

Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht

Band: 6 (1960)

Artikel: Generalbericht

Autor: Stüssi, F.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-7013>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 08.02.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Questions générales - Allgemeine Fragen - General Questions

I

Bases du dimensionnement Grundlagen der Bemessung Basis of Structural Design

Ia

Les propriétés des matériaux Die maßgebenden Festigkeitseigenschaften der Baustoffe Properties of Materials

Ib

Développement des méthodes de calcul Entwicklung der Berechnungsmethoden Development of Methods of Calculation

Generalbericht

F. STÜSSI

Prof. Dr., Präsident der IVBH, Zürich

Ia. Die maßgebenden Festigkeitseigenschaften der Baustoffe

Wenn wir an einem Kongreß der Internationalen Vereinigung für Brückenbau und Hochbau die Frage der maßgebenden Festigkeits- und Verformungseigenschaften unserer Baustoffe diskutieren, so dürfte es nützlich sein, unseren Standpunkt und damit das Ziel dieser Diskussion festzulegen. Ich erlaube mir hier eine Feststellung von Prof. W. WEIBULL¹⁾, Stockholm, zu zitieren, die auch uns als Richtlinie dienen kann:

“There are two quite different lines of attacking fatigue problems: the phenomenological and the metallographical. The first one is the line of the designer, who wants to know what happens; the second one, that of the metallographer, who wants to know why it happens. As a link between the two, you will find the third man, the tester of materials.

¹⁾ W. WEIBULL: The Statistical Aspect of Fatigue Failures and its Consequences. Fatigue and fracture of metals, edited by W. M. Murray, Mass. Inst. Techn., 1952.

All these categories have different opinions as to the way of designing the experiments and of conducting the testing. The metallographer, for instance, may think — I have met this statement quite recently — that the basic physical facts of fatigue should be clarified before the organization of any large scale testing. The designer, on the other hand, wants urgently many more facts about fundamental questions than are available today, and it is definitely impossible for him to wait for the many years that it will certainly take to obtain well-founded theories which will be of any use to him. There is no need, I think, to point out that both of the ways have to be trod and that progress in one field may have quite important influences on the proceedings in the other.”

Soweit Professor WEIBULL, dessen große Verdienste um die statistische Beurteilung und Auswertung von Ermüdungsversuchen ich an dieser Stelle ausdrücklich anerkennen möchte.

Unser Standpunkt ist damit eindeutig festgelegt; die Kenntnis des Materialverhaltens ist für uns als Grundlage der Tragwerksbemessung notwendig und wir sind gezwungen, uns diese Grundlagen auf phänomenologischem Weg zu beschaffen, wenn eine ursächliche physikalische Begründung der maßgebenden Vorgänge noch nicht vorliegt. Daß wir aber eine Zusammenarbeit mit der Physik und der Materialprüfung begrüßen, sei hier ebenfalls ausdrücklich festgehalten.

Um diese Überlegungen zu veranschaulichen, sei der Zusammenhang zwischen der Wechselfestigkeit σ_W eines metallischen Werkstoffes und der Lastwechselzahl n , die den Bruch des Probestabes oder des Werkstückes verursacht, beigezogen. Für diese Wöhlerkurve der Wechselfestigkeit sind grundsätzlich, wie ich schon im «Vorbericht» festgestellt habe, verschiedene Ansätze denkbar. Ich habe für diesen Zusammenhang den Ansatz

$$\sigma_W = \frac{\sigma_{0Z} + f_W \sigma_{aW}}{1 + f_W} \quad (1)$$

vorgeschlagen, bei dem der gesuchte Festigkeitswert als gewogenes Mittel zwischen den beiden Grenzwerten, der statischen Zugfestigkeit σ_{0Z} und dem asymptotischen Endwert σ_{aW} erscheint; der «Gewichtsfaktor» oder die Ermüdungsfunktion $f_W(n)$,

$$f_W = \frac{\sigma_{0Z} - \sigma_W}{\sigma_W - \sigma_{aW}}, \quad (1a)$$

läßt sich durch Logarithmieren linearisieren oder es ist

$$\lambda = \log f_W = \log \frac{\sigma_{0Z} - \sigma_W}{\sigma_W - \sigma_{aW}} = p i + \lambda_0,$$

wobei $i = \log n$, und es ist damit

$$f_W = \alpha^\lambda = f_{0W} n^p. \quad (1b)$$

Einen anderen Ansatz hat W. WEIBULL¹⁾ auf Grund eines Vorschlages von E. EPREMIAN und ausgehend von der Gaußschen Fehlerfunktion vorgeschlagen, den wir in der Form

$$\sigma_W = \sigma_{aW} + (\sigma_{0Z} - \sigma_{aW}) e^{-m_0 i^r} \quad (2)$$

anschreiben können; dieser Ansatz wird durch doppeltes Logarithmieren linearisiert:

$$\log \log \frac{\sigma_{0Z} - \sigma_{aW}}{\sigma_W - \sigma_{aW}} = r \log i + \mu_0.$$

