Dritter Abschnitt.

Die Ausnutzung des Werkstoffs und die Entwicklung der Form.

1. Dehnung und Arbeitsvermögen der Stoffe.

In das Verständnis des Verhaltens der Werkstoffe, die wir zur Herstellung unserer Maschinen und Bauwerke benutzen, und in die wissenschaftlichen Verfahren, die zu ihrer Untersuchung und Berechnung benutzt werden, führt am besten ein einfacher kleiner Versuch ein, den jeder selbst ausführen kann.

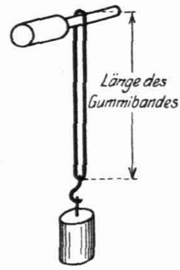

Abb. 123. Ausdehnungsversuch mit einem Gummiband.

Wir hängen ein kleines Gummibändchen über einen Stift oder an einen Haken, Abb. 123, messen seine Länge und belasten es zunächst mit einem kleinen, nach und nach dann mit schwereren Gewichten. Das Gummiband wird länger und reißt endlich, nachdem es sich auf ein Mehrfaches seiner ursprünglichen Länge ausgedehnt hat. Bei einem solchen Versuche fanden sich folgende Zahlen:

Belastung	100	200	300	400	500	600	620 Gramm
Verlängerung	6,0	16,8	24,4	29,9	34,8	39,1	40,4 cm (Bruch)
Also Zunahme der Verlängerung gegenüber der jeweils vorhergehenden Belastungsstufe	6,0	10,8	7,6	5,5	4,9	4,3	—

Die ursprüngliche Länge des Gummibändchens — bei Belastung 0 — war 10,0 cm. Beim Anhängen von 100 g verlängerte sich das Band um 6,0 cm, wurde also 16,0 cm lang, beim Anhängen von 200 g war die Länge 26,8 cm usw. Bei einer Belastung von 620 g riß das Band, nachdem es sich von 10 cm auf 50,4 cm, also auf mehr als das Fünffache, gedehnt hatte.

In Abb. 124 sind nun die Ergebnisse des Versuches in einem Schaubild zusammengestellt, wie wir es bereits für die Berechnung von Dampfmaschinen benutzt hatten. In wagerechter Richtung sind die Verlängerungen aufgetragen, die bei den verschiedenen Belastungen entstehen, und senkrecht dazu die Belastungen selbst. So haben wir 6 cm Verlängerung (in der Zeichnung auf 6 mm verkürzt) und dazu senkrecht 100 g als zugehörige Belastung. 10 g sind immer als 1 mm gezeichnet, so daß 100 g in der Zeichnung als 10 mm dargestellt werden. Bei 16,8 cm Verlängerung beträgt die Belastung 200 g, bei 24,4 cm 300 g usw. Wir erhalten auf diese Weise, indem wir jedesmal die Belastung senkrecht zur Verlängerung eintragen, eine Reihe von Punkten, die wir durch eine Linie verbinden. Aus der Zahlentafel sowohl wie aus Abb. 124 geht hervor, daß durchaus nicht etwa jedesmal, wenn wir 100 g mehr anhängen, die Verlängerung einen bestimmten gleichmäßigen Betrag ausmacht. Die ersten 100 g ergeben nur 6, die zweiten 10,8, die dritten dann wieder nur 7,6 cm und die folgenden jedesmal noch weniger Verlängerungszunahme. Würde das Anwachsen der Verlängerungen ganz gleichmäßig dem Anwachsen der Kraft entsprechen, so ergäbe sich eine gerade Linie; bei dem Versuch mit dem Gummiband kommen wir aber zu einer Kurve, die in verschiedenen Richtungen gekrümmt ist.

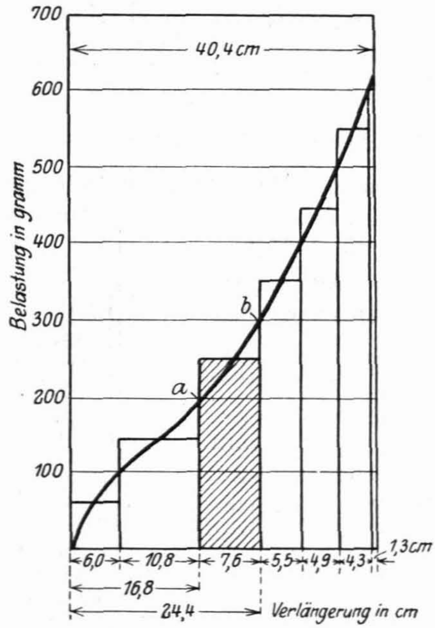

Abb. 124. Dehnungskurve eines Gummibandes.

