

# Dauerfestigkeit von Aluminium-Legierungen

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-13210>

## **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.

# Dauerfestigkeit von Aluminium-Legierungen

*Fatigue strength of Aluminium alloys*

*Résistance à la fatigue des alliages légers*

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

## I. Gegenstand

Die umfassende Kenntnis der Dauerfestigkeit für beliebige Beanspruchungsverhältnisse und für beliebige Zahl von Lastwechseln ist eine der notwendigen Grundlagen für die erfolgreiche Anwendung von Aluminiumlegierungen im Bauwesen. Bei der großen Zahl der verschiedenen vorhandenen Legierungen ist es praktisch kaum möglich, ein genügend umfassendes Versuchsprogramm über die Dauerfestigkeiten innert nützlicher Frist durchzuführen. Daraus ergibt sich das Bedürfnis nach einer *Theorie der Dauerfestigkeit*, und wenn auch vorläufig nur in der Form einer Arbeitshypothese, die uns erlaubt, die Dauerfestigkeit einer Legierung auf Grund einer verhältnismäßig kleinen Zahl von charakteristischen Kennwerten zu beurteilen; damit würde es auch möglich, die verschiedenen Legierungen übersichtlich miteinander zu vergleichen und eine gewisse Klassierung aufzustellen. Eine solche Theorie dürfte somit auch bei der erstrebenswerten Vereinheitlichung der für das Bauwesen in Betracht kommenden Legierungen und ihrer Bezeichnungen<sup>1)</sup> gute Dienste leisten.

Im folgenden wird der Versuch einer solchen Theorie vorgelegt, der sich auf Dauerfestigkeitsversuche der Aluminium Laboratories Limited, Banbury (England) an vollen Probestäben aus der Legierung Noral 26 SWP stützt<sup>2)</sup>. Es scheint mir zur Zeit noch nicht möglich, eine Dauerfestigkeitstheorie aus ursächlichen Zusammenhängen, also etwa auf energetischer Grundlage aufzustellen; die nachfolgende Theorie ist aus der Beurteilung der Form der Versuchsergebnisse entstanden. Es ist mir durchaus bewußt, daß die Auswertung einer einzigen Versuchsreihe (die allerdings durch Vergleich mit anderen mir zur

<sup>1)</sup> S. IV. Kongreß der I. V. B. H., Schlußbericht, Schlußfolgerungen B I 6, Cambridge und London, 1953.

<sup>2)</sup> Diese Versuchsergebnisse wurden mir in verdankenswerter Weise von Herrn Ing. G. E. Huenerwadel, l'Aluminium Commercial S. A., Zürich, zur Verfügung gestellt.

Verfügung stehenden Versuchswerten überprüft wurde) eine zu schmale Grundlage für eine neue Theorie darstellt. Wenn ich diese hier trotzdem vorlege, so deshalb, weil sie einerseits gewisse Zusammenhänge zeigt, die mir charakteristisch und von grundsätzlicher Bedeutung zu sein scheinen, und andererseits, weil so eine Überprüfung mit Versuchsergebnissen, die mir nicht bekannt und nicht zugänglich sind, möglich wird, woraus gegebenenfalls eine Verbesserung und Verfeinerung der Theorie und damit eine weitere Abklärung des Problems resultieren dürfte.

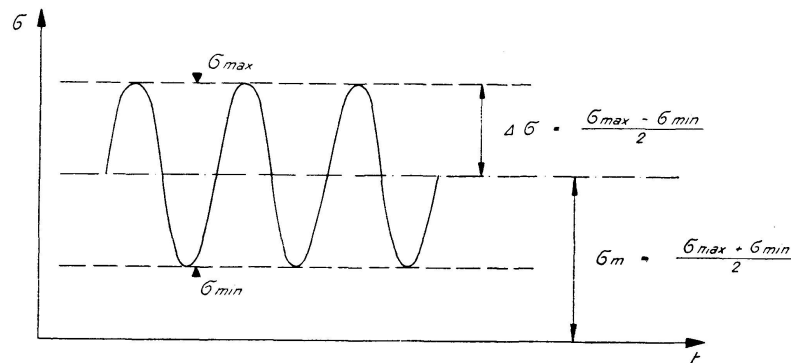


Fig. 1

Bei der Dauerfestigkeit stehen die in Fig. 1 bezeichneten Spannungswerte im Spiel. Als Konstruktionsgrundlage ist es zweckmäßig und üblich, die Werte  $\sigma_{max}$  und  $\sigma_{min}$  zu verwenden; dagegen zeigt es sich, daß es für die Versuchsauswertung zweckmäßiger ist, von den Werten

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}, \quad \Delta\sigma = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

auszugehen, weil zwischen diesen Werten übersichtliche Zusammenhänge bestehen, die auch eine gute Beurteilung der Versuchsergebnisse in bezug auf die Streuungen erlauben.