Die beiden Ansätze seien am Beispiel einer Versuchsreihe an einem gelochten Stab (Loch $\phi=4$ mm bei 30 mm Stabbreite) aus einem Stahl der Güte St. 44 (Stahl von Roll) nach Fig. 1 miteinander verglichen; dieser Vergleich ist in Fig. 2 dargestellt. Beide Ansätze stimmen im Versuchsbereich von etwa $n=30 \cdot 10^3$ bis über $n=10 \cdot 10^6$ gut überein; die unvermeidlichen Streuungen, die besonders bei kleinen Spannungswerten groß werden, erlauben keinen Entscheid darüber, welcher der beiden Ansätze den Verlauf der Wöhlerkurve

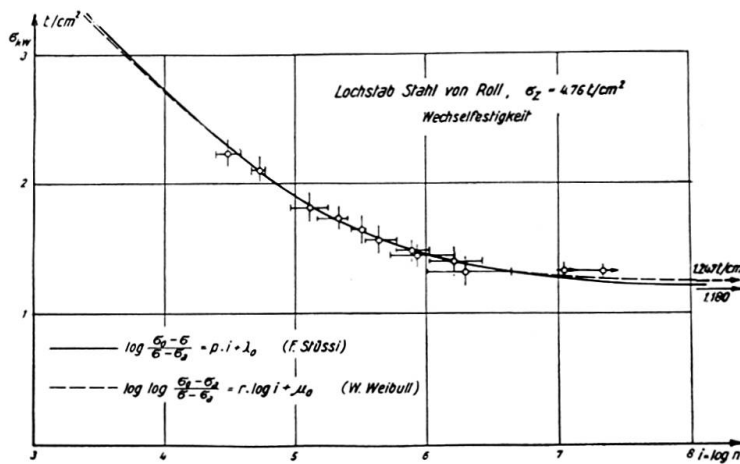


Fig. 1.

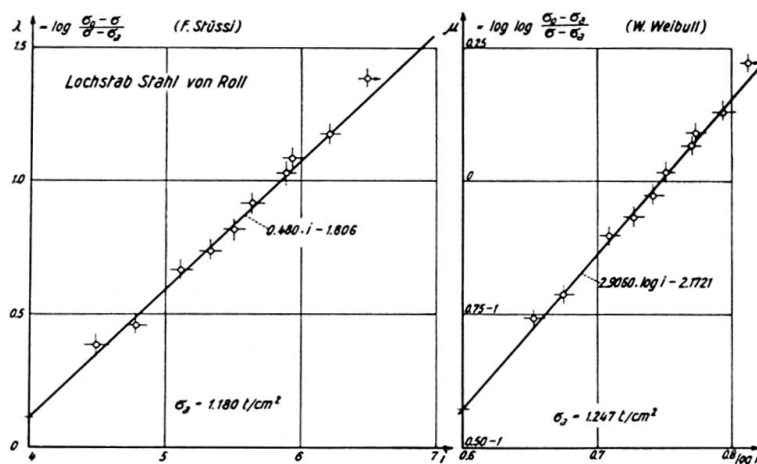


Fig. 2.

besser wiedergibt. Wenn ich dem Ansatz nach Gl. (1) den Vorzug gebe, so deshalb, weil er auch andere Langzeitvorgänge zutreffend erfaßt und weil er einfacher aufgebaut und leichter zu handhaben ist als der Ansatz nach Gl. (2).

