

kehrslast von  $300 \cdot 23 \cdot 0,5 t = 3450 t$  erforderlich wäre, die in der Form von bewegten Fahrzeugen überhaupt nicht unterzubringen ist. Erst die Erfahrung muß lehren, wie sich derartige weiche Hängebrücken aus Si-Stahl unter dem neuzeitlichen Straßenverkehr verhalten und bewähren. Bei Brückenmessungen sollten aber nicht nur Durchbiegungen und Verdrehungen unter den bewegten Lasten, sondern auch die Zeit beobachtet werden, in der sich diese Bewegungen vollziehen, also die Verformungsgeschwindigkeit, die für die Beurteilung der störenden und der zulässigen Formänderung, also des Sicherheitsgrades maßgebend sein wird. Ein Beispiel dafür, daß nicht die federnde, sondern die *bleibende Verformung* den Sicherheitsgrad und die zulässige Beanspruchung bestimmt, bildet der Lochleibungsdruck oder Stauchdruck der Niete. Vor drei Jahren<sup>1</sup> sprach ich die Befürchtung aus, daß bei einem Lochleibungsdruck  $\sigma_l$ , der das 2,5fache der zulässigen Stabspannung  $\sigma_{zul}$  beträgt, die Nietlöcher unrund werden könnten und eine vorzeitige Auswechslung der Niete und Schrauben nötig würde. Die daraufhin von der Reichsbahn 1926 und 1927 in den Versuchsanstalten Dresden, Karlsruhe und München durchgeführten Versuchsreihen haben erwiesen, daß diese Befürchtungen zunächst für alle Bolzen berechtigt sind, worüber Herr FINDEISEN nachher berichten wird. Sowohl bei zylindrischen, wie vor allem auch bei konischen Bolzen sollte mit  $\sigma_l = 1,5 \sigma_{zul}$  gerechnet werden, im Gegensatz zu unseren jetzigen Reichsbahnvorschriften. Bei den Nietten tritt infolge der „Klammerwirkung“ der Nietköpfe eine gewisse Einspannung des Nietschaftes ein, die eine höhere Beanspruchung als bei Bolzen rechtfertigt, also meines Erachtens etwa  $\sigma_l = 2,0 \sigma_{zul}$ . Erst nach Durchführung der in Stuttgart eingeleiteten Dauerversuche werden die hier aufgerollten bedeutsamen Fragen entschieden werden können.

Sieht man von derartigen wenigen Sonderfällen der Sicherheit gegen allzu große federnde oder bleibende Verformungen ab, so handelt es sich in der Regel um eine Beurteilung der Gefahr einer Überanstrengung, also um die Sicherheit gegen Überschreitung der Streckgrenze und gegen den Bruch der Bauteile.

## II. Der Zugversuch als Grundlage für den Sicherheitsgrad

### a) Der übliche Zugversuch

Ein Vergleich der Anstrengungen im Bauwerk einerseits und in Versuchsstücken andererseits wäre nur dann völlig einwandfrei durchzuführen, wenn der Spannungs- und Formänderungszustand bei beiden übereinstimmen würde. Versuche am Bauwerk haben den Nachteil, daß die Belastung wohl bis zur Nutzlast, nicht aber bis zum Bruch gesteigert werden kann. Modellversuche, bei denen man zwar den Spannungs- und Formänderungszustand nachzuahmen vermag, bringen wiederum die Schwierigkeit der Wahl des richtigen Umrechnungsmaßstabes. Bei der Prüfung einzelner Stäbe sind aber nicht nur die Einspannungs- oder Lagerungsverhältnisse anders, wie im Bauwerk, sondern meist auch die Abmessungen wesentlich kleiner. Völlig einwandfreie Grundlagen für die Beurteilung der Sicherheit können daher nur durch Bruchproben mit genauen Messungen an Bauwerken in natürlicher Größe geschaffen werden. Dieser Weg wird zur Zeit an einer Reihe elektrisch geschweißter Fachwerkträger beschritten, die nach einem Arbeitsplan des Deutschen Eisenbauverbandes im Dresdner Materialprüfungsamt bis zum Bruch belastet werden sollen. Da aber die Mannigfaltigkeit der Spannungs- und Formänderungszustände bei unseren Eisenbauten sehr groß ist und die Statik und Festigkeitslehre uns die Mittel

<sup>1</sup> Siehe W. GEHLER, Der Bauingenieur, 1926. S. 69. Die neuen Vorschriften für Eisenbauwerke der Reichsbahngesellschaft.

