

2. Das Verhalten von Eisen und Stahl bei verschiedenen in der Technik vorkommenden Belastungsarten.

Grundsätzlich ähnliche Unterschiede, wie zwischen Gummi und Glas, finden sich auch bei den Baustoffen, die in der Technik hauptsächlich verwendet werden. Jeder weiß aus Erfahrung, daß eine harte Nadel oder eine Messerklinge schon durch geringe Biegung, durch einen leichten Schlag, zerbrochen werden kann, daß es dagegen oft sehr viel Mühe macht, einen Draht zum Brechen zu bringen. Man muß einen solchen weichen Draht viele Male hin- und herbiegen, ehe er abbricht. Daraus ergeben sich anschauliche Beziehungen zu dem, was vorher gesagt wurde. Es gehört sehr viel mehr „Arbeit“ dazu, um den Draht, als um die spröde Stahlnadel zu brechen, obwohl die „Festigkeit“ des Stahles ganz bedeutend höher ist. An einen harten Stahldraht von 1 mm^2 Querschnittsfläche können wir 180 kg anhängen, ehe er bricht, während ein weicher Eisendraht schon bei 30 bis 40 kg zerreißen wird.

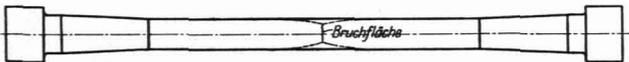


Abb. 126. Normalstab für Zerreiβversuche.

Mit einem Draht in ähnlicher Weise einen Versuch anzustellen wie mit dem Gummifaden, ist nicht möglich, weil die Verlängerungen viel kleiner sind und deshalb mit einfachen Maßstäben nicht genau genug gemessen werden können. Mit besonderen Prüfmaschinen läßt sich aber ebenso wie für den Gummifaden eine Kurve aufstellen, die z. B. für den in Abb. 126 skizzierten 15 cm langen Rundstab aus weichem Stahl (Schmiedeeisen) ungefähr verläuft, wie in Abb. 127 angegeben. Die Querschnittsfläche ist genau 1 cm^2 .

Das Bild ist hier ein ganz anderes als bei dem Gummifaden. Anfangs sind bei wachsender Belastung die Verlängerungen ganz außerordentlich klein. Da diese Verlängerungen in dem Diagramm als wagerechte Strecken aufgetragen werden, so geht die Linie ganz steil in die Höhe, und selbst bei 2000 kg ist, wie aus Abb. 127 ersichtlich, erst eine Verlängerung um $\frac{1}{7}$ mm erreicht (Punkt *a* der Kurve). Bei 1000 kg hatten wir hiervon die Hälfte, $\frac{1}{14}$ mm, usw. Jetzt ändert sich aber plötzlich der Verlauf des Vorganges. Die Dehnungen werden stärker, und bei 2050 kg Belastung geht die Linie ungefähr wagerecht. Der Stab dehnt oder „streckt“ sich um $1\frac{1}{2}$ mm, ohne daß ein größeres Gewicht als 2050 kg angehängt zu werden braucht. Dies ist eine ganz eigentümliche Erscheinung, die auch nur bei weichem Stahl so ausgeprägt auftritt. Man muß sich vorstellen, daß unter dieser Spannung die kleinsten Teile des Werk-

stoffes leicht gegeneinander verschiebbar geworden, gewissermaßen in flüssigen Zustand geraten sind, und man bezeichnet den Vorgang deshalb als „Fließen“ des Werkstoffes. Nun steigt die Spannung allmählich wieder, bis zur Höchstbelastung von 3800 kg, während gleichzeitig eine starke Dehnung auftritt. Der Stab ist jetzt in seinem Gefüge so weit gelockert, daß es nicht einmal mehr nötig ist, diese Belastung aufrecht zu erhalten. Man kann die Belastung allmählich abnehmen lassen; trotzdem wird der Stab sich weiter dehnen und schließlich zerreißen. Die gesamte Dehnung beträgt $\frac{1}{7} + 1\frac{1}{2} + 42$ mm, also rund 44 mm. Wie beim Gummifaden wahrzunehmen ist, daß er mit zunehmender Dehnung dünner wird, so findet man auch beim Eisenstab, daß er sich an der Stelle, wo er brechen will, „einschnürt“, wie in Abb. 126 mit gestrichelten Linien angedeutet ist.