Es ist denkbar, daß nicht nur zukünftige Versuchsreihen mit großen Zahlen von Einzelversuchen und ihre statistische Auswertung, sondern auch der «Zweistufenversuch» und seine Ausdeutung im Sinne der Schadenshäufung uns die Bestätigung des richtigen Ermüdungsgesetzes bringen können. Es ist bekannt, daß das Theorem von Palmgren-Miner nicht gültig ist für den Zweistufenversuch, bei dem in einer ersten Laststufe σ_1 (Bruch für n_1 Lastwechsel), Δn_1 Lastwechsel und anschließend in einer zweiten Laststufe σ_2 (n_2) weitere Δn_2 Lastwechsel bis zum Bruch durchgeführt werden. Sind die beiden Laststufen gleichartig (z. B. Wechselbeanspruchung oder konstante Mittelspannung σ_m) und setzen wir

$$\xi_1 = \frac{\Delta n_1}{n_1}, \quad \xi_2 = \frac{\Delta n_2}{n_2},$$

so wird

für $\sigma_1 < \sigma_2, \quad n_1 > n_2: \xi_1 + \xi_2 > 1$

und für $\sigma_1 > \sigma_2, \quad n_1 < n_2: \xi_1 + \xi_2 < 1$

im Gegensatz zum Theorem Palmgren-Miner mit $\xi_1 + \xi_2 = 1$. Dies bedeutet aber, daß die Schadenslinie $S - \xi$ keine Gerade sein kann²⁾.

Zur Form der Schadenslinie können wir etwa auf Grund folgender Überlegungen gelangen: nehmen wir an, daß die Schädigung e des Materials durch Ermüdung proportional zur Lastwechselzahl zunimmt³⁾,

$$e = \alpha \xi,$$

sich aber auf einem zunehmend geschädigten Stab mit linear abnehmenden Arbeitsvermögen w ,

$$w = 1 - \beta \xi,$$

auswirkt, so ist der relative Schaden

$$S = \frac{e}{w} = \frac{\alpha \xi}{1 - \beta \xi}. \quad (3)$$

Für $\xi = 1$ tritt der Bruch ein oder es ist

$$S = 1 = \frac{\alpha}{1 - \beta}$$

und damit

$$\alpha + \beta = 1.$$

²⁾ N. M. NEWMARK: A Review of Cumulative Damage in Fatigue. Fatigue and fracture of metals, edited by W. M. Murray, Mass. Inst. Techn., 1952.

³⁾ Diese Annahme erscheint dadurch gerechtfertigt, daß bei konstanter Spannung die Rißausbreitung proportional mit der Lastwechselzahl vor sich geht; s. W. WEIBULL: Size effects on fatigue crack initiation and propagation in Aluminium sheet specimens subjected to stresses of nearly constant amplitude. F. F. A., Flygtekniska Försöksanstalten, Meddelande 86, Stockholm 1960.

Dividieren wir in Gl. (3) Zähler und Nenner durch α , so können wir mit

$$a = \frac{1}{\alpha}, \quad b = \frac{\beta}{\alpha},$$

auch schreiben

$$S = \frac{\xi}{a - b\xi}$$

oder wegen $a = 1 + b$

$$S = \frac{\xi}{1 + b(1 - \xi)}. \quad (3a)$$

Es ist nun allerdings aus dem Zweistufenversuch nicht möglich, die Schadensfunktion b direkt zu bestimmen, da wir daraus nur relative Schadenslinien im Vergleich zu einer willkürlich angenommenen Schadenslinie für die erste Laststufe σ_1 erhalten können. Aus einigen ersten Versuchen mit Wechselbeanspruchung zeigt sich nun aber gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung, wenn die Schadensfunktion b der Ermüdungsfunktion f_W nach Gleichung (1a) gleichgesetzt wird:

$$b = f_W = \frac{\sigma_0 z - \sigma_W}{\sigma_W - \sigma_{aW}} \quad (4)$$

oder

$$S_W = \frac{\xi}{1 + f_W(1 - \xi)}. \quad (4a)$$

Wird nun im Zweistufenversuch zuerst die Laststufe σ_1 mit $\Delta n_1 = \xi_1 n_1$ Lastwechseln und anschließend die Laststufe σ_2 aufgebracht, so steht für diese noch die dem Schadensbereich von $S = S_1$ bis $S = 1$ entsprechende Lastwechselzahl $\Delta n_2 = \xi_2 n_1$ zur Verfügung oder es ist

$$\xi_2 = \frac{1 - \xi_1}{1 + \varphi \xi_1}, \quad (5)$$

wobei

$$\varphi = \frac{f_2 - f_1}{1 + f_1} \quad (5a)$$

bedeutet (Fig. 3). In Fig. 4 sind zwei Versuchsreihen mit diesen rechnerischen Werten verglichen; in den Versuchen von E. W. C. WILKINS⁴⁾ ist $\sigma_1 < \sigma_2$,