zur Umrechnung darbieten, begnügen wir uns in der Regel mit der Feststellung der wichtigsten Baustoffeigenschaften durch den *üblichen Zugversuch*, der den Ausgangspunkt unserer Sicherheitsbetrachtungen bildet. Da bei ihm ein einachsiger Spannungszustand nachgeahmt wird, hat er den Vorzug größter Einfachheit in Durchführung und Rechnung, so daß in unseren Stahlwerken täglich eine große Anzahl von Proben zerrissen und ausgewertet werden kann. Trägt man als Ordinaten  $y$  eines rechtwinkligen Systems die Laststufen  $P$  und als Abszissen  $x$  die dabei gemessenen Verlängerungen  $\Delta l$  des Probestabes von der Länge  $l$  auf, so erhält man die *Lastverlängerungslinie* ( $P - \Delta l$ -Linie).

Um eine Gesetzmäßigkeit zu finden, müssen hieraus die bezogenen Größen errechnet und als Ordinaten die Spannungen  $\sigma = P : F$  und als Abszissen die Dehnungen  $\delta = \Delta l : l$  aufgetragen werden, so daß sich als Ableitung die

*Spannungsdehnungslinie* ( $\sigma$ - $\delta$ -Linie) ergibt (s. Abb. 1). Diese allgemein übliche Darstellungsweise ist aber mit zwei Unzulänglichkeiten behaftet. Zunächst muß die Bruchspannung  $\sigma_B$  als ein fiktiver Wert bezeichnet werden, weil die Querdehnung vernachlässigt wird. Berücksichtigt man dagegen die Einschnürung des Stabes bei der Laststufe des Punktes  $B$  (s. Abb. 1), so ergibt sich z. B. als Ordinatengrößtwert  $\sigma_{B'} = 59 \text{ kg/qmm}$  anstatt  $\sigma_B = 50 \text{ kg/qmm}$  und kurz vor dem Bruche  $\sigma_{Z'} = 86,5 \text{ kg/qmm}$  (bei einer Quersamenzusammensetzung von 53,5 v. H.) anstatt  $\sigma_Z = 40 \text{ kg/qmm}$ . Der letzte Teil der Spannungsdehnungslinie zwischen Punkt  $B$

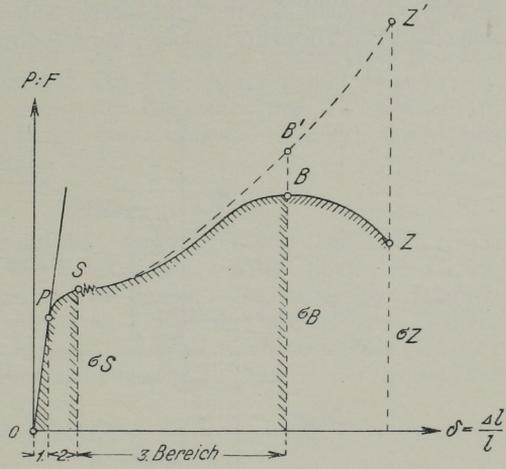


Abb. 1

und dem Endpunkt  $Z$  ist allerdings für uns ohne Bedeutung. Dagegen erfordert die Erhöhung der Bruchspannung  $\sigma_B$  um etwa 20 v. H. bei Berücksichtigung der Querdehnung doch eine beachtenswerte Berichtigung  $O P S B'$  der üblichen Spannungsdehnungslinie. Der Fehler besteht also darin, daß man die  $\sigma$ - $\delta$ -Linie aus der  $P - \Delta l$ -Linie einfach durch Maßstabsveränderung ableitet, indem man die Ordinaten  $P$  durch den ursprünglichen Stabquerschnitt teilt, also seine Veränderlichkeit vernachlässigt. Dieses Verfahren bietet dem Konstrukteur allerdings den Vorteil, die Stabkraft jeweils zu  $P = \sigma \cdot F$  aus der  $\sigma$ - $\delta$ -Linie zu ermitteln. Die zweite Unzulänglichkeit liegt in der Vernachlässigung der Versuchsgeschwindigkeit, also der Zeit  $T$ . Innerhalb der Elastizitätsgrenze ist sie zwar nahezu ohne Bedeutung, nicht aber jenseits derselben. Man kann sie nur dadurch ausschalten, daß man bei jeder Laststufe so lange wartet, bis sich ein Gleichgewichtszustand zwischen den äußeren und den inneren Kräften jeweils selbsttätig ausgebildet hat, bis also die Spiegel oder Zeiger des Meßgerätes zur Ruhe gekommen sind. Da dieser Zustand bestehen bleibt, auch wenn die Wartezeit länger, ja unendlich lang ausgedehnt würde, bildet die zugehörige Spannungsdehnungslinie, die wir *Gleichgewichtslinie* nennen wollen, den *einen Grenzfall*. Ihm steht der andere *Grenzfall des Stoß- oder Schlagversuches* gegenüber, bei dem die Versuchszeit  $T$  sehr klein, also nahezu gleich Null ist, bei dem also die Dehnung fast gar keine Zeit findet, sich auszuwirken. In dieser sogenannten *Stoßlinie* gehören dann zu den sehr kleinen Werten der

