

fach erörtert wird.¹ 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 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.

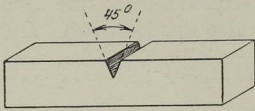
III. Der Biege- und Schlagversuch zur Beurteilung der Formänderungsfähigkeit

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

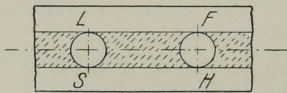
¹ Siehe MARTIN GRÜNING, Die Tragfähigkeit statisch unbestimmter Tragwerke bei beliebig häufig wiederholter Belastung. Berlin, Verlag von Julius Springer, 1927. S. 2.

schinenteile Bedeutung, bei denen durch Verletzung der Oberfläche, durch unstetige Querschnittsveränderungen oder durch gewaltsame Einwirkungen plötzlich Brüche herbeigeführt werden können, insbesondere durch Dauerbeanspruchungen bei Maschinen, Kraftfahrzeugen und Flugzeugen. Diese Untersuchungsergebnisse sind für den Brückenbau deshalb wichtig, weil der Biegeversuch über das Wesen unserer Baustoffe mancherlei Aufschlüsse gibt, die durch den üblichen Zugversuch allein nicht gebracht werden können. Beim Biegeversuch ist es nämlich möglich, drei Größen leicht zu verändern, und zwar die *Versuchsgeschwindigkeit* (von der ruhenden Belastung bis zum Stoß- und Schlagversuch mit dem Pendelschlagwerk), sodann die *Querdehnung* (die durch die Gestaltung der Kerbform zugelassen oder ausgeschaltet werden kann) und endlich die *Körpertemperatur* (sowohl Kältegrade, wie auch einige hundert Grade Erwärmung). Für den Eisenbau sind folgende Erkenntnisse von Bedeutung, die ich durch den Hinweis auf die *Poissonsche Zahl m* veranschaulichen möchte, die neben dem Elastizitätsmaß *E* den zweiten, bisher noch wenig beachteten Materialfestwert bildet.

1. Man unterscheidet zwischen *Trennungs-* und *Verfestigungsbruch*. Beim Trennungsbruch wird der Trennungswiderstand (Kohäsion in technischem Sinne) überwunden, beim Verfestigungsbruch der Verfestigungswiderstand. In einem Bruchquerschnitt von Kerbschlag- oder Scherproben lassen sich beide Brucharten durch das Aussehen des Gefüges genau unterscheiden. Der Verfestigungsbruch zeigt feinkörniges Gefüge, das durch den üblichen Zerreißversuch eines Stabes aus zähem Flußeisen wohl bekannt ist und bei dem die Kristallkörner nicht zu unterscheiden sind. Der Trennungsbruch dagegen hat ein mehr oder minder grob kristallines Aussehen, wobei die Korngröße vom inneren Gefügestand des Baustoffes bestimmt wird. Unter dem Mikroskop läßt sich erkennen, daß der Trennungsbruch entweder den Kristallgrenzen folgt oder die Kristalle spaltet, ohne sie zu verformen oder zu verfestigen.



a)



b)

Abb. 4

2. Beim *Trennungsbruch* vollzieht sich der Bruchvorgang plötzlich durch Überwindung des Trennungswiderstandes. Hierbei wird keine Formänderungsarbeit geleistet, weil keine meßbaren Dehnungswege zurückgelegt werden. Diese Bruchart kennzeichnet die sehr spröden Stoffe wie Glas und Porzellan, kann aber leider auch bei unserem Baustahl dann eintreten, wenn die Ausbildung der Querdehnung gehemmt wird. Versuchstechnisch kann man die Querdehnung im Kerbgrunde z. B. dadurch verhindern, daß man ihn nach Abb. 4 a in eine scharfe Dreieckspitze auslaufen läßt. Bezeichnet man die Querdehnung als einen Bruchteil der Längsdehnung, also

$$\delta_q = \frac{\delta}{m} \dots \dots \dots (II)$$

wobei *m* die sogenannte *POISSONSche Zahl* ist, so tritt hier der Trennungsbruch bei $\delta_q = 0$, also bei $m = \infty$ oder wenigstens bei einem sehr großen Wert von *m* ein. Unter *Kerbwirkung* versteht man allgemein den Einfluß einer Querschnittsveränderung des Stabes, durch den die Querdehnung mehr oder weniger behindert wird. Während beim ungekerbten Stabe (Abb. 5 a) das sich verformende Volumen¹ gleich dem Prisma vom Querschnitt *ABCD* ist, schrumpft es bei der Anordnung

