

Folleto sobre la resisten
cia relativa de los aceros.

FRIED. KRUPP
AKTIENGESELLSCHAFT
ESSEN



Über Dauerbrüche
an Konstruktionsstählen und
die Kruppsche Dauerschlag-
probe



Über Dauerbrüche an Konstruktionsstählen und die Kruppsche Dauerschlagprobe.

Auszug aus einer in den Kruppschen Monatsheften vom Juni 1920 erschienenen Arbeit
nebst einigen Ergänzungen über das gleichlautende Thema.

Von Dr. phil. Fr. Rittershausen und Dipl.-Ing. Fr. P. Fischer.

In Bauwerken treten oft Brüche an Bauteilen auf, welche häufig sich wiederholenden Beanspruchungen besonders bei wechselnder Angriffsrichtung unterworfen sind. Die Bauteile brechen, nachdem sie gewöhnlich schon lange, oft jahrelang, ihren Dienst in der Dampf-, Öl- oder Gasmaschine, dem Eisenbahnwagen, Kraftwagen, Luftfahrzeug oder einem andern Bauwerk erfüllt haben, ohne daß auch nur einmalig vorgekommene Überbeanspruchungen nachzuweisen sind oder angenommen werden können. Die Brüche erfolgen ohne bemerkbare Formänderungen, ohne Verlängerung und ohne Einschnürung an der Bruchstelle, wodurch vielfach beim ersten Anblick, aber meist mit Unrecht, der Eindruck ungenügender Zähigkeit des verwendeten Stahles hervorgerufen wird. Die Brüche künden sich also nicht durch vorausgehende Formänderungen warnend an, sie erfolgen vielmehr meist plötzlich und unerwartet.

Als Beispiele derartiger Beanspruchungen mögen genannt sein: Die sich immer wiederholenden schlagartigen Beanspruchungen von Eisenbahnachsen durch Schienenstöße, von Kraftwagenwellen durch Unebenheiten der Straßenoberfläche, ferner der Richtungswechsel im Kräftespiel von Kurbelwellen, dann die in Teilen schnelllaufender Maschinen durch

hin- und hergehende Massen oder durch nicht völlig ausgewuchtete rotierende Körper auftretenden Schwingungen. Meist treten diese Beanspruchungen zu den schon gleichzeitig vorhandenen Zug- (bzw. Druck-), Bieigungs- und Drehungsbeanspruchungen hinzu, indem sie ~ gewissermaßen als Oberschwingungen die statisch errechneten Beanspruchungen überlagernd ~ die letzten Ursachen zu den Spitzenbeanspruchungen bilden. Ihr Einfluß läßt sich rechnerisch meist nicht einmal annähernd ermitteln, er kann daher seiner Größe nach nur schätzungsweise berücksichtigt werden.

Eine Erklärung für das Auftreten von Dauerbrüchen glaubte man früher in der Annahme von Materialermüdungen finden zu können; so kommt es, daß Dauerbrüche auch heute noch vielfach Ermüdungsbrüche genannt werden. Durch zahlreiche Untersuchungen ist indessen die Unhaltbarkeit der Annahme erwiesen, daß durch Dauerbeanspruchungen Veränderungen im Gefüge der Stähle und damit Veränderungen ihrer Festigkeit und Zähigkeit verursacht werden.

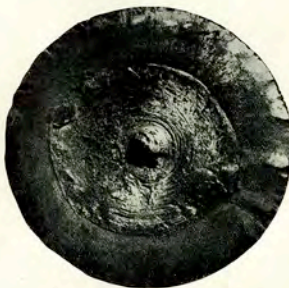
In Wirklichkeit sind die Dauerbrüche immer eine Folge unvollkommener Elastizität, wobei ähnliche Verhältnisse vorliegen mögen, wie sie f. Z. von Bau-

finger hinsichtlich der Proportionalitätsgrenze beobachtet worden sind.¹⁾ Aber auch abgesehen davon liegt die tatsächliche Elastizitätsgrenze - sofern es überhaupt bis zu gewissen Belastungsstufen bei Stahl vollkommene Elastizität gibt - sehr viel nie-

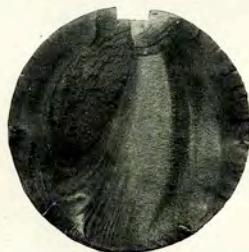
driger als diejenige Belastungsstufe, bei der in der Praxis, je nach der vereinbarten zulässigen Größe der ersten bleibenden Dehnungen, die Elastizitätsgrenze als erreicht angesehen wird. So können z. B. in den äußersten, am meisten gespannten Fasern



Abbild. 1. Bruch einer Achse eines Straßenbahn-Motorwagens.



Abbild. 2. Bruch einer Königswelle.



Abbild. 3. Bruch einer Lokomotiv-Treibkurbel.

