, sodass sich die mit dieser Veränderung verbundene Steigerung der Dauerhaltbarkeit vielfach bezahlt macht.

H. ZUSAMMENFASSUNG.

Die Untersuchungen über den Einfluss von Keilnuten auf die Dreh- und Biegefestigkeit und die Erhöhung der Dauerhaltbarkeit durch das Oberflächendrücken wurden an sieben verschiedenen Werkstoffen vorgenommen. Bei den Drehfestigkeitsversuchen erfolgt der Dauerbruch mit wenigen Ausnahmen von der oberen Kante der Keilnut am Beginn der Rundung und verläuft unter einem Winkel von 45° zur Stabaxe gemäss den grössten Normalspannungen. Es ist vorteilhaft, die Keilnut mit dem Presslufthammer zu drücken. Für jeden Werkstoff kann eine günstigste Schlagarbeit ermittelt werden. Es ist bei allen untersuchten Werkstoffen eine Steigerung der Dauerhaltbarkeit durch das Oberflächendrücken erzielt worden. Die Erhöhung der Wechselfestigkeit zeigt sich besonders deutlich in der Erhöhung der bis zum Bruch ertragenen Lastwechsel. Gedrückte Stäbe, die in der Biegeschwings-

maschine mit der Wechselfestigkeit der ungedrückten Stäbe untersucht wurden, überdauerten eine über zehnmal so grosse Lastwechselzahl, ohne Dauerbruchsätze zu zeigen.

Es wurde ferner die Grenze der Belastbarkeit einer Keilverbindung (Passfederanordnung) im Dauerbetrieb festgestellt. Der Bruchausgang erfolgt meistens in den Scheuerstellen der Passfederenden in den Nutenflanken oder in den Scheuerstellen der Schwungmassenaussenkanten am oberen Nutrande oder auf der Staboberfläche seitlich der Nuten. Schliesslich wird eine neue Keilform angegeben, durch die die Bruchgefahr für die Welle vermindert wird.

Bestimmung der Rauheitszahl für Druckleitungen.

Jeder Hydrauliker weiss, wie schwer es ist, den Gefällsverlust einer Druckleitung im Voraus einwandfrei zu bestimmen. Formeln gibt es viele, zuverlässige Messungen aber weniger. Die im Auftrage des „Consiglio nazionale delle ricerche“ (Commissione grandi opere idrauliche) und der „Unione nazionale fascista industrie elettriche“ (Sottocommissione grandi condotte) von Marchetti und Testa durchgeführten systematischen Versuchsreihen sind deswegen sehr zu begrüssen.¹⁾

Es handelt sich um eine provisorische Bearbeitung von Messungen der Gefällsverluste in 23 verschiedenen Rohrleitungen, bzw. verschiedenen Leitungsstrecken. Der Gefällsverlust wurde mittels Differentialmanometer auf homogenen, krümmungslosen Strecken von 50 m bis 300 m Länge und 0,50 m bis 2,00 m Durchmesser gemessen, und zwar für verschiedene Durchflussmengen, sodass die Endergebnisse sowohl für variablen Durchmesser als für variable Geschwindigkeit aufgetragen werden konnten.

Untersucht wurden die Formeln von Chézy, Bazin, Fantoli, Kutter, Ganguillet und Kutter, Flamant, Forchheimer, Gauckler-Manning Strickler, Lindquist und Williams und Hazen. Marchetti weist darauf hin, dass die allgemeine Formel für den Rauheitsverlust sich schreiben lässt:

$$J = K \frac{v^2}{D} \varphi(N, S) \dots (1) \quad \text{oder} \quad J = k q^\alpha D^\beta \dots (2)$$

In diesen Formeln bedeuten: J das Gefälle; K und k Konstante; v die mittlere Geschwindigkeit und q der Durchfluss; D der innere, bzw. kleinste innere Durchmesser im Falle genieteter Rohre; $\varphi(N, S)$ eine Funktion der Reynolds'schen Zahl N und der Rauigkeit S; α und β Exponenten.

Bekanntlich beeinflusst die Reynolds'sche Zahl den Rauigkeitsverlust nur bei kleiner Geschwindigkeit v (Hopf, Fromm und Nikuradse). Marchetti's Untersuchungen ergeben vorläufig folgende Resultate:

Für raue Rohre kann $\alpha = 2$ gesetzt werden, sobald die Geschwindigkeit v 1 bis 1,5 m/sec überschreitet und die Rauigkeit genügend gross ist. Er betrachtet speziell die Formel von Forchheimer:

$$v = \lambda \left(\frac{D}{4}\right)^{0,7} J^{0,5} \dots (3) \quad \text{bzw.} \quad J = \frac{11,29}{\lambda^2} q^2 D^{-5,4} \dots (3a)$$

und die Formel von Gauckler-Manning-Strickler:

$$v = k_2 \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} J^{1/2} \dots (4) \quad \text{bzw.} \quad J = \frac{10,293}{k_2^2} q^2 D^{-16/3} \dots (4a)$$

(wobei $k_2 = \lambda \left(\frac{D}{4}\right)^{0,0334} \cong \lambda$), für die er folgende Grenzwerte ge-

Beschreibung der Leitung	Koeffizienten		
	γ (Bazin) m (Kutter)	n (Ganguillet und Kutter)	k_2 (Strickler)
a) Längsnaht geschweisst, Quernaht einfach genietet, ohne Anstrich, jedoch rostfrei, für $v > 1,50$ m/sec, $D = 0,55 \div 1,40$ m, $d = 12 \div 20$ mm.	$\gamma = 0,17$ $m = 0,27$	0,0126	81,0
b) Längsnaht geschweisst, Quernaht doppelt genietet, ohne Anstrich, jedoch rostfrei, für $v > 1,00$ m/sec, $D = 1,00 \div 1,18$ m, $d = 15 \div 30$ mm.	$\gamma = 0,20$ $m = 0,305$	0,0130	78,5

¹⁾ Dr. Ing. Mario Marchetti und Dr. Ing. Angelo Testa: „Determinazioni sperimentali relative al moto uniforme nelle condotte forzate per forza motrice“. „Energia Elettrica“ Mai, Juli, August 1934 (Società editrice riviste industrie elettriche, Milano).