¹ Siehe W. SCHWINNING und K. MATTHAES. Die Bedeutung der Kerbschlagprobe. Heft 78 des Deutschen Verbandes für die Materialprüfungen der Technik, S. 3.

des Kerbes nach Abb. 5 b auf das wesentlich kleinere Volumen vom Querschnitt *A B C D* zusammen. Für den Eisenbau ergibt sich die durch Versuche bestätigte Folgerung, daß in einem gelochten Blech auch bei sorgfältig gebohrten, nicht gestanzten Löchern ebenfalls eine Kerbwirkung eintritt. Das in Abb. 4 b zwischen den Linien *LF* und *SH* liegende Körpervolumen wird von der Verformung größtenteils ausgeschaltet. Durch Versuche ist erwiesen, daß z. B. beim Zugversuch von Si-Stahl die Bruchdehnung gelochter Bleche um ein Drittel kleiner ist, als bei entsprechenden ungelochten Blechen. Bei gelochten Blechen muß daher gegebenenfalls ein Trennungsbruch befürchtet werden, ebenso bei allen einspringenden Ecken ohne genügende Ausrundung, oder bei Einkerbungen an Bauteilen zur Festlegung von Meßpunkten.

3. Während der Trennungsbruch bei unseren Bauteilen möglichst vermieden werden muß, ist der *Verfestigungsbruch* anzustreben. Er kann sich je nach dem inneren Aufbau des Baustoffes entweder bei den plastischen Stoffen als *Formänderungsbruch* ausbilden oder bei den spröden Stoffen als *Gleitungsbruch*, wofür wiederum die Poissonsche Zahl *m* maßgebend ist. Beim Formänderungsbruch entsteht die stärkste Verfestigung. Er enthält also willkommene innere Reserven und die Möglichkeit großer Querdehnung. Dies drückt sich bei unserem Baustahl durch *m* = 3 bis 4 aus. Bei spröden Stoffen dagegen, wie Beton und Steinen, die durch den Gleitungsbruch gekennzeichnet werden, ist *m* größer, z. B. für Beton auf Grund der Dresdner Versuche bei Druck *m* = 6 und bei Zug *m* = 10 bis 12, so daß also die Querdehnungen wesentlich kleiner sind, wie bei den sogenannten plastischen Stoffen. Auch treten hier keine Fließfiguren oder mit bloßem Auge sichtbare Formänderungen und Einschnürungen auf. Beim Gleitungsbruch wird die im Körper aufgespeicherte potentielle Energie durch Ausbildung von Gleitflächen plötzlich entladen.¹

4. Für den Sicherheitsgrad der Baukörper ist der Betrag der *Formänderungsarbeit* maßgebend, den sie bis zum Bruch aufzunehmen vermögen. Diese Fähigkeit, sie aufzuspeichern, wird auch als *Formänderungsfähigkeit* oder *Zähigkeit* bezeichnet. Je größer beim Zugversuch (Abb. 1) die Längsdehnung und damit auch die Querdehnung ist, je länger sich also die Spannungsdehnungslinie wagrecht erstreckt, um so größer ist dieser Wert. Zahlenmäßig wird er durch die von der Spannungsdehnungslinie und die Dehnungsachse eingeschlossenen Fläche, also durch

$$A = \int \sigma \cdot d \delta \dots \dots \dots (12)$$

ausgedrückt, also in $\text{kg} \cdot \text{cm} : \text{ccm} = \text{kg}/\text{qcm}$ und heißt auch *bezogene Formänderungsarbeit*, weil er die in der Raumeinheit, z. B. einem Kubikzentimeter, aufgespeicherte Arbeit oder Energie darstellt, die auch kurz als *Ladung* bezeichnet wird. Der Form-

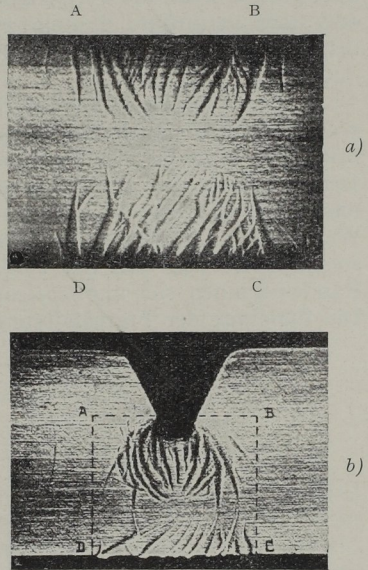


Abb. 5.