Die Linie zeigt nicht nur in anschaulicher Weise, um wieviel der Gummifaden sich bei jedem Belastungszuwachs verlängert, sondern sie hat noch eine besondere Bedeutung. Betrachten wir einmal das Stück zwischen 16,8 und 24,4 cm Verlängerung. Die Strecke, um die das Belastungsgewicht sich hierbei bewegt hat, ist $24{,}4 - 16{,}8 = 7{,}6$ cm. Die Belastung war anfangs 200, zum Schluß 300 g, im Mittel also 250 g. Somit ist Kraft $\times$ Weg : $250 \times 7{,}6 = 1900$ Gramm-Zentimeter die Arbeit, die von der Verlängerungskraft geleistet und von dem Gummibändchen aufgenommen worden ist. Diese Arbeit ist der Inhalt des schraffierten Rechtecks oder, was auf dasselbe herauskommt, der Inhalt der Fläche unter dem Kurvenstück zwischen *a* und *b*. Was hier gefunden ist, gilt auch für die anderen Teile der Kurve. Die Fläche unter dem betreffenden Kurvenabschnitt gibt jedesmal die von dem Verlängerungsgewicht geleistete und vom Gummiband aufgenommene Arbeit. Nehmen wir alle diese Flächenstücke zusammen, so erhalten wir die Fläche unterhalb der ganzen Kurve, und diese Fläche ist gleich der gesamten Arbeit, die vom Beginn der Verlängerung bis zum Bruch von dem Gummiband verzehrt worden ist, das „Arbeitsvermögen" des Gummibändchens bei der Dehnung bis zum Bruch.

Vielleicht wird mancher Leser nicht recht verstehen, warum hier bei der Besprechung der Baustoffe der Technik mit Gummi begonnen wird. Aus Gummi kann man keine Maschinen bauen — und die Stoffe, die wir gebrauchen, vor allem Eisen und Stahl, sind doch sozusagen vollkommen starr, geben „überhaupt nicht" nach!

Diese Meinung ist bei einem Laien, der an die gewaltigen, massig gebauten Maschinen denkt, nur natürlich. Wie falsch sie aber ist, davon kann sich jedermann leicht überzeugen, wenn er sich auf eine Brücke stellt, über die Fuhrwerke und Straßenbahnen verkehren. Bei manchen Brücken ist es fast beängstigend, wie das Bauwerk schwankt, wenn ein Wagen darüber rollt. Das ist aber nicht etwa ein grundsätzlicher Fehler der Bauweise. Ja, man kann sogar sagen: Eine Brücke, die sich überhaupt gar nicht biegen würde, müßte bei jedem kleinsten Stoß, wie ihn das Wagenrad beim Überfahren eines Steines verursacht, zusammenfallen.

Um darüber recht klar zu werden, wollen wir uns einmal einen runden Gummistab und einen Glasstab vorstellen, die jeder 2 cm dick und 1 m lang sind. Beide Stäbe sind am einen Ende aufgehängt, und am anderen Ende können Gewichte angebracht werden. An den Glasstab kann man viel mehr Gewicht anhängen, ehe er bricht; er wird 1000 kg tragen, während der Gummistab schon bei 60 kg reißen würde. Aber der Glasstab dehnt sich dabei nur um $^1/_2$ mm, also um ein ganz verschwindend kleines Stück, während der Gummistab, wenn er sich ebenso verhält wie der vorher untersuchte Faden, um 4 m länger werden müßte, ehe er reißt.

Beim Glasstab war die Belastung zu Anfang 0, zum Schluß dagegen 1000 kg, im Mittel also 500 kg, bei einem Dehnungsweg von $^1/_2$ mm oder $^1/_{20}$ cm. Die aufgenommene Arbeit, das Arbeitsvermögen bis zum Bruch, ist also $500 \times {}^1/_{20} = 25$ cmkg. Rechnen wir beim Gummistab ebenso, so erhalten wir das Arbeitsvermögen als $30 \text{ kg} \times 400 \text{ cm} = 12\,000$ cmkg. Das Arbeitsvermögen ist also fast 500 mal so groß!

Welche Nutzanwendung läßt sich hieraus ziehen? Nehmen wir einmal ein Belastungsgewicht von 20 kg an, das jeder von den beiden Stäben bequem tragen kann, und stellen wir uns vor, daß dieses Gewicht nicht vorsichtig angehängt wird, sondern aus einer Höhe von 2 cm herunterfällt, ehe es auf den Haken am Ende des Stabes trifft. Dann hat das Gewicht vor dem Auftreffen eine gewisse Geschwindigkeit angenommen und besitzt ein Arbeitsvermögen Gewicht $\times$ Fallhöhe, also 20 kg $\times$ 2 cm = 40 cmkg. Beide Stäbe dehnen sich. Ehe der Glasstab sich nun um $^1/_2$ mm verlängert, hat er, wie wir oben sahen, erst eine Arbeit von 25 cmkg aufgenommen; die lebendige Kraft des fallenden Gewichtes ist somit noch nicht vernichtet, vielmehr sind noch 15 cmkg übrig. Das fallende Gewicht sucht daher den Glasstab weiter zu dehnen, und die Folge ist, daß er zerspringt. Ganz anders beim Gummistab. Die 40 cmkg machen gegenüber den 12000 cmkg, die der Stab an Arbeitsvermögen besitzt, gar nichts aus, der Stab gibt einfach elastisch nach, bis die Energie des fallenden Gewichtes vernichtet ist, und federt dann wieder zurück.

