

Beitrag zur Plastizitätstheorie

Autor(en): **Stüssi, F.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE publications = Mémoires AIPC = IVBH Abhandlungen**

Band (Jahr): **13 (1953)**

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-13208>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Beitrag zur Plastizitätstheorie

Contribution to the theory of plasticity

Contribution à la théorie de plasticité

Prof. Dr. F. STÜSSI, ETH, Zürich, Präsident der I. V. B. H.

1. Die drei Formen der Gestaltänderungshypothese

Die schon von J. C. MAXWELL im Jahre 1856 erstmals aufgestellte und heute mit den Namen HUBER-v. MISES-HENCKY verknüpfte Fließbedingung für isotrope, zähe Baustoffe sagt aus, daß die spezifische Gestaltänderungsarbeit A_g an der Fließgrenze eine Materialkonstante sei. Diese Hypothese sei zunächst kurz rekapituliert, wobei das betrachtete würfelförmige Körperelement auf die Hauptspannungsrichtungen 1, 2, 3 orientiert sein soll. Wir denken uns den Spannungszustand $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ aufgeteilt in den *hydrostatischen Spannungszustand* σ_m ,

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3},$$

der nur eine Volumenänderung bei gleichbleibender Gestalt erzeugt, und den *Gestaltänderungs-Spannungszustand*

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_1 - \sigma_m, \quad \bar{\sigma}_2 = \sigma_2 - \sigma_m, \quad \bar{\sigma}_3 = \sigma_3 - \sigma_m,$$

der nur eine Gestaltänderung bei gleichbleibendem Volumen verursacht.

Die *Hypothese von der Konstanz der Gestaltänderungsarbeit* sagt nun aus, daß für das Eintreten des Fließzustandes nur die spezifische Gestaltänderungsarbeit A_g ,

$$\underline{A_g = \frac{1}{2} \cdot (\bar{\sigma}_1 \cdot \epsilon_1 + \bar{\sigma}_2 \cdot \epsilon_2 + \bar{\sigma}_3 \cdot \epsilon_3)}, \quad (1)$$

maßgebend sei; dabei bedeuten $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ die durch die Hauptspannungen $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ verursachten spezifischen Dehnungen in den drei Hauptspannungsrichtungen.

$$\underline{\sigma_g^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_2 \cdot \sigma_3 - \sigma_3 \cdot \sigma_1.} \quad (3)$$

Wie leicht nachzuweisen ist, gilt für die Vergleichsspannung σ_g auch die Beziehung

$$\underline{\sigma_g^2 = \frac{3}{2} \cdot (\bar{\sigma}_1^2 + \bar{\sigma}_2^2 + \bar{\sigma}_3^2).} \quad (3a)$$

Fließen tritt immer dann ein, wenn die Vergleichsspannung σ_g den Wert der Fließspannung σ_F im einachsigen Zugversuch erreicht; die *Fließbedingung* lautet somit

$$\underline{\sigma_g = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot \tau_0 = \sigma_F.} \quad (4)$$

Auf ähnliche Weise läßt sich aus einer geometrischen Betrachtung in bezug auf die Oktaederebene eine spezifische Dehnung

$$\epsilon_0 = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3}{3} = \epsilon_m$$

und eine *resultierende spezifische Schiebung*

$$\underline{\gamma_0 = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2 - \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 - \epsilon_2 \cdot \epsilon_3 - \epsilon_3 \cdot \epsilon_1} = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{3} \cdot \epsilon_g} \quad (5)$$

bzw.

$$\underline{\gamma_0 = \frac{4}{3} \cdot \sqrt{\left(\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_2 - \epsilon_3}{2}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_3 - \epsilon_1}{2}\right)^2} = \frac{2}{3} \sqrt{\gamma_{12}^2 + \gamma_{23}^2 + \gamma_{31}^2}} \quad (5a)$$

bestimmen.

Setzen wir nun die spezifischen Dehnungen $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ nach dem *Hookeschen Gesetz*

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{1}{E} \cdot (\sigma_1 - \nu \cdot (\sigma_2 + \sigma_3)), \\ \epsilon_2 &= \frac{1}{E} \cdot (\sigma_2 - \nu \cdot (\sigma_3 + \sigma_1)), \\ \epsilon_3 &= \frac{1}{E} \cdot (\sigma_3 - \nu \cdot (\sigma_1 + \sigma_2)) \end{aligned}$$

in die Gleichungen (1) bzw. (5) ein, so erhalten wir für die spezifische Gestaltungsänderungsarbeit A_g den Wert

$$\underline{A_g = \frac{1+\nu}{3E} \cdot (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_2 \cdot \sigma_3 - \sigma_3 \cdot \sigma_1) = \frac{1+\nu}{3E} \cdot \sigma_g^2,} \quad (6)$$