¹ W. GEHLER, Die Würfel Festigkeit und Säulenfestigkeit als Grundlage der Betonprüfung und die Sicherheit von Beton- und Eisenbetonbauten (Der Bauingenieur, 1928, Heft 2 bis 4).

änderungsbruch der plastischen Stoffe bringt den größten Wert von A , an zweiter Stelle steht der Gleitungsbruch der spröden Stoffe und am niedrigsten der Trennungsbruch entsprechend den Werten $m = 3$ bis 4 , $m = 6$ bis 12 und $m = \infty$. Erwähnt sei noch, daß der Trennungsbruch auch nach einer gewissen Verfestigung des Baustoffes auftreten kann, und zwar dann, wenn der Trennungswiderstand einmal kleiner als der Verfestigungswiderstand wird, wenn also dieser stark ansteigt oder kurz gesagt, wenn die Verfestigung sehr groß wird. Für den Eisenbau folgt daraus, daß stark verfestigte Bauteile zu dem gefährlichen Trennungsbruch neigen, z. B. bei *Kaltbearbeitung* oder bei *Selbsthärtung durch Überschreiten der Streckgrenze* (siehe unter VI).

5. Den *Verfestigungsvorgang* kann man sich hiernach und auf Grund der metallographischen Untersuchungen folgendermaßen denken. Bei Erreichung der *Streckgrenze* bricht das ursprüngliche Gerippe des inneren Aufbaues des Baustahles zusammen. Der zuerst an der Streckgrenze erreichte Spannungswert σ_S fällt stark ab, bei unseren Baustählen etwa um 5 bis 10% (Der dabei vorübergehend erreichte niedrigste Wert von σ im Bereich des Streckens wird neuerdings auch *untere Streckgrenze* genannt.) Bei der weiteren Verformung bilden sich *Gleitflächen*, die am äußeren Rande beginnen, sich in *Fließfiguren* daselbst äußern und nach innen zu fortschreiten. Die Zunahme der Formänderungsarbeit A (Gleichung 12) entsteht dadurch, daß

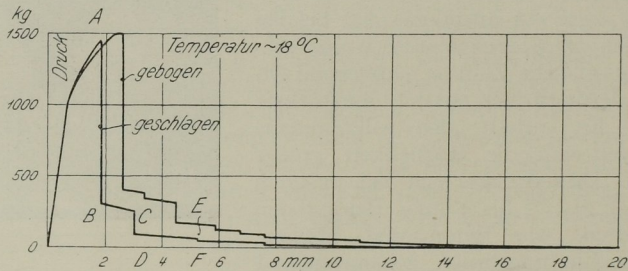


Abb. 6 a

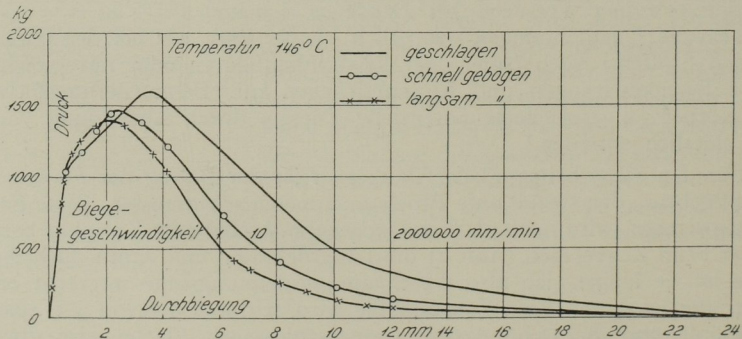


Abb. 6 b

sich die Kristalle auf diesen Gleitflächen verschieben (starke Zunahme der Dehnung δ), während sich die Kristallkörner gleichzeitig bis zu einem Höchstmaße fortschreitend verfestigen (Zunahme der Spannung σ). Ist endlich die Formänderungsfähigkeit der einzelnen Kristallite durch Abschieben in den Gleitflächen erschöpft, so tritt der Verfestigungsbruch ein.