Aus Abb. 127 geht hervor, daß das Arbeitsvermögen, das ja durch den Inhalt der Fläche unterhalb der Kurve gekennzeichnet wird, bis zum Punkte *a* ziemlich gering ist, daß sich dann aber infolge der starken Dehnung eine große Arbeitsfläche anschließt. Die

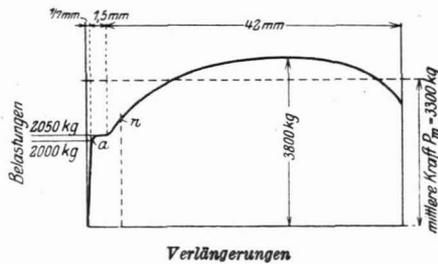


Abb. 127. Dehnungskurve für weichen Stahl.

mittlere Kraft während des ganzen Verlaufes der Dehnung ergibt sich aus Abb. 127 zu ungefähr 3300 kg, so daß bei einem Verlängerungsweg von 4,4 cm das Arbeitsvermögen $3300 \times 4,4 = 14520$ cmkg ist. Bei technischen Konstruktionen geht man nie so hoch hinauf, daß ein Fließen des Materials eintritt, sondern bleibt sogar immer noch erheblich darunter, so daß eine gewisse Sicherheit gegen Bruch bei zufälliger Mehrbelastung entsteht. Nehmen wir z. B. an, daß der Stab unter normalen Umständen 1000 kg zu tragen hat; es möge sich nun infolge irgendeines Zufalles ereignen, daß das Gewicht nicht vorsichtig angehängt wird, sondern, ähnlich wie vorher beim Glasstab und Gummistab angenommen, aus einer Höhe von $\frac{1}{2}$ cm herunterfällt, so daß ein gehöriger Stoß entsteht. Die Arbeit, die vernichtet werden muß, ist dann $1000 \times \frac{1}{2} = 500$ cmkg. Bis zum

Punkt *a* ist das Arbeitsvermögen des Stabes zu gering, das Material beginnt also zu fließen, aber nach wenigen Millimetern Dehnung, etwa bei dem Punkt *n* in Abb. 127, ist die Energie des fallenden Gewichtes vernichtet und der Stoß aufgenommen, ohne daß ein Bruch erfolgt ist. Allerdings darf man dem Stab eine solche Beanspruchung nicht häufiger zumuten, sonst ist sein Arbeitsvermögen bald erschöpft und der Zu-

sammenhang der kleinsten Teile so weit gelockert, daß schließlich ein Bruch eintritt. Bei Maschinen, an denen im Betriebe regelmäßig Stöße eintreten, dürfen daher die Konstruktionsteile nur ziemlich niedrig belastet werden, wenn die Maschine nicht bald unbrauchbar werden soll.

Noch anschaulicher ist folgendes Beispiel. Denken wir uns, daß eine Lokomotive entgleist, während sie mit voller Geschwindigkeit über eine Brücke fährt. Sie fällt dabei mit ihrem vollen Gewicht plötzlich mindestens um Schienenhöhe herunter und übt außerdem durch die lebendige Kraft, die sie infolge der raschen Bewegung besitzt, einen gewaltigen Stoß auf die Brücke aus. Diese gesamte Energie muß durch die Formänderungsarbeit des Baumaterials der Brücke aufgenommen werden. Stellen wir uns vor, die Konstruktionsteile, auf welche die Lokomotive zunächst stößt, der Brückenbelag und die Querträger, wären aus sehr hartem, wenig nachgiebigem Stoff, so daß sie sich nur ganz unbedeutend verbiegen können, so würde die Stoßenergie fast unvermindert auf die Hauptträger der Brücke übertragen werden, und diese müßten so weit nachgeben, daß die Stoßenergie vernichtet wird. Das ist unter allen Umständen für die Brücke schädlich, weil dabei der Werkstoff — ebenso wie bei der Stoßbelastung des Stabes — übermäßig gedehnt wird. Sind auch die Hauptträger aus zu sprödem Stoff, so würde die ganze Brücke einstürzen. Deshalb ist es außerordentlich wichtig, daß alle wichtigen Teile, aus denen die Brücke besteht, sich genügend dehnen können, ohne zu brechen. Der Stoß wird dann schon durch die ersten Bauglieder aufgenommen; sie verbiegen sich so stark, daß die Stoßarbeit größtenteils vernichtet wird und nur ein geringer Teil davon in die wichtigen Hauptträger gelangt. Die Nebenteile lassen sich dann mit mäßigen Kosten ersetzen, während bei den Hauptteilen die Spannungen wahrscheinlich nicht über die zulässige Grenze hinausgekommen sind, eine Schädigung des Materials also nicht stattgefunden hat.