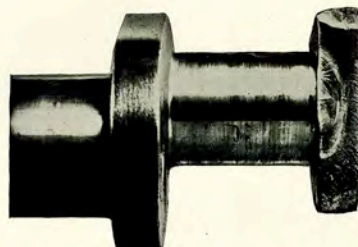
¹⁾ Baufinger fand, daß schon eine verhältnismäßig geringe Überhöhung der positiven Proportionalitätsgrenze (bei Zugbeanspruchung) die negative Proportionalitätsgrenze (bei Druckbeanspruchung) bis auf Null herabwirft. Wechselnde Beanspruchung geht aber solchen Dauerbrüchen stets voraus.

eines auf Biegung beanspruchten Stabes kleine bleibende Formänderungen auftreten, die mit den Mitteln der jetzigen Feinmessung gar nicht festgestellt werden können. Bei einer kleinen Zahl von Belastungen sind diese Formänderungen bedeutungslos;

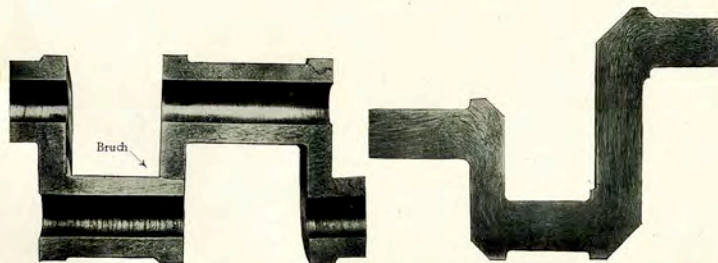
wechseln aber die Belastungen sehr häufig in ihrer Größe oder gar in ihrem Richtungssinn, z. B. zwischen Zug und Druck, so ergeben sich zunächst Gleitlinien und hieraus schließlich feine, kaum wahrnehmbare Rißbildungen, die sich in weiterer Folge von Dauer-

denen Bruchflächen gegenseitig glatt, bis schließlich der bis dahin noch zusammenhängende Teil des angerissenen Querschnitts auf einmal durchbricht.

Aus dieser Art der Bruchentstehung ergeben sich ganz charakteristische Bruchbilder bei Dauerbrüchen,



Abbild. 4. Kurbelwellenbruch eines schnelllaufenden Verbrennungsmotors.



Abbild. 5. Faserverlauf der gebrochenen Kurbelwelle. (Abbild. 4).

Abbild. 6. Faserverlauf einer vorgebogenen und im Gelenk fertiggeschlagenen Kurbelwelle.

beanspruchungen dann schnell vertiefen. Infolge der entstandenen Anrisse erhält ein solcher Stab eine gewisse, wenn auch nur geringe Beweglichkeit. Hierdurch drücken oder reiben sich die bereits vorhan-

so daß kaum jemals Zweifel über die Art dieser Bruchvorkommen entstehen können. Abbild. 1 zeigt einen solchen Bruch, der an einer Straßenbahn-Motorwagenachse erfolgte. Es ist unschwer zu

erkennen, daß sich zuerst kleine Anbrüche am Umfang der Achse gebildet haben, die sich allmählich nach innen fortsetzten, bis die Achse ringsum bis zu einer gewissen Tiefe eingerissen war. Der Bruch des bis dahin noch zusammenhängenden Kerns trat dann plötzlich ein. Die Anrißstellen und ihre Fortsetzung nach innen sind an den glatt geriebenen Flächen der äußeren Ringzone, die Stelle des letzten Zusammenhanges vor dem Endbruch an dem kristallinen Bruchaussehen des inneren Kerns erkennbar. Da

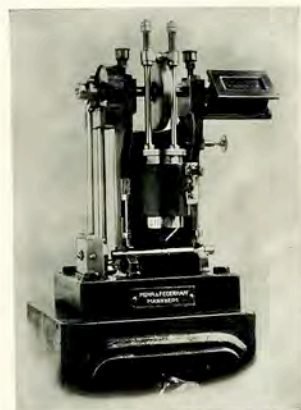


Abbildung 7. Dauerchlagwerk Krupp'scher Konstruktions.

die Anbrüche sich in ihrem späteren Verlauf vorzugsweise von zwei gegenüberliegenden Stellen des Umfangs aus weiter nach innen fortsetzten, so war im Augenblick des völligen Bruches der Achse nur noch ein Zusammenhang in dem schmalen elliptischen Kern vorhanden.

Im Gegensatz dazu zeigt Abbild. 2 den Bruch der etwa 100 mm starken Königsweile einer Tonknetmühle. Der Anriß setzte sich hier gleichmäßig vom Umfang der Welle nach innen fort, der Endbruch hat deshalb ebenfalls Kreisform. Die Welle war

überwiegend auf Drehung beansprucht, was zur Folge hatte, daß der Endbruch so stark zerrieben wurde (vgl. die Abbild.). Der Bruch selbst war in einer Hohlkehle unmittelbar vor einem Bund erfolgt, der den Reaktionsdruck der Welle aufzunehmen hatte.

Die weitaus meisten Dauerbrüche gehen von Kerben oder kerbartig wirkenden scharfen Kanten, einprägenden Winkeln oder plötzlichen Querschnittsübergängen aus. Um die Gefahr von Kerben an Teilen, die Dauerbeanspruchungen unterworfen

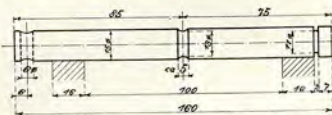


Abbildung 8. Dauerchlagprobe mit Rundkerb (mm-Maße).



