

Baustoff sehr wenig gewachsen, weil er vorher Druckspannungen über die Quetschgrenze hinaus ausgesetzt war. Wird er nun durch abwechselnde Erhitzung und Abkühlung wechselnden Beanspruchungen unterworfen, so ermüdet er schließlich und reißt ein [III, 1]. In ähnlicher Weise sind die bekannten Rißbildungen an den Kolbenböden- und deckeln von Gasmaschinen zu erklären.

An Großgasmaschinenzylindern kommen Risse besonders häufig an der Ansatzstelle *a* der Ein- und Auslaßstutzen, Abb. 160, vor. Auch ihre Bildung ist in ähnlichen Ursachen, wie eben erörtert, begründet, indem die Wandung innen in weiten Grenzen wechselnden Temperaturen, außen aber dem kalten Kühlwasser ausgesetzt ist. Die Rißbildung wird durch Lunkerbildungen und durch Unreinigkeiten, die sich an den Stellen beim Guß leicht absetzen, noch unterstützt.

Radiale Risse am Umfang einer Dampfturbinenscheibe konnten auf die plötzliche Abkühlung durch Wasser, das beim Abstellen der Maschine aus dem Einspritzkondensator in das Turbinengehäuse gestiegen war, zurückgeführt werden. Der Rand der noch laufenden Scheibe tauchte in das Wasser und suchte sich zusammenzuziehen, wurde aber daran durch den noch warmen, mittleren Teil gehindert und riß. — Die tangentialen Risse an derartigen Scheiben, an der Stelle, wo sie in die Naben übergehen, dürften ihre Erklärung ebenfalls zum Teil in Wärmespannungen finden, indem sich die dünne Scheibe beim Anstellen der Turbine rascher erwärmt und ausdehnt als die starke Nabe. Als ungünstiges Moment kommt hinzu, daß die Übergänge zur Nabe vielfach zu schroff gewählt und so die Spannungen durch die im folgenden näher behandelte Kerbwirkung beträchtlich gesteigert werden.

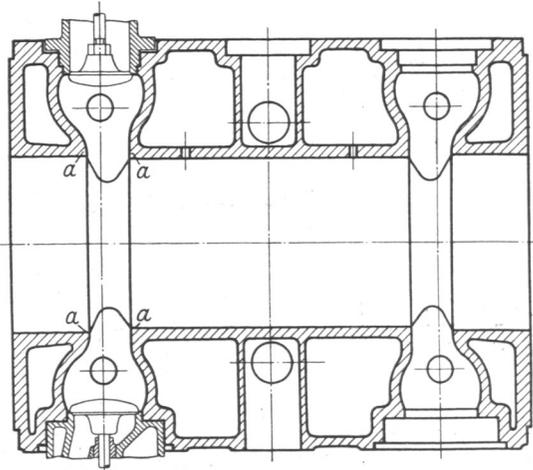


Abb. 160. Großgasmaschinenzylinder.

e) Kerbwirkung.

Sehr wichtig ist nämlich die Wahl der Übergänge und Abrundungen an Stellen, wo größere Spannungen aus einem Teil in einen andern übergeleitet werden müssen. Es ist bekannt, daß Stahlstangen nach geringem Einkerbten leicht abgeschlagen werden können, daß hoch beanspruchte Schrauben an dem scharf eingedrehten Kopfe oder dort, wo das Gewinde beginnt, reißen, daß Kurbelwellen häufig an den Ansatzstellen der Schenkel brechen, oder Risse zeigen, die von Nuten oder Bohrungen ausgehen. Alle diese Erscheinungen sind auf die sogenannte Kerbwirkung plötzlicher Querschnittänderungen oder unvermittelter oder zu scharfer Übergänge zurückzuführen. Die Kerbwirkung bedingt 1. örtlich starke Steigerungen der Spannung und macht 2. die Bauteile viel empfindlicher gegenüber stoßweiser Beanspruchung.