In allen Fällen, wo Stöße befürchtet werden müssen, die die Konstruktion nicht auszuhalten vermag, Sorge man also dafür, daß leicht ersetzbare Teile da sind, an denen die Stoßenergie sich verzehren, sozusagen ihren Zerstörungstrieb befriedigen kann, so daß die lebenswichtigen Teile der Maschine oder des Bauwerkes nicht in Mitleidenschaft gezogen werden.

Noch auf andere Weise als durch Stöße, lediglich durch Schwingungen, können übermäßige Spannungen in den Konstruktionsteilen einer Maschine entstehen. Man fasse einmal eine schwache Spiralfeder, die am einen Ende mit einem nicht zu kleinen Gewicht belastet ist, am anderen Ende an und bewege die Finger, die die Feder halten, um eine ganz kleine Strecke, vielleicht 1 cm, rasch auf und nieder. Dann bleibt das Gewicht ruhig unten hängen, und die

Feder wird nur in dem Maße, wie die Hand bewegt wird, etwas mehr oder weniger gedehnt. Verlangsamt man die Bewegung aber mehr und mehr, so wird plötzlich das Gewicht in starke Schwingungen geraten, und zwar tritt das in dem Augenblick ein, wo die Hand in demselben Takte bewegt wird, wie die Feder mit dem anhängenden Gewicht ihrer Natur nach, d. h. wenn man sie frei schwingen ließe, auf und ab schwingt. Denn jetzt addiert sich jedesmal zu dem Arbeitsvermögen, das in dem schwingenden Gewichte aufgestapelt ist, die kleine von der Hand erzeugte Arbeit; die freie Energie wird also immer größer und verstärkt fortlaufend die Schwingungen des Gewichtes, die mit entsprechenden Dehnungen der Feder verknüpft sind. Da nun auch jedes Konstruktionselement federt, gleichgültig, aus welchem Stoff es besteht, so können heftige Schwingungen und Dehnungen eintreten, sobald die jedesmaligen Anstöße, mögen sie auch an und für sich nicht groß sein, in dem Takte der natürlichen Schwingungen des betreffenden Gliedes aufeinander folgen. Das hat sich u. a. bei langen Schiffswellen geltend gemacht, die von Dampfmaschinen gedreht werden. Jedesmal, wenn der Kolben unter der Wirkung des frisch eintretenden Dampfes der Welle einen neuen starken Antrieb gibt, wird, falls die Umdrehungszahl der Maschine mit der „Eigenschwingungszahl“ der Welle zusammenfällt oder dazu in einem bestimmten Verhältnis steht, die elastische Schwingung der Welle verstärkt, so daß schließlich Dehnungen eintreten, die zum Bruche führen. Bei Antrieb durch Verbrennungsmotoren können wegen der hohen Umlaufzahl auch kürzere Wellen auf diese Weise in Schwingungen versetzt werden. Daher die Gefahr von Brüchen bei den Kurbelwellen von Kraftwagen, Flugzeugen usw.

Bekannt ist, daß Brücken von marschierenden Abteilungen nicht „im Tritt“ begangen werden dürfen, da der Gleichschritt gefährliche Schwingungen hervorrufen kann.

Wir haben gesehen, daß eine starke Schiffswelle sich grundsätzlich ebenso verhält, wie ein Gummifaden oder eine Feder. Die Dehnungen sind sehr klein, treten aber sonst in derselben Weise auf und haben dieselben Erscheinungen zur Folge. Wenn vollkommene Elastizität herrscht — und das ist bei Stahl regelmäßig der Fall, solange noch kein „Fließen“ des Materials eingetreten ist —, sucht der gedehnte Körper immer mit derselben Kraft wieder in den ursprünglichen Zustand zurückzugehen, die nötig war, um die Verlängerung hervorzurufen. Natürlich tritt diese elastische Gegenkraft auch auf, wenn der Stab nicht durch eine äußere Kraft, sondern durch Erwärmung verlängert war und nun, bei der Wiederabkühlung, sich auf die ursprüngliche Länge zusammenziehen will; es ist ja eine bekannte Erscheinung, daß alle Stoffe sich ausdehnen,

wenn ihre Temperatur sich erhöht. Technisch wird diese Erscheinung u. a. für das Aufziehen der Radreifen auf Eisenbahnwagenräder ausgenutzt.