Abbildung 9. Dauerchlagprobe mit Scharfkerb (mm-Maße).

find, genügend zu würdigen, muß man sich die die Kerbwirkung kennzeichnende Beanspruchung – ein scharfes, örtliches Anschwellen der Spannung im Kerbgrunde infolge behinderter Ausbildung der Dehnung – vergegenwärtigen. Die bisher gezeigten Brüche erfolgten an solchen scharfwirkenden Querschnittsübergängen, zu welchen auch die Verdickungen von Achsen und Wellen durch die Naben aufgesetzter Räder gezählt werden können. Ein solcher Fall lag z. B. bei der Straßenbahnwagenachse der Abbild. 1 vor.

Den Bruch einer Lokomotiv-Treibkurbel, der seinen Ausgang von dem scharfen Grunde einer Keilnute nahm, zeigt Abbild. 3. Bei der Kurbelwelle eines schnelllaufenden Verbrennungsmotors (Abbild. 4), ging der Anbruch von dem einprägenden Winkel des Übergangs von einem Zapfen in den Kurbelarm aus. Von der Anrißstelle erweiterte sich der Bruch konzentrisch, wie die Ringlinien um die

Anbruchstelle herum erkennen lassen. Begünstigt wurde in diesem Falle der erste feine Anriß durch den ungünstigen Faserverlauf (siehe Abbild. 5) der von Hand geschmiedeten Welle, in der beim Herausarbeiten der Kurbelhübe die Fasern durchschnitten wurden. Der Faserverlauf einer vorgebogenen und im Gelenk fertiggeschlagenen Welle (siehe Abbild. 6) ist in dieser Beziehung viel günstiger.

Unterforschungen, die den Zweck hatten, mittels besonderer Proben festzustellen, wie hoch für einen

Winkler, Martens u. a. nachgewiesen wurde, durch kerbartig wirkende Formen ganz bedeutend vermindert. Einen ähnlichen Einfluß können auch Fehlstellen im Material je nach ihrer Lage haben. Die Methoden, die erfunden wurden, um den Widerstand eines Baustoffes gegenüber Dauerbeanspruchungen zu ermitteln, erfassen daher immer nur einige wenige von den vielen möglichen Verfallsbedingungen, die liefern dem Konstrukteur deshalb nur gewisse qualitative Werte, die aber – wie gezeigt

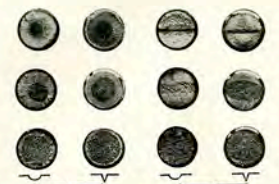


Abbildung 10. Brüche von Dauerchlagproben.

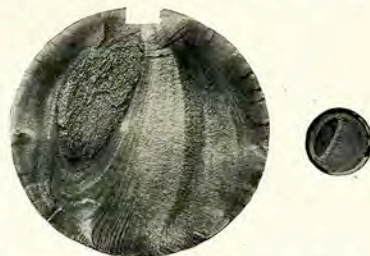


Abbildung 11. Bruch einer Lokomotivtreibkurbel (vgl. Abbild. 3, Seite 2); daneben Dauerchlagprobe.

Baustoff die Beanspruchung sein darf, welche dauernd zwischen Null und einem Höchstwert oder zwischen einem negativen und einem positiven Höchstwert wechselt, ohne daß ein Bruch eintritt, sind schon alt. Außer Wöhler, dessen klassische Versuche als bahnbrechend auf dem Gebiete der Dauerbeanspruchungen bezeichnet werden müssen, haben sich eine große Zahl von Forschern mit Arbeiten über diese Frage hervor getan. Die Ermittlung dieser aus Arbeitsfestigkeit genannten Spannung als für den Konstrukteur quantitativ allgemein verwendbare Unterlage ist aber praktisch unmöglich¹⁾. Ihre Größe ist verschieden je nach der Art der Beanspruchung (Zug, Druck, Biegung usw.), sie ist abhängig von der Größe der Höchstspannung und der Amplitude der beiden Grenzspannungen; sie ist ferner in hohem Maße durch die Abmessungen und Formen der Probestäbe beeinflusst. So wird die Größe der zulässigen Spannung, wie schon von

¹⁾ Vgl. Martens-Heyn, Materialienkunde für den Maschinenbau II A, 1912, Abt. Nummer 288.

werden wird – für die Beurteilung der Materialfrage von hoher Bedeutung sein können.

Besonders in den letzten 2 Jahrzehnten wurde eine große Anzahl von Maschinen gebaut, auf welchen Proben von Stahl und anderen Metallen sich häufig wiederholenden und ihre Richtung ändernden Beanspruchungen unterworfen werden konnten. Zahlreiche Ergebnisse von Dauerversuchen sind seitdem veröffentlicht worden. Bei der Firma Krupp wurden gleichfalls umfangreiche Versuche auf einer in ihrer physikalischen Versuchsanstalt eigens hierzu entworfenen und gebauten Maschine (Abbild. 7) ausgeführt²⁾. Auf dieser Maschine werden zylindrische Proben, die an ihren Enden gelagert und in der Mitte mit einer Kerbe versehen sind, von einem auf die Kerbe auftreffenden Bär auf Biegung beansprucht. Der Bär hat ein Gewicht von 4,185 kg,

²⁾ Die fabrikmäßige Herstellung dieses Krupp'schen Dauerchlagwerks ist im Jahre 1914 von der Mannheimer Maschinenfabrik Mohr & Federhaff in Mannheim übernommen worden, daher das Firmenbild von Mohr & Federhaff auf der Abbildung.