Bruchdehnung  $\delta_Z$  sehr hohe Werte der Bruchspannung  $\sigma_B$ . Zwischen diesen beiden Grenzlinien liegen die Linien der üblichen Zerreißversuche. Eine verhältnismäßig kleine unzulässige Steigerung der Versuchsgeschwindigkeit hat z. B. in einem Stahlwerk gegenüber unserem Materialprüfungsamt eine Erhöhung der Streckgrenze um 10 v. H. ergeben und zu anfänglichen Mißverständnissen geführt. Um eine bestimmte Spannungsdehnungslinie festzulegen, muß daher die Versuchsgeschwindigkeit genormt werden, z. B. 3 kg/qmm Spannungserhöhung in 3 Minuten, wobei sich eine Dauer eines Zerreiversuches von etwa einer halben Stunde, gegenüber 14 Stunden beim Gleichgewichtsversuch ergibt.

Das Hauptergebnis dieses üblichen Zugversuches ist die Festlegung der drei Grenzen oder Bereiche.

1. *Im Proportionalitätsbereich*, also innerhalb der HOOKEschen Geraden  $OP$  (s. Abb. 1) verhält sich der Probekörper nahezu vollkommen elastisch. Es empfiehlt sich, die Proportionalitätsgrenze, kurz  $P$ -Grenze genannt, zugleich als Elastizitäts-

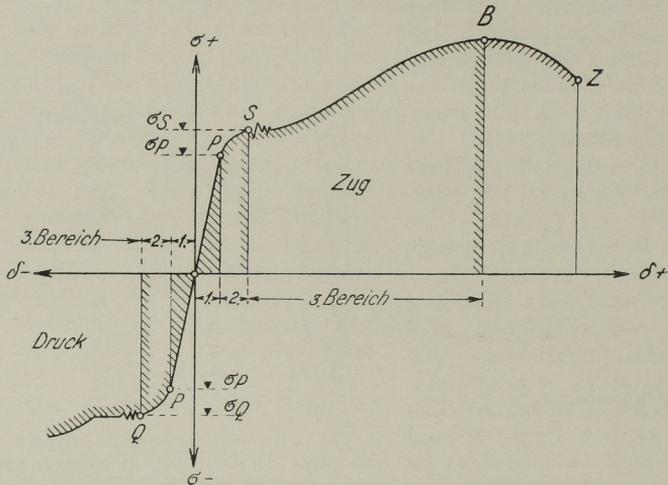


Abb. 2

grenze anzusehen. Dieser erste Bereich umfaßt die Laststufen, in denen sich der Konstrukteur bei seinen statischen Untersuchungen bewegt.

2. *Im plastischen Bereich* zwischen der  $P$ -Grenze und der Streckgrenze  $S$  treten starke bleibende Verformungen auf. Der Baustoff beginnt bei diesen Beanspruchungen plastisch oder bildsam zu werden. Bei der Kaltbearbeitung in der Werkstatt werden absichtlich derartige bleibende Verformungen hervorgerufen. Der plastische Bereich gleicht (im Gegensatz zu dem Tiefland des ersten Bereiches) der Höhenzone eines Berggelndes, in die der Mensch unter außergewöhnlicher Beanspruchung aufsteigen darf, ohne daß eine Gefahr auftritt. Der Erforschung dieses Bereiches galt die Arbeit des letzten Jahrzehntes (der sogenannten Plastiker unserer Wissenschaft).