während sich die resultierende Schiebung γ_0 mit

$$\underline{\epsilon_g = \frac{1+\nu}{E} \cdot \sigma_g} \quad (7)$$

zu

$$\underline{\gamma_0 = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{3} \cdot \frac{1+\nu}{E} \cdot \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_2 \cdot \sigma_3 - \sigma_3 \cdot \sigma_1} = \frac{2(1+\nu)}{E} \cdot \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sigma_g} \quad (8)$$

ergibt. Ferner bestehen die Zusammenhänge

$$\gamma_0 = \frac{2(1+\nu)}{E} \cdot \tau_0 = \frac{\tau_0}{G} \quad (9)$$

und

$$A_g = \frac{\sigma_g \cdot \epsilon_g}{3} \quad (10)$$

Vergleichen wir die Werte A_g und γ_0 nach den Gleichungen (6) und (8) mit den entsprechenden Werten für den einachsigen Spannungszustand $\sigma_1 = \sigma_g$, so erhalten wir wieder den gleichen Wert der Vergleichsspannung σ_g , den uns auch die resultierende Schubspannung τ_0 in Gleichung (3) geliefert hatte.

Die Vergleichsspannung σ_g als Maß der Anstrengung hat somit eine dreifache Bedeutung; sie kann der Ausdruck einer eigentlichen Anstrengungshypothese (τ_0), einer Formänderungshypothese (γ_0) oder auch einer Hypothese über die Gestaltänderungsarbeit A_g darstellen. Welche dieser drei Deutungen physikalisch maßgebend oder ursächlich ist, läßt sich zunächst nicht eindeutig entscheiden.

Es erscheint ferner nicht richtig, die Fließbedingung Gleichung (4) als eine Folge der Hypothese von der Konstanz der Gestaltänderungsarbeit zu bezeichnen, da die Vergleichsspannung σ_g aus der Gestaltänderungsarbeit ja mit Hilfe des Hookeschen Gesetzes berechnet wird, das für den Fließzustand und auch für den Beginn des Fließens nicht mehr gültig ist.

Die dreifache Bedeutung der Vergleichsspannung, wie sie hier in der heute üblichen Form skizziert wurde, ist nur eine Folge davon, daß der Zusammenhang zwischen Spannungen und Dehnungen nach dem Hookeschen Gesetz, also für den elastischen Bereich eingeführt wird. Dies bedeutet offensichtlich von vorneherein eine Einschränkung des Gültigkeitsbereichs der drei Hypothesen. Es darf erwartet werden, daß die drei Hypothesen an sich eine über den elastischen Bereich hinausgehende Gültigkeit besitzen und dann aber auch verschiedene Aussagen enthalten. Im nächsten Abschnitt wird versucht, auf Grund dieser Überlegungen eine Plastizitätstheorie für isotrope Baustoffe aufzustellen.

2. Die Plastizitätstheorie isotroper Baustoffe

Eine Plastizitätstheorie hat die Aufgabe, die spezifischen Formänderungen unter beliebigen Beanspruchungszuständen anzugeben; liegen die Beanspruchungen im elastischen Bereich, so geht die Plastizitätstheorie in das Hookesche Gesetz über. An Stelle der Elastizitätskonstanten des Hookeschen Gesetzes treten in der Plastizitätstheorie die aus einachsigen Zug- oder Druckversuchen zu bestimmenden Spannungsdehnungsdiagramme.

Wir gehen nun davon aus, daß wir die Gültigkeit der Schubspannungshypothese voraussetzen; alle Beanspruchungszustände, die die gleiche resultierende Schubspannung τ_0 in der Oktaederebene, oder, was auf dasselbe

herauskommt, die gleiche Vergleichsspannung σ_g verursachen, sollen in bezug auf das Formänderungsvermögen *gleichwertig* sein. Ist das betrachtete Körperelement nicht auf die Hauptspannungsrichtungen, sondern auf ein beliebiges rechtwinkliges Koordinatensystem orientiert, so gilt statt Gleichung (3) die verallgemeinerte Beziehung

$$\underline{\sigma_g^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y - \sigma_y \cdot \sigma_z - \sigma_z \cdot \sigma_x + 3\tau_{xy}^2 + 3\tau_{yz}^2 + 3\tau_{zx}^2.} \quad (3b)$$