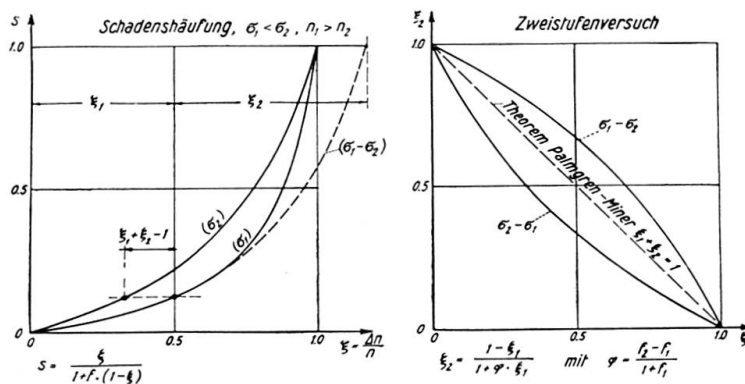


Fig. 3.

4) E. W. C. WILKINS: Cumulative damage in fatigue. Colloquium on fatigue, Stockholm 1955, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1956.

$f_1 > f_2$, $\xi_1 + \xi_2 > 1$, während in der eigenen Versuchsreihe mit Lochstäben aus Stahl von Roll die entgegengesetzten Verhältnisse mit $\xi_1 + \xi_2 < 1$ vorliegen. Es sei ausdrücklich bemerkt, daß der Zusammenhang $b = f_W$ nach Gl. (4) nur für Wechselbeanspruchungen ($\sigma_{max} = -\sigma_{min}$, $\sigma_m = 0$) gilt; für andere Beanspruchungen mit $\sigma_m \neq 0$ ist der Zusammenhang zwischen b und f_W noch durch entsprechende Versuche zu bestimmen.

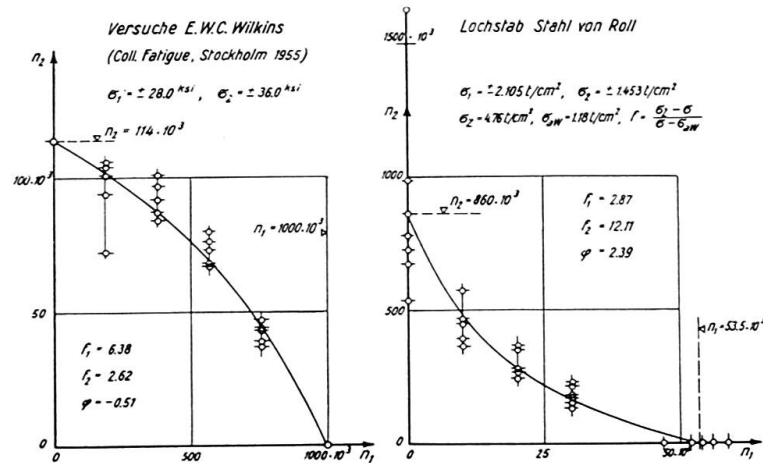


Fig. 4.

Neben Laboratoriumsversuchen an Probestäben, die uns die grundlegenden Zusammenhänge im Langzeitverhalten der Bau- und Werkstoffe liefern müssen, sind auch Großversuche an Bauteilen oder an ganzen Tragwerken erwünscht, um die Übertragung der im Laboratoriumsversuch gefundenen Ergebnisse auf die Bemessung von Tragwerken zu überprüfen und ihre Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Darin liegt die Bedeutung des von Prof. JAMES MICHALOS und Mitarbeitern vorgelegten Beitrages.

Der Beitrag von A. M. FREUDENTHAL, als Ergänzung zu seinem Aufsatz im «Vorbericht» und als Stellungnahme zu meinem Generalbericht, zeigt, daß noch keine Angleichung der beiden Standpunkte eingetreten ist. Das von Prof. FREUDENTHAL aufgerollte Problem bleibt weiter von grundlegender Aktualität; ich bin überzeugt, daß es eine auch für das Bauwesen befriedigende Lösung finden wird, auch wenn die versuchstechnische Abklärung noch geraume Zeit erfordern dürfte.

Die Schwierigkeit bei der Durchführung von Versuchen liegt darin begründet, daß Streuungen unvermeidbar sind. Zuverlässige Mittelwerte und die Größe der zu erwartenden Abweichungen können somit nur von Versuchsreihen mit einer großen Zahl von Einzelversuchen geliefert werden, was oft mehr Zeit in Anspruch nimmt als im gegebenen Einzelfall zur Verfügung steht. Es ist deshalb wertvoll, daß uns die mathematische Statistik die Wege aufzeigt, wie auch aus kleineren Versuchszahlen gültige Aussagen zu finden sind. Der Diskussionsbeitrag von Mr. DAVIN zeigt grundsätzliche Aspekte dieses Problems.