Das Ergebnis ist ja nicht überraschend. Wir wissen alle, daß das „spröde“ Glas gegenüber Schlag und Stoß keine Widerstandsfähigkeit hat. Der Vergleich erläutert aber in anschaulicher Weise die Verfahren, nach denen die Wissenschaft das Verhalten der Baustoffe erforscht und auf Grund deren sie Vorschriften darüber aufstellt, was für Eigenschaften die Baustoffe haben müssen. Es ist überraschend, daß hier wieder, wie so oft schon, die Messung der Arbeit als besonders bequemes Hilfsmittel auftritt.

Die Vernichtung der lebendigen Kraft des fallenden Gewichtes kann man sich recht anschaulich klar machen, wenn man an das Gummibändchen in Abb. 123 gleich von vornherein ein größeres Gewicht, z. B. 100 g, anhängt und die beiden Enden des Bändchens so festhält, daß das Band gerade gestreckt, aber noch nicht belastet und ausgedehnt ist. Läßt man das Gewicht jetzt plötzlich los, so hat das Band zunächst noch nicht die nötige Spannung, um das Gewicht zu halten, so daß dieses zu fallen beginnt. Ist das Band um 6 cm verlängert, so ist die Gegenspannung im Band auch 100 g, und das Gewicht würde also ruhig hängen bleiben, wenn man es hier festhielte. Tatsächlich hat es aber durch den Fall aus 6 cm Höhe eine gewisse lebendige Kraft erhalten, die noch nicht ganz aufgezehrt ist, und es fällt daher weiter, obwohl die Spannung des Gummibandes, also die Kraft, die das Gewicht am Fallen verhindern und nach oben ziehen will, größer ist, als das Gewicht selbst. Allmählich wird nun durch diese immer mehr wachsende Spannung die Fallenergie aufgezehrt, und das Gewicht kommt zur Ruhe —

allerdings nur einen Augenblick. Denn die stärkere Spannung des Gummibandes kommt jetzt zur Wirkung und zieht das Gewicht wieder in die Höhe, oder mit anderen Worten: die im Gummiband aufgespeicherte mechanische Arbeit wird frei und wird zum Heben des Gewichtes verwandt. Das Gewicht schwingt einige Male hin und her und kommt dann zur Ruhe, da schließlich die Arbeit durch die Reibung zwischen den kleinsten Teilchen des Gummibandes, die sich bei der Dehnung beständig gegeneinander verschieben, aufgezehrt wird.

Noch viel besser läßt sich der Vorgang verfolgen, wenn man statt des Gummibandes eine dünne Schraubenfeder aus Stahl nimmt. Die Arbeit wird hier nicht so schnell vernichtet, und das Gewicht schwingt viele Male auf und ab, bis es zur Ruhe kommt. Die Dämpfung der Schwingungen ist bei Stahl nicht so stark wie bei Gummi.

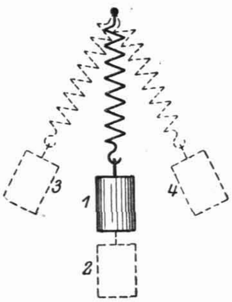

Abb. 125. Schwingungserscheinungen bei einer gewichtsbelasteten Feder.

Dabei läßt sich auch der folgende merkwürdige Vorgang beobachten, der sich aber nur bei einer ganz bestimmten Belastung einstellt, die bei jeder Feder erst ausprobiert werden muß. Zieht man bei dieser Belastung, wie in Abb. 125 angedeutet, das Gewicht nach unten in die Stellung 2 und läßt es dann los, so schwingt es zunächst lotrecht auf und ab. Sehr rasch aber stellen sich außerdem seitliche Schwingungen ein, in der Weise, daß die Feder mit dem Gewicht wie ein Pendel zwischen den Stellungen 3 und 4 hin- und herschwingt. Diese seitlichen Schwingungen werden immer stärker. Während ganz kurzer Zeit hören die senkrechten Schwingungen überhaupt auf, so daß die Feder mit dem daranhängenden Gewicht wie ein Pendel schwingt; sie beginnen dann aber wieder, nehmen zu und verdrängen endlich die seitlichen Schwingungen ganz. Dann wiederholt sich dasselbe Spiel von neuem. Diese Abwechslung zwischen den beiden Arten von Schwingungen beruht auf eigentümlichen physikalischen Vorgängen, die zu untersuchen hier zu weit führen würde, und die Erscheinung wird hier nur erwähnt, um zu zeigen, in wie verschiedenartiger Weise die einmal erzeugte Energie auftreten kann Ihre Größe ist immer dieselbe, ob sie nun als innere Energie der gespannten Feder, als Fallenergie des Gewichtes, als Geschwindigkeitsenergie bei der lotrechten Schwingung oder als Geschwindigkeitsenergie bei der seitlichen Pendelschwingung von Feder und Gewicht auftritt.