Die Auswertung von Versuchsergebnissen legt nun die Folgerung nahe, daß die spezifischen Formänderungen infolge eines Spannungszustandes $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ lineare Kombinationen der in einem einachsigen Zugversuch mit gleichwertiger Beanspruchung gefundenen spezifischen Dehnungen sind. Bezeichnen wir die im einachsigen Zugversuch $\sigma_1 = \sigma_{10}, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ gefundenen spezifischen Dehnungen mit $\epsilon_{11}, \epsilon_{21}, \epsilon_{31}$ (und analog für $\sigma_2 = \sigma_{20}, \sigma_3 = \sigma_{30}$), so betragen mit

$$\sigma_g^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_2 \cdot \sigma_3 - \sigma_3 \cdot \sigma_1$$

und mit

$$\mu_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_g}, \quad \mu_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_g}, \quad \mu_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_g}$$

für die Beanspruchungen

$$\underline{\sigma_1 = \mu_1 \cdot \sigma_{10}, \quad \sigma_2 = \mu_2 \cdot \sigma_{20}, \quad \sigma_3 = \mu_3 \cdot \sigma_{30}} \quad (11)$$

die zugehörigen Dehnungen, in allgemeiner Form angeschrieben,

$$\left. \begin{array}{l} \epsilon_1 = \mu_1 \cdot \epsilon_{11} + \mu_2 \cdot \epsilon_{12} + \mu_3 \cdot \epsilon_{13}, \\ \epsilon_2 = \mu_1 \cdot \epsilon_{21} + \mu_2 \cdot \epsilon_{22} + \mu_3 \cdot \epsilon_{23}, \\ \epsilon_3 = \mu_1 \cdot \epsilon_{31} + \mu_2 \cdot \epsilon_{32} + \mu_3 \cdot \epsilon_{33}. \end{array} \right\} \quad (12)$$

Wenn dieser Ansatz richtig sein soll, so muß er einerseits für den elastischen Bereich in das Hookesche Gesetz übergehen und andererseits die Hypothese der konstanten Gestaltänderungsarbeit (in ihrem Gültigkeitsbereich) erfüllen.

Im *elastischen Bereich* ist mit $\sigma_{10} = \sigma_{20} = \sigma_{30}$

$$\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \epsilon_{33} = \frac{\sigma_{10}}{E},$$

$$\epsilon_{12} = \epsilon_{23} = \epsilon_{31} = \epsilon_{13} = \epsilon_{32} = \epsilon_{21} = - \frac{\nu \cdot \sigma_{10}}{E}$$

und Gleichung (12) wird mit

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_1 - \nu \cdot (\sigma_2 + \sigma_3)),$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_2 - \nu \cdot (\sigma_3 + \sigma_1)),$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_3 - \nu \cdot (\sigma_1 + \sigma_2))$$

zum Hookeschen Gesetz.

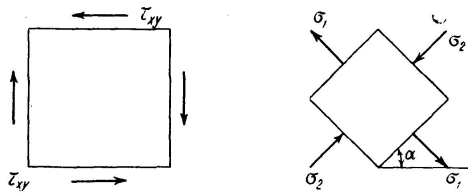


Fig. 3

Um die Formänderung γ_{xy} infolge einer Schubspannung τ_{xy} zu bestimmen, ersetzen wir τ_{xy} durch die gleichwertigen Hauptspannungen (Fig. 3)

$$\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau_{xy};$$

mit

$$\sigma_g = \sqrt{3 \cdot \sigma_1^2} = \sigma_1 \cdot \sqrt{3},$$

$$\mu_{xy} = \mu_1 = -\mu_2 = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

finden wir die zur Schubspannung $\tau_{xy} = \mu_{xy} \cdot \sigma_{10}$ zugehörigen Hauptdehnungen

$$\epsilon_1 = -\epsilon_2 = \mu_1 \cdot \epsilon_{11} + \mu_2 \cdot \epsilon_{12} = \mu_1 \cdot (\epsilon_{11} - \epsilon_{12}).$$

Da aus geometrischen Gründen (für $\alpha = 45^\circ$)

$$\gamma_{xy} = (\epsilon_1 - \epsilon_2)$$

ist, so wird

$$\gamma_{xy} = 2 \mu_{xy} \cdot (\epsilon_{11} - \epsilon_{12}) \quad (13)$$

oder für den elastischen Bereich

$$\gamma_{xy} = \tau_{xy} \cdot \frac{2(1+\nu)}{E} = \frac{\tau_{xy}}{G}.$$

Der Ansatz Gleichung (12) liefert uns somit für den elastischen Bereich, als Folge der vorausgesetzten Isotropie, den bekannten Wert des Schubmoduls G .