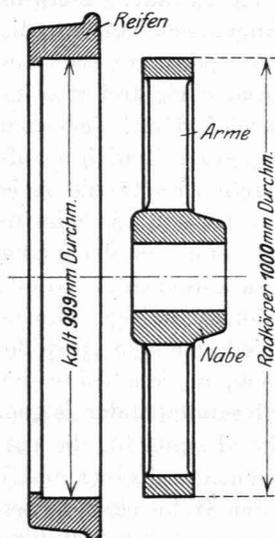


Abb. 128. „Aufwärmen“ des Radreifens auf den Radkörper.

Der Reifen wird so bearbeitet, daß er innen einen etwas kleineren Durchmesser hat, als der Radkörper außen, z. B. in Abb. 128 nur 999 gegen 1000 mm. Man erwärmt nun den Reifen ringsum gleichmäßig, so daß er um den Radkörper herumgelegt werden kann, und läßt ihn dann erkalten. Mit seiner elastischen Kraft sucht jetzt der Ring wieder auf den alten Durchmesser von 999 mm zurückzugehen und preßt sich dabei mit solcher Gewalt auf den Radkörper, daß beide unverschiebbar aufeinander festsitzen.

Dieses künstliche Hervorbringen von Druckspannungen durch die Elastizität des sich zusammenziehenden Materials wird auch in der Geschützherstellung verwertet. Durch das Verbrennen des Pulvers im Innern eines Geschützrohres beim Schuß entsteht ein so gewaltiger Gasdruck, daß besondere Vorkehrungen getroffen werden müssen, um die Geschützrohre widerstandsfähig genug zu machen. Es genügt nicht, den allerbesten Stahl zu verwenden und die Wand des Rohres recht dick zu machen. Das äußere Material nützt nämlich verhältnismäßig wenig. Stellen wir uns einmal vor, daß in dem in Abb. 129 gezeichneten starkwandigen Rohr ein sehr hoher Gasdruck herrscht, so wird derselbe den Werkstoff innen vielleicht bis auf die gestrichelt gezeichnete Linie zusammendrücken. Der innere Umfangskreis müßte sich also auf den größeren Kreis erweitern, und es würden dabei, wenn der Werkstoff nicht nachgiebig genug ist, Risse entstehen, wie sie in der Skizze angedeutet sind. Wenn auch

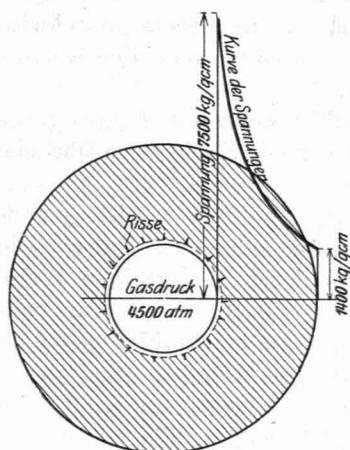


Abb. 129. Vollwandiges Geschützrohr.

im ganzen Rohr Dehnungen auftreten, so kann man sich doch leicht vorstellen, daß die Neigung zur Bildung von Rissen, also die Deh-

nungen und daher auch die Spannungen innen im Rohr viel größer sein werden als nach dem äußeren Rohrumfang zu. Die Rechnung ergibt, daß unter Verhältnissen, wie sie hier angenommen sind, bei 4500 at Gasdruck, am inneren Rohrumfang im Werkstoff eine Spannung von 7500 kg auf 1 cm² herrscht; nach außen hin nehmen, wie durch die Kurve in Abb. 129 anschaulich dargestellt, die Spannungen ab, so daß am Umfang des Rohres nur 1400 kg auf 1 cm² des Werkstoffes kommen. Mit anderen Worten: Der nach außen gelegene Werkstoff wird sehr schlecht ausgenutzt, er trägt wenig dazu bei, die Haltbarkeit des Rohres zu erhöhen, und bei noch weiterer Verstärkung der Wand würden wir mit dem zusätzlich aufgewendeten Werkstoff sogar noch weniger Erfolg erreichen.

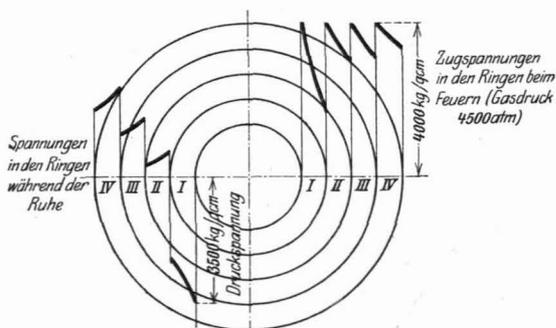


Abb. 130. Spannungen in einem aus mehreren Ringen zusammengesetzten Geschützrohr.