6. Als Beispiele verschiedener Bruchformen sind in Abb. 6 a bis 6 c die Er-

gebnisse der Versuche von Professor Dr. SCHWINNING-Dresden mit Biegeproben wiedergegeben.¹ Zunächst wurden bei 18° Probestäbe von 20 . 20 . 180 ccm mit sogenannte Normalspitzkerb von 8 mm Tiefe sowohl langsam gebogen, wie auch geschlagen, wobei die Durchbiegung *f* mit einem besonderen optischen Instrument gemessen wurde. Die lotrechten Strecken *AB*, *CD* und *EF* der Kraft-Durchbiegungslinie (Abb. 6 a) kennzeichnen den sich in den einzelnen Zeitabschnitten vollziehenden Trennungsbruch, bei dem keine meßbare Durchbiegung auftritt, also auch keine Formänderungsarbeit *A* geleistet wird. Die dazwischen liegenden nahezu wagrechten Strecken *BC* und *DE* entsprechen den Zeitabschnitten, in denen der Tren-

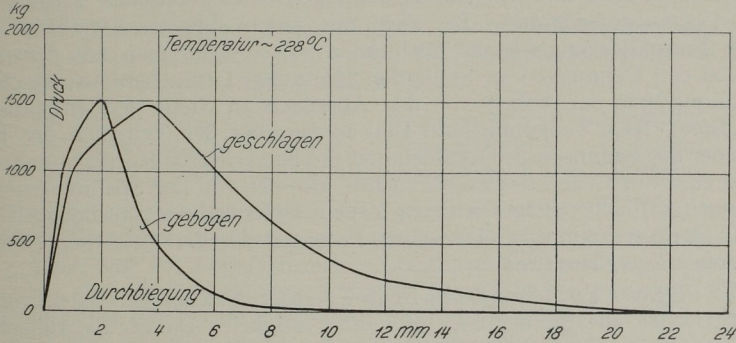


Abb. 6 c

nungswiderstand jeweils größer als der Verfestigungswiderstand geworden ist und sich jeweils ein Verfestigungsbruch mit Gleitverschiebungen ausbildete. Die Bruchflächen der Proben ließen deutlich die Verschiedenheit des Gefüges beider Brucharten in der gleichen Zeitfolge erkennen. Die Streifen des feinkörnigen Verfestigungsbruches erschienen feinkörnig, die des Trennungsbruches grob kristallinisch. Die Abb. 6 b und 6 c entsprechen den gleichen Versuchen bei 146° und 228°. Die Biegeschwindigkeiten der drei Proben der Abb. 6 b betragen 1 mm/Min., 10 mm/Min. und 200000 mm/Min. Bei 18° (Abb. 6 a) ist die von der Kraft-Durchbiegungslinie eingeschlossene Fläche, also die Arbeit bei dem langsam gebogenen Probestab um 69 v. H. größer als bei dem geschlagenen. (Bei den höheren Temperaturen der Abb. 6 b und 6 c ist dieses Verhältnis bezeichnenderweise umgekehrt.)

Der Biegeversuch läßt die *Bedeutung des Formänderungsvermögens* klar erkennen, die durch den Wert *A* nach Gleichung (12) zu messen ist. Je kleiner durch etwaige nachteilige Formgebung insbesondere starker *Querschnittsveränderungen* (siehe Abb. 5 b) das verformbare Körpervolumen *A B C D* wird, um so größer muß die Ladung *A* mit potentieller Energie sein, die bei einer gegebenen Menge der gesamten Energie auf die Raumeinheit entfällt, um so früher muß also die *Ladungsgrenze* oder der Bruch erreicht werden. Je nach der Gefügeart ist diese *Ladungsgrenze* bei unseren Baustählen verschieden. Sie beträgt nach den Dresdner Versuchen, aus der Spannungsdehnungslinie ermittelt, für die Bruchspannung σ_B

$$\left. \begin{array}{l} \text{bei St. 37 } A_B = 490 \text{ bis } 860, \text{ i. M. } 675 \text{ kg/qcm} \\ \text{,, St. 48 } A_B = 760 \text{ kg/qcm} \\ \text{,, St. Si } A_B = 910 \text{ bis } 940, \text{ i. M. } 925 \text{ kg/qcm} \end{array} \right\} \dots \dots \dots (13)$$

woraus die Überlegenheit des Siliciumstahles um etwa 14% gegenüber St. 37 hervorgeht (siehe auch unter IV, 3).

¹ Siehe Fußnote ¹ auf S. 224.