Wenn wir unsern Ansatz Gleichung (12) noch daraufhin prüfen wollen, ob er die Hypothese von der *Konstanz der Gestaltänderungsarbeit* befriedigt, so ist zunächst festzustellen, daß diese Hypothese an sich, wie aus Gleichung (1) ohne weiteres ersichtlich ist, nur für *isotrope Baustoffe* gelten kann. Für diese ist aber mit $\sigma_{10} = \sigma_{20} = \sigma_{30}$

$$\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \epsilon_{33}$$

$$\epsilon_{12} = \epsilon_{23} = \epsilon_{31} = \epsilon_{13} = \epsilon_{32} = \epsilon_{21}$$

und Gleichung (12) geht über in den speziellen Ansatz für *isotrope Stoffe*

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= \mu_1 \cdot \epsilon_{11} + (\mu_2 + \mu_3) \cdot \epsilon_{12}, \\ \epsilon_2 &= \mu_2 \cdot \epsilon_{11} + (\mu_3 + \mu_1) \cdot \epsilon_{12}, \\ \epsilon_3 &= \mu_3 \cdot \epsilon_{11} + (\mu_1 + \mu_2) \cdot \epsilon_{12}, \end{aligned} \right\} \quad (12a)$$

Setzen wir die Werte

$$\bar{\sigma}_1 = \bar{\mu}_1 \cdot \sigma_{10}, \quad \bar{\sigma}_2 = \bar{\mu}_2 \cdot \sigma_{10}, \quad \bar{\sigma}_3 = \bar{\mu}_3 \cdot \sigma_{10},$$

wobei

$$\bar{\mu}_1 = \mu_1 - \mu_m, \quad \bar{\mu}_2 = \mu_2 - \mu_m, \quad \bar{\mu}_3 = \mu_3 - \mu_m$$

und

$$\mu_m = \frac{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3}{3}$$

bedeuten, in Gleichung (1) ein, so finden wir

$$\begin{aligned} A_g &= \frac{1}{2} \cdot \sigma_{10} \cdot [\bar{\mu}_1 \cdot (\mu_1 \cdot \epsilon_{11} + (\mu_2 + \mu_3) \cdot \epsilon_{12}) + \bar{\mu}_2 \cdot (\mu_2 \cdot \epsilon_{11} + (\mu_3 + \mu_1) \cdot \epsilon_{12}) + \\ &\quad + \bar{\mu}_3 \cdot (\mu_3 \cdot \epsilon_{11} + (\mu_1 + \mu_2) \cdot \epsilon_{12})] \\ &= \frac{1}{2} \cdot \sigma_{10} \cdot [\epsilon_{11} \cdot (\mu_1^2 + \mu_2^2 + \mu_3^2 - 3\mu_m^2) + 2\epsilon_{12} \cdot (\mu_1 \cdot \mu_2 + \mu_2 \cdot \mu_3 + \mu_3 \cdot \mu_1 - 3\mu_m^2)] \\ A_g &= \frac{1}{3} \cdot \sigma_{10} \cdot (\epsilon_{11} - \epsilon_{12}) \cdot (\mu_1^2 + \mu_2^2 + \mu_3^2 - \mu_1 \cdot \mu_2 - \mu_2 \cdot \mu_3 - \mu_3 \cdot \mu_1); \end{aligned}$$

wegen $\mu_1^2 + \mu_2^2 + \mu_3^2 - \mu_1 \cdot \mu_2 - \mu_2 \cdot \mu_3 - \mu_3 \cdot \mu_1 = 1$

wird somit $A_g = \frac{1}{3} \cdot \sigma_{10} \cdot (\epsilon_{11} - \epsilon_{12})$. (6a)

Die Hypothese der konstanten Gestaltänderungsarbeit ist also erfüllt.

Auf ähnliche Weise finden wir für die Vergleichsdehnung ϵ_g den Wert

$$\epsilon_g = (\epsilon_{11} - \epsilon_{12}); \quad (7a)$$

auch die Hypothese der resultierenden Schiebung γ_0 ist erfüllt. Nun zeigt uns aber der Vergleich der Gleichungen (6a) und (7a), daß auch außerhalb des elastischen Bereiches mit $\sigma_{10} = \sigma_g$ die in Gleichung (10) für den elastischen Bereich gefundene Beziehung

$$A_g = \frac{\sigma_g \cdot \epsilon_g}{3}$$

gilt; da dies eine Folge der vorausgesetzten Isotropie ist, haben sachlich die beiden Gleichungen (6a) und (7a) die gleiche Bedeutung.