1. Die Spannungsverteilung in gekerbten Querschnitten.

In einem längeren, mit einer Bohrung versehenen, durch die Längskraft *P* belasteten Stabe, Abb. 161, wird in den genügend weit von dem Loch abliegenden Querschnitten *I* und *III* die Spannung praktisch gleichmäßig verteilt sein. Denkt man sich *P* dort in eine Anzahl gleich großer Einzelkräfte *1* bis *10* zerlegt, so werden diese an lauter gleich breiten Streifen wirken. Die Randkräfte *1* und *10* können auf nahezu geradem Wege vom Querschnitt *I* zum Querschnitt *III* gelangen; dagegen werden die übrigen um so stärker abgelenkt, je näher der Stabmitte sie liegen; am stärksten also die Kräfte *5* und *6*. Sie beschränken sich an der Stelle *II* auf kleinere Querschnitte, erzeugen in ihnen höhere Spannungen und eine um so ungleichmäßigere Spannungsverteilung im gesamten

Querschnitt, je größer der Unterschied der Flächen *I* und *II* und je schärfer die Kerbe ist. Der Kräftefluß ist annähernd einem Flüssigkeitsstrom vergleichbar, dem sich ein Hindernis von der Größe und Gestalt des Loches entgegenstellt, das die Geschwindigkeit in den mittleren Flüssigkeitsfäden erheblich mehr steigert als in den äußeren. Ermittlungen über die Größe der tatsächlich auftretenden Spannungen hat Preuß [III, 2 u. 3] an Flußeisenflachstäben durch Feststellen der Längsdehnungen im Querschnitt *II* ausgeführt und dabei u. a. an den gelochten Stäben, Abb. 162—163, die durch die starken Linien wiedergegebene Verteilung gefunden. Die höchste Spannung am Lochrande war 2,1- bis 2,3mal größer als die durch die gestrichelten Linien gekennzeichnete rechnermäßige, mittlere Spannung in dem am meisten geschwächten Querschnitte, welche bei allen Versuchen einer Gruppe gleich groß gehalten wurde. Das Verhältnis der höchsten zur mittleren Spannung war in nur unwesentlichem Maße ab-

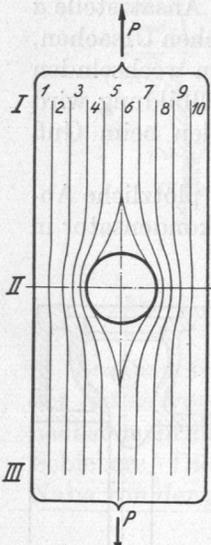


Abb. 161. Zur Verteilung der Kräfte in einem gelochten Stabe.

hängig von der Größe des Loches. Dagegen nahm die geringste Spannung an den Außenwänden der Proben mit wachsendem Lochdurchmesser ab. Beispiele für Stäbe, die von außen her eingekerbt waren, geben die Abb. 164 bis 167 wieder. Danach ist die Spannungssteigerung um so bedeutender, je kleiner der Ausrundungshalbmesser im

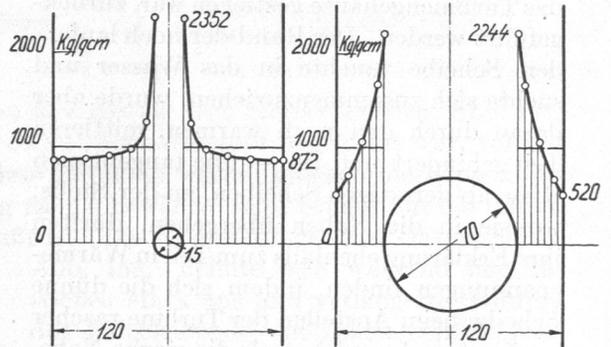


Abb. 162—163. Spannungsverteilung in gelochten Stäben nach Preuß. M. 1:4.

Grunde ist. In der scharfen Kerbe, Abb. 167, wurde die Fließgrenze des Flußeisens, die bei 2600 kg/cm² lag, überschritten, trotzdem die mittlere Spannung rechnermäßig nur 750 kg/cm² betrug! An der rechteckigen Kerbe, Abb. 166, ist die eingetragene

Spannung längs der Faser im Grunde gemessen. Sie ist noch nicht die höchste, erfährt vielmehr in den scharfen Ecken bei *x*, in denen auch stets der Bruch einsetzt, eine weitere Steigerung.