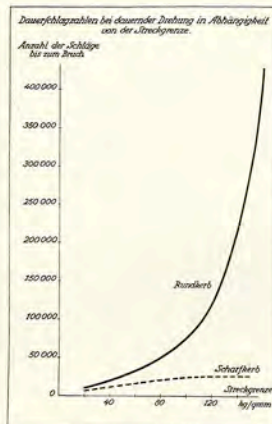


Abbildung 12. Dauerflagzahlen bei dauernder Drehung in Abhängigkeit von der Streckgrenze.

die Fallhöhe ist normal 30 mm, die Anzahl der Schläge in der Minute beträgt etwa 85. Nach jedem Schläge wird die Probe durch ein Schaltwerk um einen bestimmten Betrag gedreht, und zwar um 180° oder um $1/25$ einer Gesamtdrehung, je nachdem das eine oder das andere der beiden auswechselbaren Schaltwerke eingebaut ist. Die Abbildung zeigt das Dauerflagwerk mit eingebautem Schaltwerk für Drehung um $1/25$ einer Umdrehung. Der Entwurf dieses Krupphaus Dauerflagwerks entsprang zunächst dem Bedürfnis, insbesondere die schon erwähnten porösen Beanspruchungen, wie sie z. B. in Eisenbahnnächlen infolge der Schienenstöße oder in Autowellen infolge von Straßenunebenheiten sowie in Kurbelwellen auftreten, durch Versuchsproben in Verbindung mit Kerben nachzuahmen und dadurch ihre Wirkung näher kennen zu lernen^{*)}. Die Drehung des Probefabes um 180° soll die Be-

^{*)} Vgl. auch »Krupphaus Monatshefte« 1920, Seite 51.

anspruchung von Kurbelwellen, die um je $1/25$ einer Umdrehung – auch dauernde Drehung genannt – diejenige der vorerwähnten geraden Achsen in den Verlauf überlegen. An Kerbformen werden vorzugsweise zwei Arten verwendet, die eine mit einem gut ausgerundeten Rundkerb von etwa $3 1/2$ mm Halbmesser^{*)}, die andere ganz scharf mit einem Flankenwinkel von 55° (wie beim Whitworthgewinde). Beide Kerben werden so gut als möglich poliert. Ihre Anordnung geht aus den Abbild. 8 und 9 hervor, welche die beiden geläufigsten – ursprünglich Krupphaus – Probefabformen zeigen. Die Bohrung am linken Ende ist für den Mitnehmer, die Rille am rechten Ende dient zur seitlichen Führung des Probefabes.

Eine Anzahl der bei diesen Erprobungen auftretenden Bruchbilder ist aus Abbild. 10 ersichtlich. Die beiden linken Vertikalreihen zeigen Brüche von Proben, die unter dauernder Drehung, die beiden rechten solche, die bei Drehung um 180° gelagert sind. Bei beiden Reihenpaaren zeigt jedesmal die linke Reihe die Brucherscheinungen bei Rundkerb, die rechte die von Scharfkerbproben. Von den Horizontalreihen enthält die unterste die Bruchbilder nickelfreier Stähle, die mittlere ebenfalls nickelfreier aber zäherer Stähle und die oberste ausschließlich von Chromnickelstählen noch höherer Zähigkeit. Die Bruchbilder haben zum Teil eine auffallende Ähnlichkeit mit den bereits gezeigten Bildern der im Betriebe gebrochenen Achsen und Wellen. Weshalb

^{*)} Der Halbmesser ist nicht genau $3 1/2$ mm, weil der 7 mm Rundstahl, mittels dessen der Korb eingedreht wird, häufig angeflanscht ist.

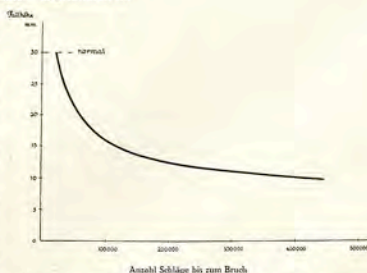


Abbildung 13. Einfluß verringerter Fallhöhe auf die Dauerflagzahlen (Rundkerbproben, dauernde Drehung).

merkwürdige Übereinstimmung in den Brucherscheinungen auftreten kann, beweist Abbild. 11. Das größere Bild links zeigt nochmals den Bruch der Lokomotiv-Treibkurbel (vgl. Abbild. 3), das kleinere rechts den einer Dauerflagprobe mit Scharfkerb bei 180° Drehung.