Ib. Entwicklung der Berechnungsmethoden

Bei der Aufstellung numerischer Berechnungsmethoden zur Bemessung von Tragwerken sind grundsätzlich zwei Wege denkbar; für beide liegen Diskussionsbeiträge als Beispiele vor.

Ein erster Weg beruht darauf, daß Differentialgleichungen durch Beziehungen über numerische Integration (Flächenberechnung mit Simpsonscher Regel, Seilpolygongleichung, Einführung von Reihenentwicklungen) oder Differentiation in Gleichungssysteme für bestimmte Intervallpunkte des Integrationsbereiches umgesetzt werden. Den Weg der wiederholten Integration (Flächenberechnung mit der Simpsonschen Regel) zeigt B. GILG, indem er von der höchsten in der Differentialgleichung vorkommenden Ableitung ausgeht und die niedrigeren Ableitungen daraus berechnet. Zu beachten ist jedoch, daß bei einer großen Zahl von Teilpunkten die Bestimmungsgleichungen recht schwerfällig werden können.

Den Weg der Reihenentwicklung zur Aufstellung eines Gleichungssystems zeigen W. A. NASH und F. H. HO bei der Berechnung einer eingespannten Kreisplatte auf elastischer Unterlage.

Entscheidend für die Leistungsfähigkeit solcher numerischer Verfahren wird immer sein, ob es gelingt, mit einer möglichst kleinen Zahl von Bestimmungsgleichungen eine möglichst gute Genauigkeit zu erreichen.

Ein zweiter Weg beruht darauf, für die Untersuchung eines Tragwerks ein einfach zu überblickendes «Ersatzsystem» einzuführen. So liegt ja der graphischen Berechnung eines einfachen Balkens in der elementaren Baustatik die Analogie zwischen den Biegemomenten des Balkens mit den Durchbiegungen eines belasteten Seiles zu Grunde; O. MOHR hat diese Analogie auch auf die Berechnung der Biegelinie ausgedehnt. S. O. ASPLUND zeigt in seinem Beitrag (wird später in den «Abhandlungen» veröffentlicht) eine solche Analogie zwischen der Berechnung von Schalen und von Raumfachwerken.

V. KOLOUŠEK erweitert seine früheren Beiträge zur Schwingungsberechnung um eine Untersuchung über die Schwingungen durchlaufender Tragwerke mit wiederholten oder gleichartigen Elementen. Dabei wird mit einer Lösung durch fortgesetzte Annäherung ein weiteres Mittel numerischer Berechnungsmethoden aufgezeigt.

Durch die Einführung elektronischer Rechenautomaten bei den Berechnungen des Bauwesens, wozu die Referate von A. MEHMEL und Ch. MASSONNET mit Mitarbeitern illustrative Beiträge darstellen, wird die Bedeutung leistungsfähiger und zuverlässiger Rechnungsmethoden noch gesteigert; als weitere Forderung tritt nun noch diejenige der Möglichkeit einer einfachen Programmierung hinzu.

Der Beitrag von A. BERIO zeigt ein Beispiel für jene Fälle, in denen Modellversuche die statische Berechnung ersetzen oder ergänzen können; dieses Vor-

gehen ist vor allem zweckmäßig bei komplizierten Tragwerksformen, bei denen eine verhältnismäßig einfache und doch zuverlässige Berechnung nicht möglich ist.

Mit Grenzlastzuständen beschäftigen sich die Beiträge von W. OLSZAK und D. C. DRUCKER (letzterer in Band 21 der «Abhandlungen» veröffentlicht). Diese Berechnungsverfahren, so interessant sie auch theoretisch sein mögen, sind im Bauwesen, d. h. als Bemessungsgrundlage für Bauwerke, umstritten.

Sowohl W. WIERZBICKI wie CH. MASSONNET und P. MOENAERT ergänzen ihre im «Vorbericht» veröffentlichten Beiträge.