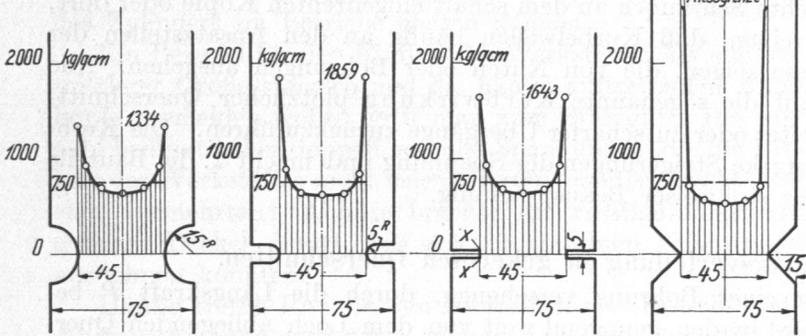


Abb. 164—167. Spannungsverteilung in gekerbten Stäben nach Preuß. M. 1:4.

Kerben, in dem eben besprochenen Sinne, sind aber auch alle Absätze und Ausrundungen, deren Wirkung sich leicht anschaulich machen läßt, wenn man den Verlauf der oben erwähnten Kraftlinien verfolgt. Sie werden z. B. im Falle der

Abb. 168 an den Hohlkehlen *a* und *b* und um die Bohrung *c* herum um so näher zusammenrücken und um so größere Spannungssteigerungen hervorrufen, je schärfer die Übergänge und Kehlen sind. Schließlich wirken auch kleine Hohlräume, Fehlstellen, Einschlüsse oder namentlich Risse, die nichts anderes als schärfste Kerben mit sehr kleinem Krümmungshalbmesser sind, in gleicher Weise. Wenn Sprünge durch Abbohren an den Enden,

Abb. 169, am Weiterreißen verhindert und unschädlich gemacht werden, so beruht das auf der Abschwächung der Kerbwirkung durch die Vergrößerung des Krümmungshalbmessers am Ende des Risses.

Auch die theoretischen Untersuchungen von Kirsch [III, 4] und Föppl [III, 5] lassen an runden Kerben Steigerungen auf das dreifache der mittleren Spannung, an scharfen noch höhere erwarten.

Kerben vermindern auch die Widerstandsfähigkeit gegenüber Beanspruchung auf Biegung und Drehung. An dem gekerbten, durch ein Kräftepaar, also zwischen *A* und *B* durch ein überall gleiches Biegemoment belasteten Stabe, Abb. 170, wird die Spannungsverteilung im schwächsten Querschnitte nicht geradlinig wie in den übrigen sein,

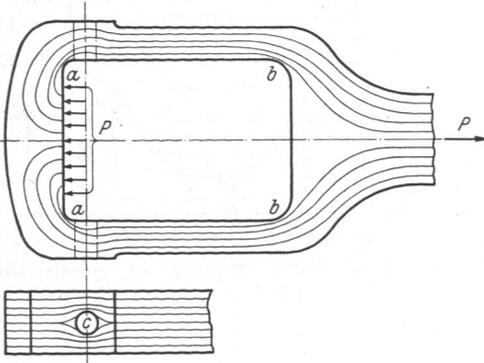


Abb. 168. Verlauf der Kraftlinien in einem Schubstangenkopfe.

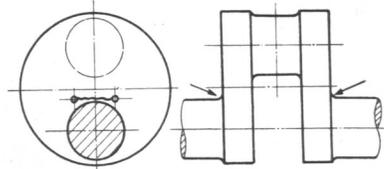


Abb. 169. Abbohren eines Risses.

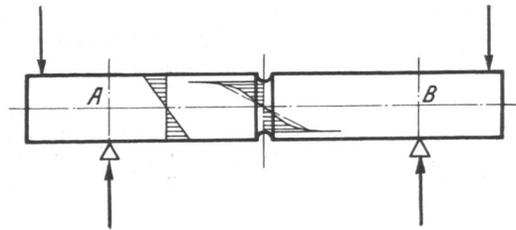


Abb. 170. Spannungsverteilung in einem gekerbten, gebogenen Stabe.