Aus rund 3500 Einzelversuchen, die auf dem Dauerflagwerk mit gekerbten Stäben der beiden beschriebenen Formen zur Unterfuchung von Konstruktionsfehlern der verschiedensten Festigkeits- und Zähigkeitsgrade vom weichen Flußeisen bis zum Sonderstahl höchster Bruchfestigkeit und Elastizität ausgeführt wurden, lassen sich folgende wichtige Ergebnisse herleiten:

Bei einem und demselben Stahl von ganz denselben Festigkeitseigenschaften ergeben Rundkerbproben bei dauernder Drehung etwa doppelt so hohe Schlagzahlen als bei Drehung um 180° . Bei Scharfkerbproben, die ganz erheblich geringere Schlagzahlen ergeben, läßt sich zwischen dauernder Drehung und Drehung um 180° praktisch kein Unterschied feststellen. Die Schlagzahlen wachsen bei Rundkerb mit steigender Streckgrenze, und zwar, wie die ausgeogene Kurve in Schaubild Abbild. 12 für dauernde Drehung zeigt, zuerst langsam und später sehr schnell. Aus ihrem Verlauf geht ferner hervor, daß bei einer bestimmten Höhe der Streckgrenze die Zahl der Schläge unendlich groß sein wird. Die gestrichelte Scharfkerbkurve zeigt dagegen, daß bei einer gewissen Höhe der Streckgrenze ein Maximum von Schlagzahlen erreicht wird. Darüber hinaus scheinen – soweit aus den Versuchen bis jetzt hervorgeht – die Schlagzahlen vielleicht sogar wieder abzunehmen!

Beide Kurven sollen in erster Linie Charakterkurven sein. Ihre Darstellung im vorliegenden Schaubild ist so zu verstehen, daß die Rundkerbkurve als Mittellinie durch die z. T. weit auseinander liegenden Einzelwerte zu betrachten ist; die Scharfkerbkurve gibt dagegen – gewissermaßen als Hüllkurve – den Verlauf an, wie ihn im Vergleich zu Rundkerb die höchsten bisher bei Konstruktionsfehlern erreichten Zahlen aufweisen; ihre Mittelwerte liegen also noch tiefer.

Den Einfluß verringerter Fallhöhe auf die Dauerflagzahlen bei gleicher Streckgrenze zeigt die folgende Kurve (Abbild. 13). Aus ihr ergibt sich, daß mit abnehmender Fallhöhe die Schlagzahlen sehr schnell wachsen. Vergleichsversuche mit weiteren Stabreihen, von denen die einen höhere, die anderen niedrigere Streckgrenzen hatten, zeigten in

ihrem Verlauf einen vollständig gleichen Charakter; dabei erhielt man aber auch bei den Stäben mit niedrigerer Streckgrenze verhältnismäßig bald hohe Zahlen. Aus diesem Grunde werden die Dauerflagproben, wenn nicht besondere Gründe vorliegen, stets mit der normalen Fallhöhe von 30 mm geschlagen, da die einzelnen Versuche sonst zu viel Zeit beanspruchen würden.

Das Aussehen der auf Seite 5 gezeigten Bruchbilder von Dauerflagproben ließ die Annahme zu, daß die Zähigkeit der Stähle nicht unerheblichen Einfluß auf die Höhe der Schlagzahlen haben müßte. Aus den Versuchsergebnissen war aber ein praktisch ins Gewicht fallender Einfluß der Zähigkeit nicht zu erkennen. Die Zähigkeit scheint erst ganz am Ende des allmählich eindringenden und immer schneller verlaufenden Bruchprozesses wirksam zu werden, ohne die Schlagzahlen wesentlich zu erhöhen.

Ein Stahl hält also Dauerbeanspruchungen der beschriebenen Art, sofern keine scharfen Eindrungen, sondern gut ausgerundete Hohlkehlen vorhanden sind, um so länger aus, je höher seine Streckgrenze, in der sich die Höhe seiner Elastizitätsgrenze widerspiegelt, liegt. Scharfe Eindrungen können aber das Bild derart verkehren, daß Schlagzahlen über eine gewisse Höhe gar nicht zu erhalten sind.

Die bemerkenswerten Schlüsse, die in bezug auf die Kerbgefahr bei Dauerbeanspruchungen aus den Ergebnissen der Dauerflagproben mit den beiden bisher angewandten Kerbformen gezogen werden konnten, ließen es bei der Mannigfaltigkeit der in der Praxis vorkommenden Kerben und kerbartig wirkenden Formen wertvoll erscheinen, in Anlehnung an Formen der Praxis die Einflüsse weiterer Kerbformen auf die Schlagzahlen von solchen Proben kennen zu lernen^{*)}. Es wurden dazu Versuche mit Proben aus fünf verschiedenen Stahlsorten, einem Kohlenstoffstahl, einem Nickelstahl, einem Manganstahl, einem Silizium-Manganstahl und einem Chromnickelstahl ausgeführt. Die Ergebnisse der Versuchsreihen sind in einer Übersicht auf Seite 8 zusammengefaßt.

In der Übersicht sind oben die Festigkeitswerte der Versuchsstähle und zur Kennzeichnung ihrer

^{*)} Über die Wirkung verschiedener tiefer Kerben und die Gefährlichkeit eingeklagener Ziffern vgl. E. Preuß: Kerbwirkung bei Dauerflagbeanspruchung, »Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure« 1914, S. 701/03.