3. *Im Verfestigungsbereich* zwischen der Streckgrenze  $S$  und der Bruchspannung oder Festigkeit  $B$  herrscht die bleibende Dehnung und die Verfestigung vor, die mit einer starken Gefügeänderung des Aufbaues der Kristallite verbunden ist. Für plötzliche sehr starke und gewaltsame Beanspruchungen bildet dieser Bereich eine wertvolle Reserve. (Er gleicht einer noch wenig erforschten Hochgebirgszone).

Diese drei Bereiche werden durch die Proportionalitäts- oder Elastizitätsgrenze  $P$ , durch die Fließ- oder Streckgrenze  $S$  und durch die Festigkeit oder Bruchspannung  $B$  begrenzt. Hiernach ergeben sich auch *drei verschiedene Arten von Sicherheit*, nämlich gegen *Überschreiten der Elastizitäts-, der Fließ- und der Bruchgrenze*.

Führt man den *Druckversuch* genau so wie den Zugversuch durch, und wertet ihn in gleicher Weise aus, so ergibt sich wiederum eine Spannungsdehnungslinie, die nach Abb. 2 in Bezug auf den Nullpunkt polarsymmetrisch zu der soeben betrachteten Linie im Zuggebiet ist. Der  $P$ -Grenze und Streckgrenze für Zug entspricht für Druck wiederum die  $P$ -Grenze und Fließgrenze, die hier Quetschgrenze  $Q$  genannt wird. Auch die entsprechenden Spannungen können mit praktisch hinreichender Genauigkeit jeweils als gleich groß angesehen werden. Nur fällt bei Druck der dritte Bereich jenseits der Quetschgrenze weg, mit deren Erreichung der Versuch als beendet gilt. Die in Abb. 2 nach dem Fließen noch einsetzende Verfestigungslinie kann beliebig weit fortgeführt und der Körper beliebig breit gedrückt werden, was hier aber ohne Bedeutung ist. Bei Druckkörpern gibt es somit nur zwei Arten von Sicherheit, nämlich gegen die Überschreitung der Elastizitäts- oder  $P$ -Grenze und der Quetschgrenze. Hierzu kommt noch als Sonderheit schlanker gedrückter Stäbe die Knicksicherheit (s. unter V.).

#### b) Der Gleichgewichtsversuch.

Eine einwandfreie, feste Bestimmung der Spannungen und Dehnungen an der Proportionalitäts-, der Streck- und der Bruchgrenze ist nur durch den Gleichgewichtsversuch, also für den einen Grenzfall der Spannungsdehnungslinie möglich, weil bei den übrigen, schneller durchgeführten Versuchen diese Grenzen beliebig nach oben zu verschoben werden können. Hierbei muß zwischen *federnder (elastischer) Dehnung*  $\varepsilon$  und *bleibender Dehnung*  $\eta$  unterschieden werden, so daß jeweils die Gesamtdehnung

$$\delta = \varepsilon + \eta. \quad (2)$$

ist. Beim Gleichgewichtsversuch wartet man bei jeder Laststufe so lange, bis sich der Gleichgewichtszustand zwischen den äußeren Kräften (Lasten) und den inneren Kräften (Spannungen) eingestellt hat, bestimmt sodann durch Entlasten die bleibende Dehnung  $\eta$  und findet endlich die federnde Dehnung nach Gleichung (2) als  $\varepsilon = \delta - \eta$ . Solche genaue Versuche an gedrückten Probekörpern im Dresdner Materialprüfungsamt führten zu folgenden Feststellungen (s. Abb. 3).

1. Im *Proportionalitätsbereich*  $OP$  zeigt sich schon bei sehr niedrigen Laststufen eine, wenn auch sehr kleine, bleibende Dehnung (s. Abb. 3a), die erst an der  $P$ -Grenze stark anwächst. Sowohl für St. 37 wie für St. 48 wurde diese bleibende Dehnung an der  $P$ -Grenze zu

$$\eta_P = \frac{1}{30} \text{‰} \cdot \quad (3)$$

festgestellt. An Stelle der HOOKEschen Geraden ergibt sich somit bei sehr genauen Messungen eine schwach gekrümmte Linie. Der Baustoff ist also auch in diesem Bereiche nicht vollkommen elastisch. Die Grenze der vollkommenen Elastizität muß somit in den  $O$ -Punkt verlegt werden. Vom Standpunkt unserer Nutzenwendung aus betrachtet, erscheint es aber ausreichend, die sehr kleinen Werte von  $\eta$  im ersten Bereich zu vernachlässigen und die Elastizitätsgrenze mit der  $P$ -Grenze zusammenfallen zu lassen, also dorthin zu verlegen, wo sich ein starkes Ansteigen der bleibenden Dehnungen deutlich feststellen läßt. Hiernach darf Gleichung (3) als die Begriffsfestsetzung sowohl der  $P$ -Grenze, als auch der Elastizitätsgrenze angesehen werden.