sondern eine erhebliche Erhöhung am Kerbgrunde, entsprechend der Verdichtung der Kraftlinien aufweisen. Versuche von Föppl [III, 6] ergaben an Flußeisenproben aus zwei Stangen mit 4470 bzw. 4040 kg/cm² Zugfestigkeit und einer Fließgrenze von 3020 bzw. 2545 kg/cm² bei wechselnder Beanspruchung auf Biegung, daß der Bruch nach 75300 Belastungswechseln an ungekerbten Stäben von 20 mm Durchmesser bei etwa ± 3200 kg/cm², an Stäben von 30 mm äußerem und 20 mm Durchmesser im Kerbgrunde mit 4 mm Abrundung bei ± 2710 kg/cm² und bei 1 mm Ausrundung bei ± 1940 kg/cm² zu erwarten ist. Die Zahlen stehen im Verhältnis 100:85:61 zu einander, so daß die Widerstandsfähigkeit der zuletzt aufgeführten Stäbe um rund 40% vermindert war. Andere Proben, die im Mittel 4000 kg/cm² Zugfestigkeit und 2085 kg/cm² an der Fließgrenze aufwiesen, lieferten in guter Übereinstimmung als wahrscheinliche Bruchbelastung nach 138000 Wechseln: an glatten Stäben ± 2945 , bei 4 mm Ausrundung ± 2320 und bei 1 mm Ausrundung ± 1840 kg/cm².

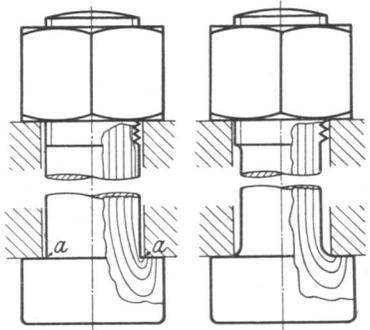


Abb. 171—172. Kerbwirkung an Schraubenbolzen.

Daß auch Drehspannungen an unvermittelten Übergängen erhebliche Erhöhungen erfahren und das bekannte Abwürgen an scharfen Eindrehungen begünstigen, wies Föppl nach [III, 7].

Praktische Anwendungsbeispiele für die vorstehenden Ausführungen bieten die Abb. 171—176. Die Ansatzstelle des Gewindes, Abb. 171, ruft eine beträchtliche Kerbwirkung hervor, die durch Verwendung von Trapez- oder noch besser von Rundgewinde oder durch Feingewinde, das weniger tiefe Einschnitte gibt, gemildert werden kann. Ein anderer Weg ist der an Schubstangenkopfschrauben häufig benutzte, den Bolzen auf den Kerndurchmesser abzusetzen, Abb. 172, und die Gewindegänge vorstehen zu lassen. Falsch ist die scharfe Eindrehung des Schraubenkopfes bei *a*, Abb. 171, zweckmäßig die

gut ausgerundete Kehle, Abb. 172, gegebenenfalls unter kegeliger Erweiterung des Loches, in dem der Bolzen sitzt, zweckmäßig auch die Verwendung einer Mutter an Stelle des Kopfes.

An Kurbellagern gehen Brüche häufig von den Kehlen der Aussparungen für die Nachstellkeile aus und zwar bei rechnerisch oft recht geringen Beanspruchungen, vgl. die Ausführungen in dem Abschnitte über Kurbelwellenlager. Preßzylinder mit ebenen oder scharf angesetzten Böden neigen zur Rißbildung an den Ansatzstellen, Abb. 173.

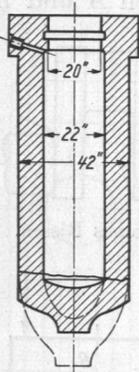


Abb. 173. Bodenriß an einem Preßzylinder.

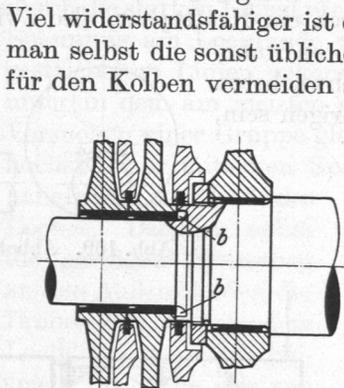


Abb. 174. Turbinenwelle mit Hinterdrehung zur Verminderung der Kerbwirkung.

Viel widerstandsfähiger ist ein halbkugelförmiger Abschluß, bei welchem man selbst die sonst übliche Eindrehung als Begrenzung der Lauffläche für den Kolben vermeiden soll.