Schlußfolgerungen

1. Die Kongreßbeiträge zur ersten Arbeitssitzung haben deutlich die heute schon weit verbreitete und sich ständig verstärkende Tendenz aufgezeigt, der Bemessung von Tragwerken nicht nur die Ergebnisse von kurzfristigen Laboratoriumsversuchen, sondern das wirkliche Verhalten der Baustoffe im langdauernden Betrieb unter veränderlichen Belastungen zu Grunde zu legen. Es handelt sich hier um Langzeitvorgänge, bei denen besonders die Fragen der Ermüdung, der Zeitstandfestigkeit, der Relaxation und des Schwindens und Kriechens im Vordergrund stehen.

Eine abschließende Beantwortung dieser Fragen auf Grund einer physikalischen Erklärung dieser Vorgänge ist nach dem heutigen Stand der Erkenntnisse noch nicht möglich. Das Bauwesen ist deshalb vorläufig auf ein phänomenologisches Vorgehen angewiesen, wobei jedoch nach wie vor eine Zusammenarbeit mit Physik und Materialprüfung erwünscht ist.

Die Aussprache am Kongreß hat jedoch einige grundsätzliche Hinweise für das weitere Vorgehen und Anordnung und Auswertung der notwendigen zukünftigen Versuche ergeben, mit denen die heute vorliegenden Ansätze überprüft, wenn nötig berichtigt und weiter ausgebaut werden sollen.

2. Bei der Entwicklung der Berechnungsmethoden steht der Ausbau der numerischen Methoden im Vordergrund, denn die Bemessung von Tragwerken ist eine eindeutig numerisch orientierte Aufgabe. Dabei besteht die Möglichkeit, die Gleichgewichts- und Formänderungsbedingungen, die das Kräftespiel in Tragwerken beherrschen und die häufig auf Differentialgleichungen führen, durch möglichst einfach aufgebaute Gleichungssysteme zu erfassen und diese numerisch zu lösen. Entscheidend für die Zweckmäßigkeit eines Berechnungsverfahrens ist immer, daß die gestellte Aufgabe mit minimalem Aufwand zuverlässig, d. h. mit genügender Genauigkeit gelöst werden kann. Eine analytische Lösung in geschlossener Form ist nur dann anwendbar, wenn die bei ihrer Aufstellung getroffenen Voraussetzungen auch in Wirklichkeit erfüllt sind. Die Einführung elektronischer Rechenautomaten verstärkt das Bedürfnis nach leistungsfähigen numerischen Methoden.

Die Berechnung eines Tragwerks kann auch etwa durch Einführung eines leichter zu überblickenden Ersatztragwerks erleichtert werden. Ferner sei festgehalten, daß in Sonderfällen auch der Modellversuch die eigentliche Berechnung ersetzen oder ergänzen kann.

3. Bei der Ausführung unserer Tragwerke hat der Konstrukteur immer daran zu denken, daß normalerweise die Bauten, die wir heute herstellen, auch späteren Generationen noch ihre Dienste leisten müssen und deshalb einem langdauernden Betrieb unter veränderlichen Bedingungen unterworfen sein werden. Je besser wir diese wirklichen Arbeitsbedingungen in bezug auf statische und dynamische Belastungen, auf räumliche Zusammenhänge und räumliche Kraftwirkungen, aber auch in bezug auf das Langzeitverhalten der Baustoffe beim Entwurf und bei der Berechnung der Tragwerke berücksichtigen, um so zuverlässiger erfüllen wir unsere Aufgabe als konstruierende Ingenieure.

General Report

Theme Ia. The properties of Materials

When the subject of discussion at a Congress of the International Association for Bridge and Structural Engineering is the determinant mechanical properties of materials, it seems advisable to state, first of all, the point of view we have adopted and hence the purpose of the discussion.

In this connection, I would venture to quote the remarks made by Professor WEIBULL¹⁾, of Stockholm, which may also serve as a directive for us:

“There are two quite different lines of attacking fatigue problems: the phenomenological and the metallographical. The first one is the line of the designer who wants to know what happens; the second one, that of the metallographer, who wants to know why it happens. As a link between the two, you will find the third man, the tester of materials.

All these categories have different opinions as to the way of designing the experiments and of conducting the testing. The metallographer, for instance, may think — I have met this statement quite recently — that the basic physical facts of fatigue should be clarified before the organisation of any large scale testing. The designer, on the other hand, wants urgently many more facts about fundamental questions than are available today, and it is definitely impossible for him to wait for the many years that it will certainly

¹⁾ W. WEIBULL: The Statistical Aspect of Fatigue Failures and its Consequences. Fatigue and fracture of metals, edited by W. M. Murray, Mass. Inst. Techn., 1952.