Überficht:

Dauerfchlagproben mit verſchiedenen Kerbformen.

Die Proben der Reihen 1-5 find bei dauernder Drehung gefchlagen, die der Reihen 6 und 7 bei 180° Drehung; die Schlagrichtung ift bei den beiden letzteren in dem Kerbförmchema durch Pfeile angegeben. Sämtliche Schlagzahlen find Mittelwerte aus mindestens drei Proben.

Stahlorte		Kohlenstoff- stahl	Nickelfahl	Mangan- stahl	Silizium- Manganstahl	Chromnickel- stahl			
Zerreißproben 12 mm Φ :									
Streckgrenze	kg/qmm	ca. 38	ca. 38	46	64	76			
Feftigkeit	"	58,5	50,1	64,3	84,4	85,6			
Dehnung auf 5 d.	%	28,6	31,8	23,5	22,8	22,7			
Einfchnürung	"	65	73	67	52	68			
Kerbfchlagproben 30×30×160 mm ¹⁾ :									
mit Rundkerb	mkg/qcm	11,4	28,7	14,7	6,0	19,8			
mit Scharfkerb	"	3,4	22,7	6,4	ca. 3	ca. 13			
Dauerfchlagproben		Schlag- zahl bis z. Bruch	Ver- hält- nis	Schlag- zahl bis z. Bruch	Ver- hält- nis	Schlag- zahl bis z. Bruch	Ver- hält- nis	Schlag- zahl bis z. Bruch	Ver- hält- nis
Kerbform	Ausführung der Kerben								
1	 Normalrundkerb	15807	100	15630	100	23168	100	30075	100
2	wie 1	8702	55	12085	77	15736	68	18750	62
Dauernde Drehung	3  So ſcharfſeckig als möglich	8892	56	7240	46	12009	52	15350	51
	4  So ſcharf als möglich	4805	30	4240	27	6992	30	10098	33
	5  Normalrundkerb, 2 mm Querbohrung	5270	33	5917	38	8442	36	10591	35
	6  desgl.	6117	39	5023	32	8937	39	9975	33
Drehung um 180°	7  desgl.	2175	14	1976	13	3423	15	4216	14

¹⁾ Bei beiden 30×30×160 mm-Kerbfchlagproben reicht die Kerbtiefe bis in die Mitte des Querſchnitts. In der Rundkerbprobe ift der Kerb an feinem Grunde nach einem Halbmefſer von 2 mm ausgerundet, in der Scharfkerbprobe endigt er ganz ſcharf und feine Flanken bilden einen Winkel von 45° (vgl. hierzu die Abbild. 26 und 27 auf Seite 48 der März-April-Nummer der »Kruppſchen Monatshefte«).

Zähigkeit auch die Schlagwiderſtände, ermittelt an Kerbfchlagproben mit Rund- und Scharfkerb, angegeben; darunter find die Schlagzahlen, die bei den verſchiedenen Kerbformen erhalten wurden, als Mittelwerte aus mindestens je 3 Einzelproben zuſammengeſtellt. Die Kerbform der Dauerfchlagproben der erſten Reihe ift zunächſt wieder die Kruppſche Normal-Rundkerbform mit etwa 3 1/2 mm Halbmefſer. Die Ergebniſſe der Proben mit dieſer Kerbform ſollten das Wertmaß bilden. In der zweiten Reihe folgen Proben mit derſelben Kerbform, in die Kerben wurden aber abſichtlich feine Riefen, wie ſie z. B. in unfauber bearbeiteten Hohlkehlen vorkommen, mit einer Reißnadel eingeriſt. Die dritte Reihe enthält Proben mit einer ſcharf eingehnittenen Rechteckform, die vierte mit der ſchon bekannten Scharfkerbform mit einem Flanken-

deſhalb derartigen Formen nicht nur auf dem Reißbrett, ſondern auch in der Bearbeitungswerkſtatt befondere Sorgfalt und Vorſicht zugewandt werden muß. Die Wirkung der feinen, mit der Reißnadel eingeriſten, harmlos erſcheinenden Riefen in den Rundkerben der Proben der zweiten Reihe, die in einer Abnahme der Schlagzahlen von 23-45% zum Ausdruck kommt, war in dieſem Maße kaum vorzuziehen. Ueberrafchend niedrig find auch die Schlagzahlen der Proben der letzten drei Reihen mit Querbohrungen durch die Kerben. Am ſtärkſten zeigt ſich der Einfluß der Bohrungen bei den Proben, die in Richtung der Bohrungsachſe gefchlagen find, in einer Abnahme der Schlagzahlen um 84 bis 87%, während die Verringerung des Trägheitsmoments bzw. Widerſtandsmoments durch die Querbohrungen im ungünſtigen Falle nur etwa 27%



Abbild. 14. Dauerfchlagprobe mit Querbohrung, bei dauernder Drehung gefchlagen (vgl. Kerbform 5 der Überficht Seite 8)



Abbild. 15. Dauerfchlagprobe mit Querbohrung, bei Drehung um 180° in Richtung der Bohrungsachſe gefchlagen (vgl. Kerbform 7 der Überficht Seite 8)