Die Entscheidung darüber, ob eine Hypothese richtig und damit brauchbar ist, kann nur der Vergleich mit Versuchsergebnissen liefern. Der Ansatz Gleichung (12a), in Verbindung mit den zugehörigen gleichwertigen Span-

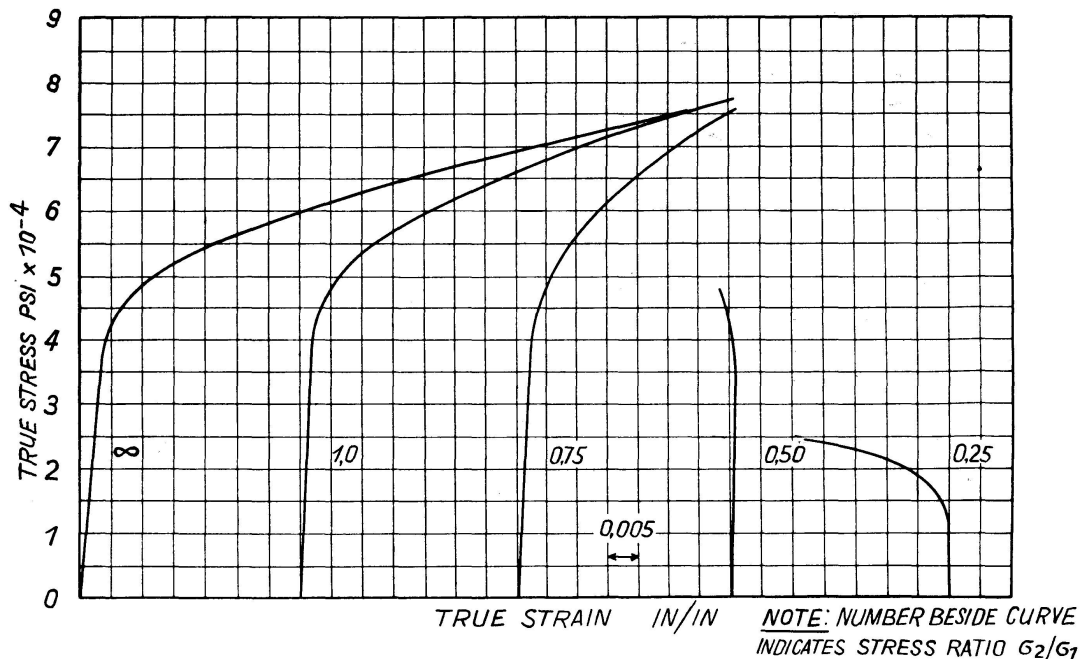


Fig. 4

nungen, soll deshalb nachstehend noch mit den Ergebnissen von zwei Versuchsreihen verglichen werden.

Als erste Versuchsreihe wählen wir diejenige, die J. MARIN²⁾ mit einer Aluminiumlegierung Alcoa 24 S-T für verschiedene Kombinationen der beiden Hauptspannungen σ_1 und σ_2 an Hohlzylindern durchgeführt hat. Fig. 4 zeigt die gemessenen Spannungsdehnungskurven in Richtung $\sigma_2 - \epsilon_2$ für verschiedene Verhältnisse von σ_2/σ_1 . Die Kurve für $\sigma_2/\sigma_1 = \infty$, d. h. für $\sigma_1 = 0$ entspricht in unserer Bezeichnung der Kurve $\epsilon_{22} - \sigma_{20}$, während die Kurve ϵ_{21} nicht angegeben ist. Nun kann aber für jeden Punkt jeder dieser Kurven eine Gleichung (12a)

$$\epsilon_2 = \mu_2 \cdot \epsilon_{22} + \mu_1 \cdot \epsilon_{21}$$

unter Beachtung der zugehörigen Spannungen nach Gleichung (11) angeschrieben werden; da fünf Versuchskurven vorhanden sind, besitzen wir fünf Reihen von Bestimmungsgleichungen für die beiden Kurven ϵ_{22} und ϵ_{21} , so daß wir durch passende Kombination dieser Gleichungen Mittelwerte von ϵ_{22} und ϵ_{21} erhalten und somit die Streuungen der Versuchswerte teilweise eliminieren. Aus diesen beiden gemittelten Kurven ϵ_{22} und ϵ_{21} sind nun die Kurven ϵ_2 für die verschiedenen Verhältnisse von σ_2/σ_1 berechnet und in Fig. 5 in einer der Fig. 4 entsprechenden Anordnung aufgetragen worden. Die gemessenen und die berechneten Kurven stimmen in ihrem Verlauf im allgemeinen recht gut überein; eine Ausnahme ist am ehesten für das Verhältnis $\sigma_2/\sigma_1 = 0.50$ festzustellen. Ich habe deshalb auch noch die Kurve ϵ_2 für $\sigma_2/\sigma_1 = 0.45$ berechnet und in Fig. 5 eingetragen; der Verlauf dieser Kurve stimmt grundsätzlich mit