Deshalb wird nach Abb. 130 bei neuzeitlichen Geschützen das Rohr aus mehreren getrennten Ringen gebildet, die aufeinander geschoben werden. Der zweite Ring hat ursprünglich innen einen etwas kleineren Durchmesser als der Ring I, so daß er sich im kalten Zustand nicht über diesen schieben läßt. Er wird in erwärmtem Zustand aufgezogen und preßt, wenn er erkaltet, den inneren Ring zusammen. In gleicher Weise werden die Ringe III und IV aufgebracht.

Die Spannungen in den einzelnen Ringen sind in Abb. 130 wieder in Kurven aufgetragen, und zwar für den Ring I im Zustand der Ruhe (links) nach unten, weil dieser Ring zusammengedrückt statt gedehnt wird. Er hat also Druckspannungen auszuhalten, während die anderen Ringe, je weiter nach außen, desto stärker, auf Zug beansprucht sind. Stellen wir uns nun vor, daß im Rohr durch die Ausdehnung des geschütztes hoher Gasdruck entsteht, so wird durch die Ausdehnung des ganzen Rohres zunächst der innerste Ring, der vorher zusammengedrückt war, wieder auf seine ursprüngliche Form gebracht, die er vor dem Aufziehen der äußeren Ringe hatte. Es

würde also jetzt am inneren Umfang im Werkstoff keine Spannung — technisch ausgedrückt, die Spannung 0 — herrschen. Darüber hinaus aber dehnt der Gasdruck den Ring noch weiter aus, und zwar so weit, daß innen eine Spannung von 4000 kg auf 1 cm² entsteht. Am äußeren Umfang des Ringes *I* ist die Spannung natürlich geringer. Im inneren Umfang des Ringes *II* aber, der schon früher dadurch, daß er sich nicht wieder ganz zusammenziehen konnte, eine künstliche Zugspannung erhalten hatte, wird diese Spannung durch den Gasdruck, wie am inneren Umfang von Ring *I*, auf 4000 kg/cm² erhöht; ebenso geht es bei den Ringen *III* und *IV*, die von vornherein noch größere künstliche Spannungen hatten, so daß sie jetzt, obwohl der Gasdruck auf sie weniger Wirkung hat, doch alle auf 4000 kg/cm² Spannung kommen und somit gleichmäßig bis an die zulässige Spannungsgrenze ausgenutzt werden. Da das elastische Verhalten des Stahles genau bekannt ist, so kann man durch Rechnung die Durchmesser bestimmen, welche die Rohre bei der Bearbeitung innen und außen erhalten müssen, damit die Spannung von 4000 kg/cm² nicht überschritten wird. Natürlich gehört ein peinlich genaues Ausbohren und Abdrehen dazu, da ein Fehler von $\frac{1}{100}$ mm ein stärkeres oder geringeres Zusammenziehen beim Erkalten des Rohres zur Folge haben und damit eine Veränderung der Spannungen hervorrufen würde.

3. Die verschiedenen Eisen- und Stahlarten und ihre Prüfung.

Die Werkstoffspannung, mit der hier, bei dem Geschützrohrstahl, gerechnet wurde — 4000 kg für 1 cm² — ist so hoch, daß gewöhnlicher weicher Stahl (Schmiedeeisen) schon gebrochen wäre. Dabei bestehen beide Stoffe zum weitaus größten Teil aus reinem Eisen, und es sind nur geringe Beimischungen anderer Art vorhanden, die dem Werkstoff die größere oder geringere Festigkeit verleihen. Wir sahen auch schon vorher, daß die Baustoffe in anderer Beziehung, in bezug auf Dehnbarkeit und Arbeitsvermögen, ganz verschiedene Eigenschaften haben können. Nicht nur durch die chemische Zusammensetzung, sondern auch durch die Art der Herstellung und vorherigen Bearbeitung können dem Werkstoff seine besonderen Eigenschaften erteilt werden.

Bekanntlich stellt man das Eisen aus Erzen her, Gesteinsarten, die ihrer chemischen Zusammensetzung nach vorwiegend Verbindungen von Eisen mit Sauerstoff sind, und die an vielen Stellen der Erde in großen Lagern vorkommen. Diese Erze werden in gewaltigen Öfen, die bis zu 40 m Höhe haben können, mit Kohle — meist in der Form