Abbild. 16. Dauerfchlagprobe mit Querbohrung, bei Drehung um 180° ſenkrecht zur Bohrungsachſe gefchlagen (vgl. Kerbform 6 der Überficht Seite 8)

winkel von 55°. Die Kerbform der Proben der fünften bis ſiebten Reihe ift wieder die Kruppſche Normal-Rundkerbform, in den Kerben wurden aber Querbohrungen von 2 mm Durchmeſſer durch die Stäbe gelegt, die den Einfluß von Schmierbohrungen in Querſchnitten, die Dauerbeanspruchungen unterworfen ſind, erkennen laſſen ſollten. Während die Proben der erſten bis vierten Reihe nur bei dauernder Drehung gefchlagen wurden, wurden die Proben mit dieſer letzten Kerbform ſowohl bei dauernder Drehung (vgl. 5. Reihe), als auch bei Drehung um 180° gefchlagen, und zwar ſowohl ſenkrecht zur Bohrungsachſe (vgl. 6. Reihe), als auch gleichgerichtet mit derſelben (vgl. 7. Reihe). Alle Kerben wurden ſo fauber als möglich eingearbeitet und dann poliert.

Die Ergebniſſe der Verſuche reden eine deutliche Sprache ſowohl für den Konſtruktör als auch für die ausführende Werkſtatt. Sie lehren, daß bei Dauerbeanspruchungen die Lebensdauer von Bauteilen mit ſchnellen Querſchnittsübergängen, plötzlichen Richtungswechſeln ihrer Körperkanten oder Einkerbungen mit all ihren Formmöglichkeiten ganz außerordentlich herabgeſetzt werden kann und daß

beträgt. Eine Querbohrung durch ein Bauteil im Sinne der Beanspruchungsrichtung bedeutet demnach eine befondere Gefährdung, namentlich dann, wenn an dem Bohrlöch der Grat, der wieder eine befondere Art von Oberflächenerverletzung darſtellt, nicht mit genügender Sorgfalt entfernt worden ift. Die Abbild. 14 und 15 zeigen, daß die Anriſſe bei den Proben der fünften und ſiebten Reihe in Richtung der Bohrungen beſonders ſchnell fortſchreiten und daß trotz verſchiedener Schlagart die Bruchbilder ganz ähnlich ſind. Der Bruch einer Probe der ſiebten Reihe ift aus Abbildung 16 erſichtlich.

Aus einem Vergleich der Schlagzahlen (vgl. die Überficht auf Seite 8) geht hervor, daß dieſe Zahlen bei gleicher Kerbform mit ſteigender Streckgrenze der Verluſtſtähle wachſen, und daß das Verhältnis der Zahlen zueinander bei den einzelnen Kerbformen, wenn man von den Proben der zweiten und dritten Reihe zunächſt abſieht, bei jedem Stahl annähernd gleich ift. Bei den Proben der zweiten Reihe war eine beſſere Übereinfimmung im Verhältnis der Zahlen nicht zu erwarten, weil die von Hand eingeriſten Riefen nicht gleichmäßig bei

allen Stählen ausfallen konnten. So ist der geringe Abfall bei den Schlagzahlen des Nickelstahls vermutlich darauf zurückzuführen, daß bei diesem weichen und zähen Stahl die Riefen weniger scharf als bei den anderen Stählen ausfielen. Größere Abweichungen bestanden auch in den Verhältniszahlen der dritten Reihe, die sich sowohl aus der Schwierigkeit der genauen Herstellung dieser Kerbform als auch daraus, daß die Dauerbeanspruchung in den beiden Querschnitten der einspringenden Ecken gleichzeitig wirkten.

Die zum Teil sehr verschiedene Zähigkeit der Stähle kommt in Übereinstimmung mit den bisherigen Erfahrungen auch in den Ergebnissen dieser neuen Versuchsreihe nicht zum Ausdruck.

Zur Erzielung höchsten Widerstandes gegenüber Dauerbeanspruchungen bei verhältnismäßig niedriger Einzelspannung einerseits und gegenüber vereinzelt schlag- oder stoßartig auftretenden gewalttätigen Überbeanspruchungen andererseits sind daher ganz verschiedene, im allgemeinen einander entgegengerichtete Materialeigenschaften erforderlich.

Während gegenüber Dauerbeanspruchungen, die während der normalen Arbeitsleistung einer Maschine auftreten, die Lebensdauer eines Bauteiles allein mit der Höhe der Streckgrenze des verwendeten Stahles steigt, bei scharfen Kerbformen allerdings nur bis zu einer gewissen Höhe der Streckgrenze, stellen dynamische Überbeanspruchungen die höchsten Anforderungen an das Formänderungsvermögen oder gar die Bruch-

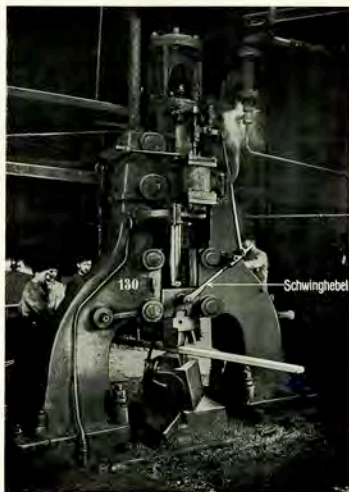
arbeit der Stähle. Für diese gegebenenfalls schlag- oder stoßartig auftretenden Belastungen bildet der Schlagwiderstand von Kerbschlagproben den besten Maßstab.