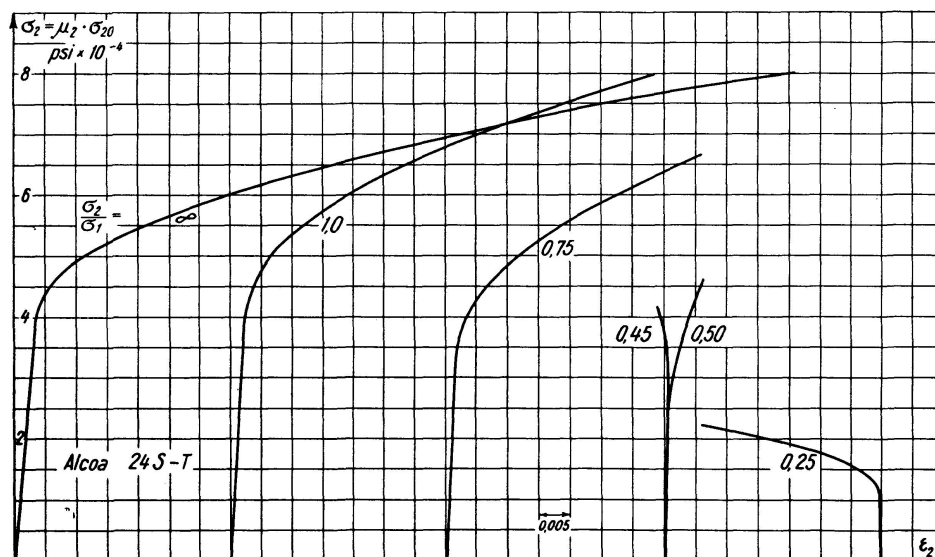


Fig. 5

²⁾ J. MARIN: A biaxial stress machine for the determination of plastic stress-strain relations. Proc. Soc. Exp. Stress Analysis, Vol. VII, 1, 1949. Unsere Fig. 4 entspricht der Fig. 11 dieses Berichtes.

