

Wird dagegen wie bei der Verdrehung  $\sigma_x = -\sigma_y$ , so ergibt sich nach Gleichung (16)

$$A = \frac{1}{2E} \left( \sigma_x^2 + \sigma_x^2 + \frac{6}{10} \sigma_x^2 \right) = 2,6 \cdot \frac{\sigma_x^2}{2E}$$

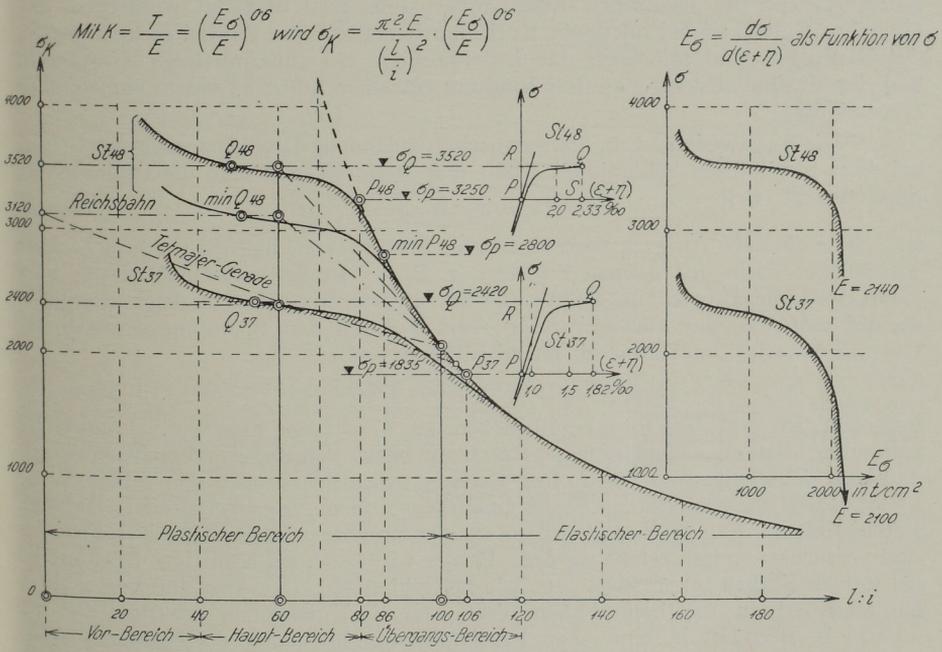
so daß der Sicherheitsgrad auf

$$\nu = 8,3 : 2,6 = 3,2$$

herabsinkt. Damit ergibt sich der Übergang zu den neueren Untersuchungen der Plastizitätslehre von GIRTLEK, v. MISES und SCHLEICHER, bei denen es sich hauptsächlich um die Formulierung der Bedingung für das Fließen, der sogenannten Plastizitätsbedingung handelt.<sup>1</sup>

### V. Der Sicherheitsgrad beim Knicken

1. Die  $\sigma_K$ - $\lambda$ -Linie. Ist  $P_K$  die Knicklast eines gedrückten Stabes von der Länge  $l$ ,  $F$  der Querschnitt und  $i$  der Trägertshalbmesser, so ist die sogenannte Knick-



spannung  $\sigma_K = P_K : F$  und der Schlankheitsgrad  $\lambda = l : i$ . Im Proportionalitäts- oder elastischen Bereich (siehe Abb. 1) gilt dann für mittigen Kraftangriff bekanntlich die EULER-Gleichung:

$$P_K = \frac{\pi^2 E J}{l^2} \text{ oder } \sigma_K = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \dots \dots \dots (18)$$

und im plastischen Bereich (siehe Abb. 1) nach Engesser und von Karman die

<sup>1</sup> W. GEHLER, Kapitel Festigkeitslehre im Taschenbuch f. Bauingenieure. 5. Aufl., Verlag von Julius Springer, Berlin, S. 250.

sogenannte natürliche Knicklinie

$$\sigma_K = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} \cdot K \text{ mit } K = \left(\frac{E_\sigma}{E}\right) \cdot \frac{J_1}{J} + \frac{J_2}{J} \dots \dots \dots (19)$$

wofür nach dem Vorschlag des Verfassers<sup>1</sup> für den Eisenbau hinreichend genau  $K = (E_\sigma : E)^{0,6}$  gesetzt werden kann, so daß man

$$\sigma_K = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} \cdot \left(\frac{E_\sigma}{E}\right)^{0,6} \dots \dots \dots (20)$$

erhält. Sobald man aus der Spannungsdehnungslinie nach Gleichung (10) für den plastischen Bereich  $E_\sigma$  bestimmt hat, kann man die  $\sigma_K$ - $\lambda$ -Linie sowohl für  $\lambda \leq 100$  nach Gleichung (20), als auch im elastischen Bereich für  $\lambda > 100$  nach Gleichung (18) berechnen und in Abb. 7 auftragen, was daselbst für einen Baustahl mit  $\min \sigma_B = 37, 48$  und  $54 \text{ kg/qcm}$  geschehen ist. Außerdem ist die TETMAYER-Gerade und die als Ausgleichende anzusehende  $\sigma_K$ - $\lambda$ -Linie der Reichsbahn eingezeichnet worden.