Wenn daher in Konstruktionen die Gewichtsfrage eine ausschlaggebende Rolle spielt, oder aus sonstigen Gründen Beschränkungen in den Querschnittsdimensionen geboten sind, aber bei hoher Beanspruchung unbedingte Betriebssicherheit gefordert werden muß, so ist zu entscheiden, ob: 1. hohe Lebensdauer gegenüber Dauerbeanspruchungen, oder 2. große Sicherheit gegen Bruch durch Gewaltbeanspruchungen, oder 3. beides gefordert werden muß.

Die alsdann zu verwendenden Stahlorten müssen im Falle 1 möglichst hohe Streckgrenze, im Falle 2 möglichst hohe Kerbzähigkeit, im Falle 3 möglichst hohe Streckgrenze und Kerbzähigkeit besitzen.

Zum Schluß seien hier noch Versuche erwähnt, die mit im Einsatz gehärteten Dauerschlagproben angestellt wurden. Wenn auch diese Versuche noch nicht als abgeschlossen gelten dür-

fen, so ist ihr bisheriges Ergebnis doch derart, daß sich daraus zweifellos manche Nutzanwendungen ergeben werden. Den Versuchen ging die Annahme voraus, daß zur Erzielung erhöhten Widerstandes gegen Dauerschlagwirkungen eine Erhöhung der elastischen Eigenschaften des Materials in den äußeren, am meisten beanspruchten Schichten von Einfluß sein müsse. Die Ergebnisse bestätigten die Annahme. Im Einsatz gehärtete Dauerschlagproben



Abbild. 17. Schnellschlagender Dampfhammer der Krupp'schen Hammerwerke.

mit dem Normal-Rundkerb aus Krupp'schen Sonderstählen für Einsatzhärtung ergaben bereits Schlagzahlen von mehr als 11 Millionen Schlägen, ohne daß ein Bruch eintrat, während die besten Konstruktionsstähle bei einer Streckgrenze z. B. von 96 kg/qmm nicht mehr als 151400 und von 150 kg/qmm nicht mehr als 571300 Schläge aushielten.

Über eine erfolgreiche praktische Nutzenwendung, die aus den Erfahrungen dieser Versuche gezogen wurde, kann bereits berichtet werden. An Schnellhämmern zum Schmieden von Werkzeugstahl brachen die Schwinghebel - vgl. Abbild. 17 -, welche die Umsteuerung des Dampftriebers betätigen, meist nach 1 - 2 Wochen, oft nach wenigen Tagen. Ihre Beanspruchung ist namentlich dann groß, wenn dünne und zugleich flache Querschnitte harten Stahls geschmiedet werden, wenn also der Weg, auf welchem die Schlagarbeit des mit voller Wucht auftretenden Bais verzehrt wird, nur sehr klein ist. Die Schwinghebel werden

dadurch unmittelbar stark in Mitleidenschaft gezogen, insofern als durch das fast plötzliche Aufhalten des mit großer Geschwindigkeit nach unten schwingenden Hebels und das sofortige Wiederanheben große Verzögerungs- und Beschleunigungskräfte auftreten, welche bei ihrer vieltausendfachen Wiederholung das rasche Zubruchgehen der Hebel in dem durch den Pfeil angedeuteten Querschnitt zur Folge hatten.

Im Verlaufe einer längeren Versuchsreihe, die absichtlich zunächst ohne konstruktive Änderungen zur Behebung dieses Übelfalles eingeleitet war, wurden u. a. auch Hebel eingebaut, die aus im Einsatz gehärteten Sonderstählen hergestellt waren. Der erste Bruch eines solchen im Einsatz gehärteten Hebels erfolgte erst nach 6 1/2 monatigem Dienst, nachdem er etwa fünfmal so lange gearbeitet hatte als die besten der früher verwendeten Hebel aus Vergütungsstahl.

Zusammenfassung.

- 1.) Es wird an einer Reihe von abgebildeten Betriebsbrüchen das Wesen der Dauerbeanspruchungen und die Dauerbruchursache erklärt.
- 2.) An Hand der Ergebnisse von etwa 3500 Einzelversuchen auf dem Krupp'schen Dauerschlagwerk werden die Beziehungen zwischen der Widerstandsfähigkeit eines Stahles gegenüber Dauerbeanspruchungen und seiner Streckgrenze, in der sich die Höhe seiner Elastizitätsgrenze wieder-

spiegelt, dargelegt.

- 3.) In einer besonderen Versuchsreihe wird die Gefahr scharfer Kerbformen in Vergleichszahlen vor Augen geführt.
- 4.) Zum Schluß wird mitgeteilt, daß im Einsatz gehärtete Maschinenteile, die Dauerbeanspruchungen unterworfen sind, in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Dauerschlagprobe eine hohe Lebensdauer aufweisen.