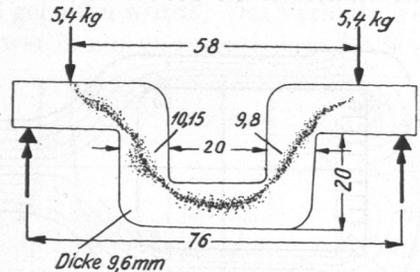


Abb. 175. Kurbelkröpfung in polarisiertem Lichte (nach Hoenigsberger).

An Wellen werden die Lagerstellen in Rücksicht auf die Bearbeitung und zur Sicherheit gegen seitliche Verschiebungen nicht selten abgesetzt. Stets sind dann aber gute Ausrundungen, an Stellen mit sehr großen Durchmesserunterschieden, wie an der Turbinenwelle, Abb. 174 bei *b*, runde Hinterdrehungen zu empfehlen, damit die Spannungen möglichst allmählich aus dem einen in den andern Querschnitt übergeleitet werden. Ein wichtiges Beispiel bilden die gekröpften Wellen, wo die Kerbwirkung an der Übergangsstelle vom Wellenschenkel zum Kurbelarm häufig zu Rissen und Brüchen, Abb. 169, führt. Einen Anhalt für die Verteilung der Spannungen geben die Versuche Hoenigsbergers [III, 10] an gebogenen Glaskörpern, an denen sich die Lage der neutralen Schicht bei Betrachtung im polarisierten Lichte dunkel auf hellem Grunde abhebt. Wie Abb. 175 zeigt, rückt die Schicht bei der Beanspruchung durch ein Kräftepaar sehr nahe an die ein-



Abb. 176. Risse infolge von Drehspannungen.

springenden Ecken heran. Daraus ist auf eine starke Zusammendrängung der Kraftlinien und Erhöhung der Spannungen an jenen Stellen zu schließen.

Die Ursache der unter 45° gegen die Achse geneigten Risse, Abb. 176, die manchmal Wellen an Bohrungen oder an eingefrästen Nuten für Federn und Keile zeigen, sind Drehspannungen, die die größte Dehnung des Werkstoffes in einer zur Rißebebene senkrechten Richtung, also ebenfalls unter 45° gegen die Achse, erzeugen.

Übersteigt die Spannung am Grunde eines Kerbes die Fließgrenze, wie im Falle der Abb. 167 und treten dadurch bleibende Streckungen auf, so wird der Stab bei der Entlastung nicht völlig entspannt. Bei der zweiten Belastung bildet sich annähernd wieder derselbe Zustand wie vorher aus, jedoch unter im wesentlichen elastischen und nur geringen weiteren plastischen Formänderungen. Nehmen die letzteren bei wiederholter schweller Beanspruchung allmählich ab, so wird sich ein Beharrungszustand einstellen, andernfalls muß schließlich der Bruch eintreten.

Viel bedenklicher ist, wenn ein derartiger gekerbter Stab wechselnden Spannungen ausgesetzt wird. Der durch eine erste Inanspruchnahme auf Zug gestreckte Werkstoff ist nach den Wöhlerschen Gesetzen gegenüber der folgenden Beanspruchung auf Druck viel weniger widerstandsfähig, ermüdet durch die wiederholten wechselnden Belastungen,

so daß neue Teile zum Fließen kommen und sich schließlich ein Riß bildet, der früher oder später zum Bruch führen muß (Ermüdungsbruch). Niedrige Beanspruchungen, die das Überschreiten der Fließgrenze sicher ausschließen, sind hier geboten.

2. Die Wirkung von Kerben bei stoßweiser Beanspruchung.

Besonders empfindlich sind eingekerbte Stellen gegenüber Schlägen oder Stößen, weil die Fähigkeit, die Stoßarbeit durch die Formänderungen aufzunehmen, ganz erheblich herabgesetzt ist. Es sei das an einem auf Zug beanspruchten Stabe, Abb. 177, vom Durchmesser $d = 30$ mm, mit einer Kerbe, die im Grunde $0,707 d = 21,2$ mm Durchmesser hat, gezeigt, im Vergleich mit zwei zylindrischen Stäben *II* und *III* von $0,707 d$ und d mm Durchmesser, sämtlich von $l = 150$ mm Länge.