2. Im *plastischen Bereich PS* wachsen die bleibenden Dehnungen sehr stark an und erreichen nach unseren Versuchen an der Quetschgrenze oder Fließgrenze sowohl für St. 37, als auch für St. 48 den Wert

$$\eta_Q = \frac{2}{3} \text{‰} \dots \dots \dots (4)$$

Der elastische Anteil

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \dots \dots \dots (5)$$

der gesamten Dehnung  $\delta$  ist jeweils durch die Hooke'sche Gerade *OP* begrenzt, die wir auch über den Punkt *P* hinaus verlängert denken können (sogenanntes

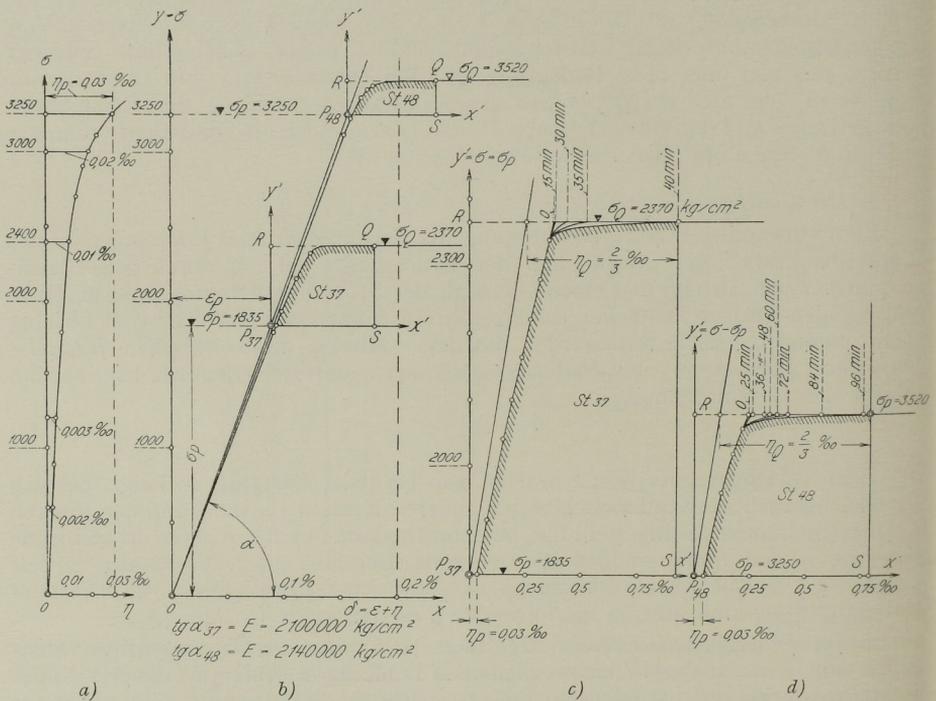


Abb. 3

BRIK'sches Gesetz)<sup>1</sup>. Der bleibende Anteil  $\eta$  der gesamten Dehnung ruft jeweils die Abweichung von dieser Geraden hervor, ist also durch die Krümmung der Spannungsdehnungslinie gekennzeichnet. Jede krumme  $\sigma$ - $\delta$ -Linie läßt somit auf bleibende Verformung schließen. In Abb. 3 c und d sind die  $\sigma$ - $\delta$ -Linien des plastischen Bereiches für die hier betrachteten beiden Baustoffe St. 37 und St. 48 nochmals aufgetragen, also die Funktion

$$\delta = \varepsilon + \eta = \frac{\sigma}{E} + f(\sigma - \sigma_P) \dots \dots \dots (6)$$

dargestellt, die als Formänderungsgesetz im plastischen Bereich neuerdings viel-

<sup>1</sup> Siehe J. E. BRIK, Fachwissenschaftliche Erörterung zu dem Bericht des Brückenmaterial-Komitees d. Oesterr. Ing.- und Arch.-Vereines (Zeitschrift dieses Vereines, 1891, S. 73).