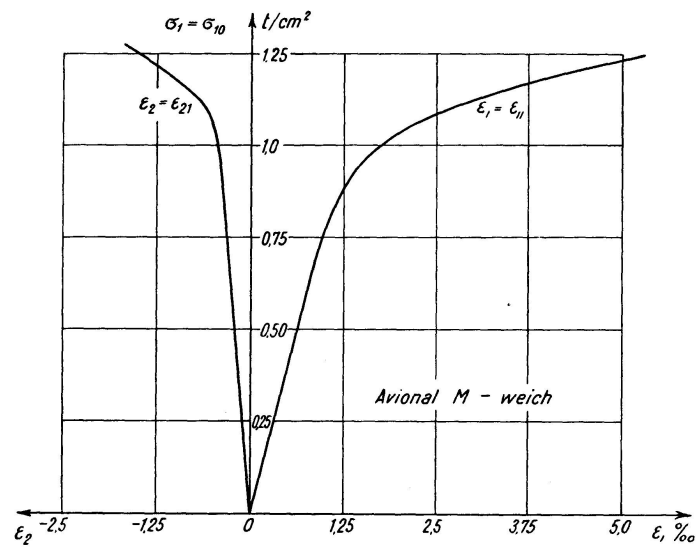


Fig. 6

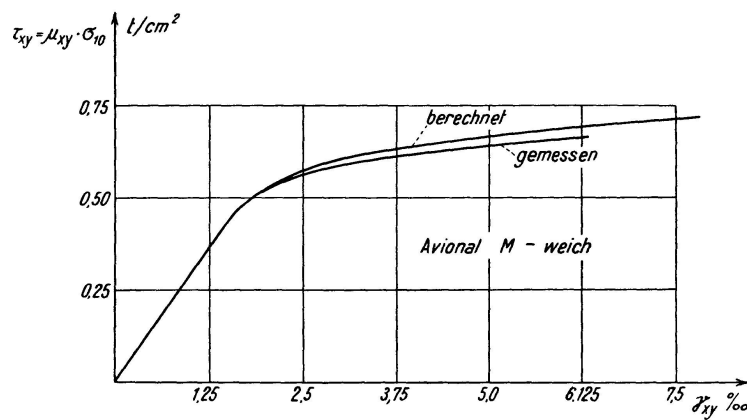


Fig. 7

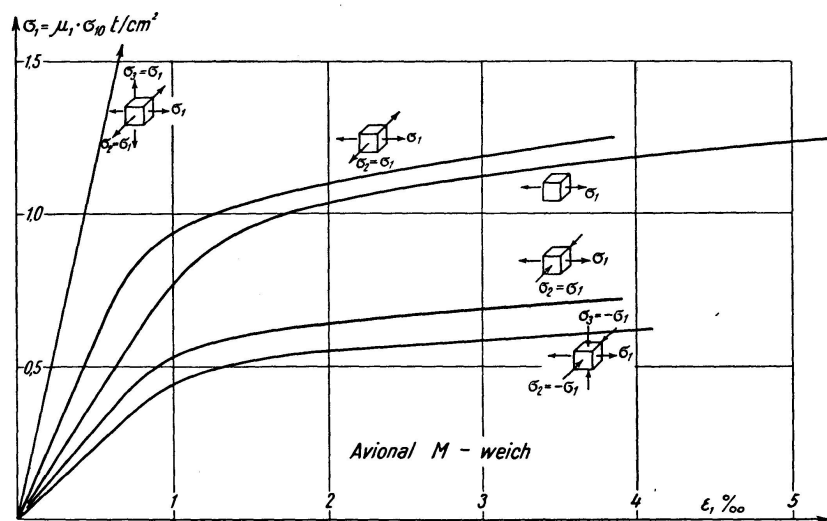


Fig. 8

der gemessenen Kurve für $\sigma_2/\sigma_1 = 0.50$ überein. Mit Rücksicht auf die unvermeidlichen Streuungen der Versuchswerte, die von Streuungen der Materialeigenschaften, von Abweichungen des Spannungsverhältnisses σ_2/σ_1 gegenüber dem Sollwert oder von Ungenauigkeiten der Dehnungsmessungen herrühren können, darf die Übereinstimmung von Versuch und Rechnung als gut bezeichnet werden.

In den Fig. 6 und 7 ist noch der Vergleich der hier entwickelten Theorie mit eigenen Versuchen an Hohlzylindern aus Avional M- weich gezeigt³⁾. Fig. 6 zeigt die Kurven ϵ_{11} und ϵ_{21} für einachsigen Zug σ_{10} , während in Fig. 7 die aus Fig. 6 berechneten Werte der Schubverformungen γ_{xy} den im Torsionsversuch gemessenen Werten gegenübergestellt sind. Auch hier ist die Übereinstimmung von Versuch und Rechnung gut. Damit darf wohl der durch die Gleichungen (11) und (12) gegebene Zusammenhang zwischen Spannungen und Dehnungen im überprüften Gültigkeitsbereich, nämlich für isotrope Baustoffe, als gesichert angesehen werden.

Fig. 8 zeigt noch, aus den Kurven ϵ_{11} und ϵ_{21} der Fig. 6 berechnet, die Spannungsdehnungsdiagramme einiger charakteristischer Spannungs kombinationen, womit eine versuchstechnisch bekannte Erscheinung auch rechnerisch ihre zwanglose Deutung findet. Eine besondere Bemerkung ist dabei vielleicht für den Fall des allseitigen Zuges $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ angezeigt; hier werden wegen $\sigma_g = 0$, $\mu_1 = \mu_2 = \infty$ in der Darstellung der Gleichungen (11) und (12) sowohl die Spannungen $\mu \cdot \sigma$ wie die Dehnungen unendlich groß. Da aber $\mu = \infty$ nur bedeutet, daß unter endlichen Spannungen hier kein Überschreiten der Proportionalitätsgrenze möglich ist, verschwindet die scheinbare Unbestimmtheit $\frac{\infty}{\infty}$ beim Übergang auf das Hooke'sche Gesetz.

3. Schlußbemerkungen

Die hier vorgelegte Plastizitätstheorie isotroper Baustoffe beschäftigt sich mit den Zusammenhängen zwischen Spannungen und Dehnungen; sie sagt jedoch an sich nichts aus über die Bruchgefahr. Für den Bruch selber ist offenbar die Mohrsche Bruchtheorie, die auf die größte Schubspannung τ_{max} orientiert ist, maßgebend. Es liegt also hier der wohl unschwer verständliche Unterschied vor, daß für den Formänderungszustand die resultierende Schubspannung τ_0 in der Oktaederebene, für den Bruch dagegen die größte Schubspannung $\tau_{max} = \tau_{13}$ maßgebend ist. Das Verhältnis dieser beiden Werte kann, je nach der Größe der mittleren Hauptspannung σ_2 , zwischen

³⁾ Die Durchführung dieser Versuche in meiner Abteilung des Institutes für Bau- statik an der ETH verdanke ich meinem Assistent-Konstrukteur Dipl.-Ing. M. Walt.

$$\frac{\tau_0}{\tau_{max}} = \sqrt{\frac{2}{3}} = 0.8165 \quad \text{und} \quad \frac{\tau_0}{\tau_{max}} = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{3} = 0.9428$$

variieren. Dagegen ist die Plastizitätstheorie *in Verbindung mit der Mohrschen Bruchtheorie* in der Lage, etwas über die *Art des Bruches* auszusagen: liegt für den zu untersuchenden Spannungszustand der dem Wert $\sigma_g = \sigma_F$ (σ_F = Fließgrenze) entsprechende Hauptkreis innerhalb der Mohrschen Hüllkurve, so ist ein Gleitbruch zu erwarten; schneidet dagegen der Hauptkreis für $\sigma_g = \sigma_p$ (σ_p = Proportionalitätsgrenze) die Hüllkurve, so tritt ein Trennbruch oder Spröbruch ein.