Zunächst möge die Fließgrenze nicht überschritten und die zu günstige Annahme gemacht werden, daß sich die Spannungen in allen Querschnitten gleichmäßig verteilen. Der Stab bestehe aus weichem Flußstahl, dessen Verhalten beim Zugversuch durch Abb. 178 ge-

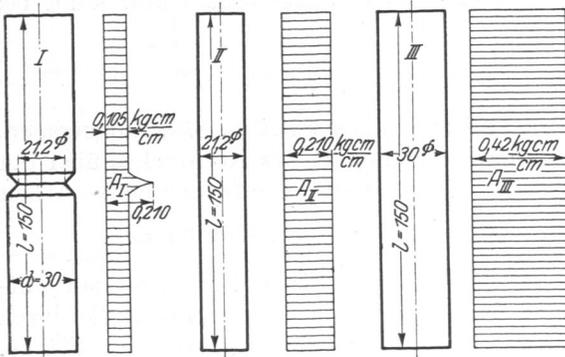


Abb. 177. Elastisches Arbeitsvermögen gekerbter und ungekerbter Stäbe bei $\sigma = 500$ kg/cm².

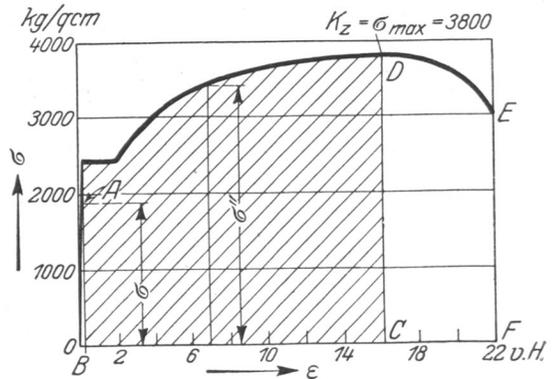


Abb. 178. Spannungs-Dehnungslinie des Flußstahls zu Abb. 177 u. 179.

kennzeichnet sei. Beträgt die Höchstspannung in allen drei Fällen σ kg/cm², so ist die spezifische Formänderungsarbeit a_0 durch den Inhalt des Dreieckes *OAB*, Abb. 178, $a_0 = \frac{\sigma \cdot \epsilon}{2} = \frac{\sigma^2 \cdot \alpha}{2}$ und die gesamte Arbeit, die der Stab *III* aufnehmen kann, durch $A_{III} = a_0 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot l$, die des Stabes *II* durch $A_{II} = a_0 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,707d)^2 \cdot l = \frac{A_{III}}{2}$ gegeben. Am Stabe *I* läßt sich die Formänderungsarbeit, wie folgt, ermitteln. In einem beliebigen Querschnitte von der Größe f' betrage die Spannung σ' . Man trage $\frac{(\sigma')^2 \alpha}{2} \cdot f'$ senkrecht zur Achse des Stabes auf und verfähre in entsprechender Weise an allen übrigen Stellen des Stabes. Der Inhalt der so erhaltenen Fläche stellt die gesamte Formänderungsarbeit A_I dar. Da der Hauptteil des Stabes nur unter einer Spannung von $\frac{\sigma}{2}$ steht, so wird A_I nur unwesentlich größer als $\frac{1}{4} A_{III}$. Bei $\sigma = 500$ kg/cm² wären die Arbeiten, die die drei Stäbe aufnehmen könnten, $A_I = 1,62$, $A_{II} = 3,16$, $A_{III} = 6,31$ kgem.

Überschreitet nun die Spannung die Streckgrenze, so wird der Baustoff an der Fließstelle verfestigt, d. h. gegen wiederholte Beanspruchungen im gleichen Sinne und bis zur gleichen Höhe widerstandsfähiger gemacht. Doch beschränkt sich dieser Vorgang an eingekerbten Stäben nur auf einen sehr kleinen Teil der Stabmasse, so daß die Formänderungsarbeit und die Widerstandsfähigkeit gegenüber Stößen nicht wesentlich zunimmt und weitere gleich große Schläge wieder neues Fließen und schließlich den Bruch herbeiführen werden. Der Konstrukteur muß sich also stets vor Augen halten, daß bei