Diese auf Grund unserer Dresdner Versuche tatsächlich aus der Spannungsdehnungslinie (Abb. 1) abgeleitet  $\sigma_K$ - $\lambda$ -Linie ist uns durch die umfangreichen Knickversuche des Deutschen Eisenbauverbandes voll bestätigt worden, so daß über ihre Gültigkeit bei mittigem Kraftangriff heute keine Zweifel mehr bestehen. Offene Fragen sind nur noch das Knickproblem bei außermittigem Kraftangriff und der Einfluß der sogenannten Bindung einzelner Stäbe zu einem einheitlichen Querschnitt.

2. Die  $\sigma_{\text{azul}}$ - $\lambda$ -Linie, d. h. die rechnerisch zulässigen Druckspannungswerte  $\sigma_{\text{azul}}$  bei einer bestimmten Schlankheit erhält man dadurch, daß man die Ordinaten  $\sigma_K$  durch  $\nu$  teilt, weil

$$\nu = \sigma_K : \sigma_{\text{azul}} \dots \dots \dots (21)$$

ist. Diese einfache Aufgabe wird nur dadurch verwickelt, daß man sich nicht dazu entschließen kann, für  $\nu$  einen Festwert, z. B. 3 oder 2,5 zu wählen. Dann wäre die  $\sigma_{\text{azul}}$ - $\lambda$ -Linie affin zur  $\sigma_K$ - $\lambda$ -Linie und ihre Erörterung gegenstandslos. Hiergegen wendet man ein, daß für  $\lambda = 0$  der Wert  $\nu$  durch den Spannungsmaßstab des Quetschversuches, und zwar im Hochbau bereits zu

$$\nu_0 = \sigma_S : \sigma_{\text{zul}} = 2400 : 1200 = 2,0$$

festgelegt ist und bei Eisenbahnbrücken zu  $\nu_0 = 2400 : 1400 = 1,7$ . Andererseits behauptet man, ohne hierfür meines Erachtens bisher den Beweis erbracht zu haben, daß die Sicherheit  $\nu$  im elastischen Bereich wesentlich größer sein müsse, z. B.  $\nu = 3,5$ , weil die schlankeren Stäbe gefährlicher seien. Aber gerade der elastische Bereich mit der EULER-Hyperbel kann meines Erachtens am schärfsten rechnerisch und versuchstechnisch erfaßt werden. Ferner wirkt sich außermittiger Kraftangriff bei kurzen Stäben ungünstiger aus, wie bei schlanken. Der Anschluß von  $\nu$  an  $\nu_0$  hat aber deshalb nur theoretischen Wert, weil die Knickgefahr praktisch erst bei  $\lambda = 40$  in Betracht kommt. *Zur Vereinfachung wäre daher die Festlegung eines festen Sicherheitsgrades z. B.  $\nu = 2,5$  und eine besondere scharfe Erfassung des Einflusses außermittigen Kraftangriffes zu empfehlen.*

Eine weitere Herabsetzung von  $\nu$  ist deshalb nicht ratsam, weil der Knickvorgang ein *Stabilitätsproblem* ist. Sobald eine gewisse Ladung der Raumeinheit eines Stabes von bestimmter Schlankheit erreicht ist, knickt er *plötzlich* aus. Die äußerst wertvolle Reserve des dritten Bereiches, des Verfestigungsbereiches (siehe Abb. 2) fällt hier fort. Deshalb muß hier  $\nu$  größer als bei gezogenen Stäben sein. Auch müssen durch diesen Sicherheitsgrad alle Nebeneinflüsse gedeckt werden,

<sup>1</sup> W. GEHLER, Die Spannungsdehnungslinie im plastischen Druckbereich und die Knickspannungslinie. Verhandlungen des 2. Internationalen Kongresses für techn. Mechanik. Zürich 1926. Verlag von Orell Füssli, Zürich.

die in einer Ungenauigkeit des Querschnittes, der Ausführung und der unsicheren Erfassung der Lasten und der Stoßzuschläge bestehen können.