fach erörtert wird.<sup>1</sup> Nach unseren Versuchen ergab sich gemäß Gleichung (6) für die Quetschgrenze

$$\left. \begin{array}{l} \text{bei St. 37 } \delta_Q = \varepsilon_Q + \eta_Q = 1,15 + 0,67 = 1,82\% \\ \text{bei St. 48 } \delta_Q = \varepsilon_Q + \eta_Q = 1,48 + 0,67 = 2,15\% \end{array} \right\} \dots \dots (7)$$

also im Mittel rund  $2\% = 0,2\%$ . (Bemerkt sei hier, daß die Fließgrenze vielfach im Versuchswesen durch die bleibende Dehnung:

$$\eta_S = \eta_Q = 0,2\% \dots \dots \dots (8)$$

definiert wird als sogenannte „0,2-Dehnungsgrenze“.)

3. Innerhalb des Proportionalitätsbereiches *OP* ist das *Elastizitätsmaß* mit hinreichender Genauigkeit für die Zwecke des Brückenbaues gleich groß anzunehmen und zwar zu

$$E = \sigma : \delta = \text{tg } \alpha = 2100 \text{ t/qcm} \dots \dots \dots (9)$$

Geometrisch wird dieser Wert durch die Neigung der Hooke'schen Geraden gegen die Dehnungsachse dargestellt. Für Si-Stahl wurde neuerdings von uns wiederholt  $E = 2160 \text{ t/qcm}$  ermittelt. Da aber nach unseren Versuchen eine Kaltbearbeitung und die damit verbundene Härtung diesen Wert auf  $2050 \text{ t/qcm}$  und noch tiefer herabdrücken kann, empfiehlt es sich, praktisch mit dem Mittelwert der Gleichung (9) zu rechnen. Außerhalb der *P*-Grenze, also im plastischen Bereiche, ist an Stelle von *E* der Wert

$$E_\sigma = \text{tg } \alpha_\sigma \dots \dots \dots (10)$$

als Neigung der Tangente an die Spannungsdehnungslinie einzuführen.

4. Je näher die *P*-Grenze beim Vergleich verschiedener Baustoffe an die Streckgrenze heranrückt, desto größer ist der Bereich, den der Konstrukteur mit Sicherheit rechnerisch ausnutzen kann, um so wertvoller ist uns also der Baustoff. Dieses Verhältnis ergab sich nach unseren Versuchen

$$\begin{array}{l} \text{für St. 37 zu } \sigma_P : \sigma_S = 0,79 \\ \text{„ St. 48 „ } \sigma_P : \sigma_S = 0,92. \end{array}$$

Unsere neuen Baustoffe bringen uns somit eine *Vergrößerung des Proportionalitäts- oder elastischen Bereiches* und damit unter gleichen Verhältnissen eine Erhöhung der Sicherheit gegen Überschreitung der Elastizitätsgrenze.

5. Andererseits darf aber die Streckgrenze nicht zu dicht an die Bruchspannung *B* heranrücken, weil sonst der sehr wertvolle *Verfestigungsbereich* stark zusammenschrumpft oder vollständig verloren geht. Für das Verhältnis  $\sigma_S : \sigma_B$  ergeben sich bei St. 37, St. 48 und St. Si die in Übersicht I (siehe unter IV) eingetragenen Werte. Erwünscht ist, daß dieses Verhältnis nicht nennenswert größer wird als 0,70. Durch diese Forderung wird den Möglichkeiten der Ausbildung der neuen Baustähle eine bestimmte Grenze gezogen.

Für diesen dritten Bereich liegen meines Wissens genauere Untersuchungen noch nicht vor. Aufgabe weiterer Forschung wird es sein müssen, die Gleichgewichtslinie sowohl für den Druckbereich, als auch für den Zugbereich festzustellen, insbesondere aber auch für den Si-Stahl, um weitere zahlenmäßig einwandfreie Angaben über Spannung und Dehnung an den drei Grenzpunkten und den entsprechenden Sicherheitsgrad zu erlangen.

### III. Der Biege- und Schlagversuch zur Beurteilung der Formänderungsfähigkeit

Auf dem Nachbargelände des Maschinenbaues ist in den letzten Jahren die Erkenntnis der Kerbzähigkeit sehr gefördert worden. Sie hat für diejenigen Ma-

<sup>1</sup> Siehe MARTIN GRÜNING, Die Tragfähigkeit statisch unbestimmter Tragwerke bei beliebig häufig wiederholter Belastung. Berlin, Verlag von Julius Springer, 1927. S. 2.