Es sei nochmals ausdrücklich festgehalten, daß die durch die Gleichungen (11) und (12a) angegebenen Zusammenhänge nur für isotrope oder annähernd isotrope Baustoffe gelten, da sie nur für diese durch den Vergleich mit Versuchsergebnissen gesichert sind. Diese Zusammenhänge gelten somit auch nicht für Beanspruchungen eines früher schon über die Proportionalitätsgrenze hinaus beansprucht gewesenen Materials, denn durch eine solche erste Beanspruchung über die Proportionalitätsgrenze hinaus (Bauschinger-Effekt) geht die Isotropie verloren; das Material verhält sich unter späteren Belastungen anisotrop bzw. orthotrop⁴). Ob für orthotropes Materialverhalten der Ansatz der Gleichungen (11) und (12) noch gültig ist, kann erst nach Durchführung entsprechender Versuche entschieden werden.

Zusammenfassung

Für statische Beanspruchung $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ isotroper Baustoffe lassen sich die spezifischen Formänderungen als lineare Kombinationen der Spannungsdehnungsdiagramme für einachsige Beanspruchungen darstellen, wenn die Beanspruchungen „gleichwertig“ sind, d. h. wenn der Spannungszustand $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ die gleiche resultierende Schubspannung in der Oktaederebene oder, was damit identisch ist, die gleiche Vergleichsspannung σ_g ,

$$\sigma_g^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_2 \cdot \sigma_3 - \sigma_3 \cdot \sigma_1,$$

verursacht, wie der verglichene einachsige Spannungszustand. Der vorgeschlagene Ansatz erfüllt für isotrope Baustoffe die Hypothese von der Konstanz der Gestaltänderungsarbeit und geht für unterhalb der Proportionalitätsgrenze liegende Beanspruchungszustände in das Hookesche Gesetz über. Dagegen gelten diese Zusammenhänge dann nicht, wenn der Baustoff über die Proportionalitätsgrenze hinaus beansprucht war, weil durch eine solche Vorbelastung die Isotropie verloren geht.

⁴) Vergl. F. Stüssi: Die Grundlagen der mathematischen Plastizitätstheorie und der Versuch. Zeitschr. f. angew. Math. u. Physik, ZAMP, Vol. I, 1950.

Summary

For static stressing $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ of isotropic material, the specific deformations may be represented as linear combinations of the stress-strain diagrams for single-axis stressing, if the stresses are "equivalent", i. e. if the stress condition $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ causes the same resulting shearing stress in the octahedral plane or, what comes to the same thing, the same comparison stress σ_g ,

$$\sigma_g^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_2 \cdot \sigma_3 - \sigma_3 \cdot \sigma_1$$

as the compared single-axis stress causes. The proposed allowance satisfies the hypothesis of the constancy of the work of structural deformation for isotropic materials and passes over into Hook's law for stress conditions lying below the limits of proportionality. On the other hand, these connections do not hold good, if the material has previously been stressed beyond the limit of proportionality, since after such a loading the material behaves no longer isotropic.

Résumé

Pour la contrainte statique $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ des matériaux isotropes, on peut représenter les déformations spécifiques sous la forme de combinaisons linéaires des diagrammes d'allongement pour des contraintes mono-axiales, lorsque les contraintes sont „équivalentes“, c'est-à-dire lorsque le régime de contrainte $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ donne lieu au même cisaillement résultant dans le plan octaèdre, ou ce qui revient au même, à la même contrainte de comparaison σ_g :

$$\sigma_g^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_2 \cdot \sigma_3 - \sigma_3 \cdot \sigma_1$$

que le régime de contrainte mono-axial comparé.

Cette proposition satisfait, pour les matériaux isotropes, à l'hypothèse de la constance du travail de déformation et elle aboutit à la loi de Hooke pour les régimes de contrainte inférieurs à la limite de proportionnalité. Par contre, ces relations ne sont pas valables lorsque le matériau considéré était antérieurement chargé au-dessus de la limite de proportionnalité, car une telle charge préalable détruit l'isotropie.