## VI. Der Sicherheitsgrad bei häufig wechselnden Belastungen

1. Sobald die Lasten ihre Größen wechseln, also nicht ständig bis zum Bruche zunehmen, ist es unerlässlich notwendig, den *Einfluß der Zeit T* zu berücksichtigen. Von unseren Brückenmeßgeräten wird er bekanntlich als *Zeitdehnungslinie* ( $T$ - $\delta$ -Linie) aufgezeichnet, aus der, solange  $\sigma < \sigma_P$  ist, die *Zeitspannungslinie* ( $T$ - $\sigma$ -Linie) durch Maßstabsveränderung hervorgeht, weil  $\sigma = E \cdot \delta$  ist. In Abb. 8 ist nach

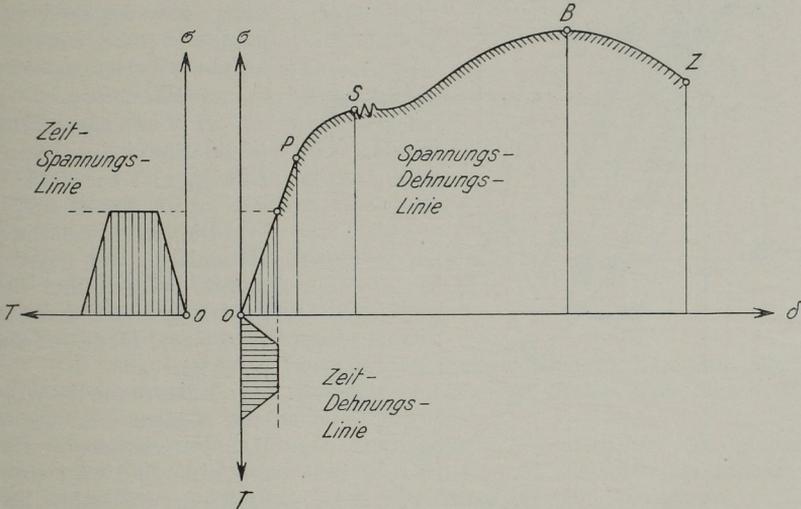


Abb. 8

Vorschlag des Verfassers außer der Spannungsdehnungslinie ( $\sigma$ - $\delta$ -Linie) als Aufriß auch noch die von den Meßgeräten aufgezeichnete Zeitdehnungslinie ( $T$ - $\delta$ -Linie) als Grundriß und die Zeitspannungslinie ( $T$ - $\sigma$ -Linie) als Seitenriß dargestellt. Man denke sich bei einem Versuche den Zugstab in der Zerreißmaschine bis zu einer Laststufe von etwa  $\frac{2}{3}\sigma_P$  belastet. Dann stellen die lotrecht und wagrecht schraffierten Flächen die drei Projektionen der von der Zeit-Spannungs-Dehnungslinie begrenzten Flächen dar. Damit erhalten wir die *räumliche Darstellung einer Zeit-Spannungs-Dehnungslinie* in drei Projektionen mit den Achsen  $T$ ,  $\sigma$  und  $\delta$ . Sie bietet den Vorteil, auch verwickelte dynamische Versuchsvorgänge durch das Bild der Zeichnung zu veranschaulichen. Als Beispiel hierfür diene Abb. 9, die den sogenannten ersten BAUSCHINGERSCHEN Satz darstellt. Dieser Satz lautet:

„Die Elastizitätsgrenze (die übrigens auch BAUSCHINGER mit der  $P$ -Grenze zusammenfallen läßt) wird durch eine Beanspruchung  $\sigma > \sigma_S$  herabgeworfen, oft bis auf Null, so daß die Probestücke, wenn sie unmittelbar nach dem Strecken und Entlasten wieder gemessen werden, gar keine oder eine bedeutend niedrigere Elastizitätsgrenze haben. In der Zeit der Ruhe aber, die nach der auf das Strecken vorgenommenen Entlastung verstreicht, hebt sich auch die Elastizitätsgrenze wieder, erreicht nach mehreren Tagen die Belastung, mit welcher gestreckt wurde und wird nach genügend langer Zeit, sicher nach mehreren Jahren, selbst über diese Belastung hinaus gehoben.“

Dieser verwickelte Versuchsvorgang läßt sich durch die  $\sigma$ - $\delta$ -Linie der Abb. 9 a und die  $T$ - $\delta$ -Linie der Abb. 9 b veranschaulichen.

a) *Erstmaliges Belasten.* Versuchsbeginn Punkt 1, im Punkt 2 wird  $\eta_P = 1/300/00$