## 2. Die Versuche und ihre Auswertung

Die in Fig. 2 wiedergegebenen Versuchsergebnisse beziehen sich auf die Dauerfestigkeit unter Zugbelastung von Probestäben aus Noral 26 SWP, extrudiert. Für diese Legierung wird die statische Zugfestigkeit mit 35,0 tons/sq.in. angegeben, während die Bruchdehnung, auf eine Länge von  $4\sqrt{F}$  gemessen, 11,0% beträgt. Diese Versuche eignen sich deshalb besonders gut für eine grundsätzliche Auswertung, weil sie einen verhältnismäßig großen Bereich der mittleren Spannung  $\sigma_m$  umfassen und weil auch genügend Versuchswerte vorliegen, um genügend zuverlässige Mittelwerte zu bilden. Die in Fig. 2 eingetragenen Kurven habe ich so gelegt, daß sie den Versuchsmittelwerten möglichst gut entsprechen und dabei aber auch die charakteristische Form der Wöhlerkurven besitzen.

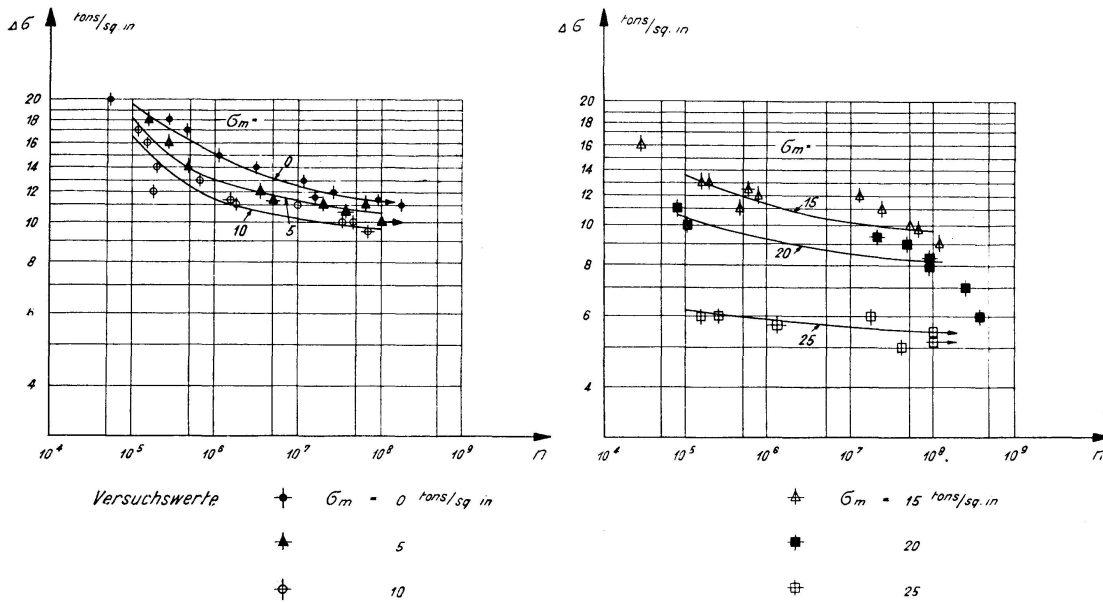


Fig. 2

Eine Schwierigkeit für die Auswertung von Dauerfestigkeitsversuchen beruht darauf, daß die Dauerfestigkeitswerte, bzw. die unter einer bestimmten Beanspruchung  $\sigma_m \pm \Delta \sigma$  ertragenen Lastwechselzahlen  $n = 10^i$  ganz allgemein verhältnismäßig stark streuen. Es ist aus praktischen Gründen wohl kaum möglich, eine so große Anzahl von Versuchen durchzuführen, daß die Versuchsmittelwerte mit großer Genauigkeit dem wirklichen durchschnittlichen Verhalten entsprechen. Um die Versuche trotz dieser Schwierigkeit möglichst zuverlässig auswerten zu können, dürfte folgendes Vorgehen zweckmäßig sein: Wir tragen die Versuchswerte nebeneinander in zwei verschiedenen Darstellungen auf, von denen die eine etwa den Zusammenhang zwischen  $\Delta \sigma$  und der Lastwechselzahl  $n$  mit der Spannung  $\sigma_m$  als Parameter, die andere dagegen beispielsweise den Zusammenhang zwischen  $\Delta \sigma$  und  $\sigma_m$  mit der Lastwechselzahl als Parameter darstellen soll. Da in Wirklichkeit beide Kurvenscharen stetig verlaufen müssen, gelingt es durch gegenseitigen Ausgleich und sukzessive gegenseitige Verbesserungen aus der Forderung der Stetigkeit recht gute Mittelwerte zu bestimmen. Dieser Ausgleich der Versuchswerte ist in Fig. 3 durchgeführt, wobei die den gemittelten Kurven der Fig. 2 entsprechenden Werte als Punkte („Versuchswerte“) eingetragen sind. Der Diskussion der Versuchsergebnisse sollen die Kurvenwerte der Fig. 3 („ausgeglichene Versuchswerte“) zu Grunde gelegt werden.

Wie Fig. 3 zeigt, sind die Streuungen der hier ausgewerteten Versuche etwa im Vergleich zu anderen Dauerversuchen verhältnismäßig klein, das untersuchte Material weist also gleichmäßige Festigkeitseigenschaften auf. Dies erlaubt, aus den ausgeglichenen Versuchswerten relativ zuverlässige Folgerungen zu ziehen.



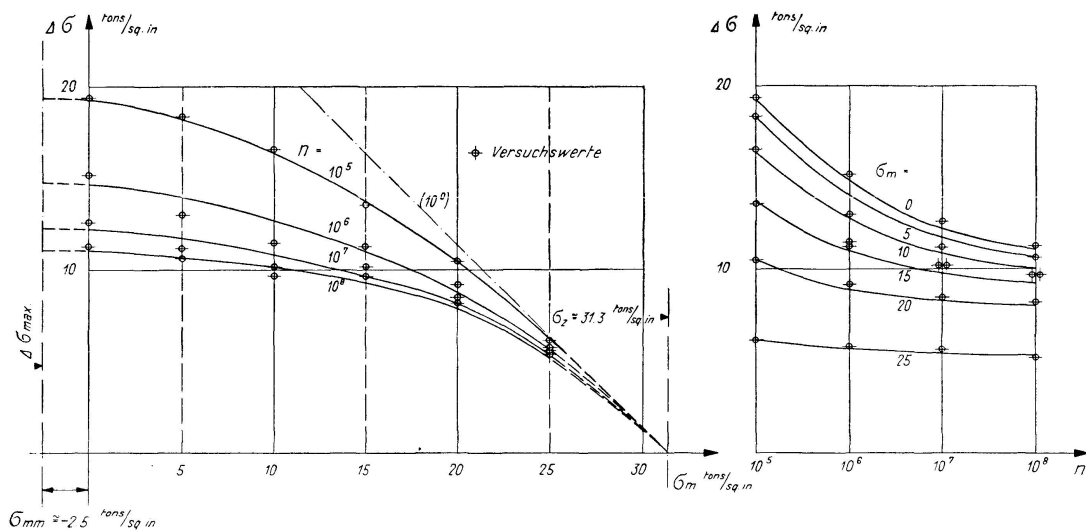


Fig. 3

Die Kurven  $\Delta \sigma - \sigma_m$  der Fig. 3 erlauben nun folgende Feststellungen:

a) Die Kurven  $\Delta \sigma$  schneiden die  $\sigma_m$ -Achse praktisch an der gleichen Stelle, die wir durch möglichst sorgfältige Extrapolation im Mittel zu  $\sigma_m = 31,3$  tons/sq.in. ermitteln können. Dieser Wert stellt offenbar die Zugfestigkeit  $\sigma_Z$  des untersuchten Materials unter langandauernder ruhender Belastung vor. Da aber andererseits die statische Zugfestigkeit, im normalen Zugversuch, also unter kurzfristiger Belastung ermittelt, mit 35,0 tons/sq.in. angegeben wird, ist zu folgern, daß die Dauerzugfestigkeit merklich (hier rund 10%) unter der „normalen“ Zugfestigkeit liegt. Bei der Beurteilung der Dauerfestigkeit ist somit auch für die Zugfestigkeit  $\sigma_Z$  ( $\Delta \sigma = 0$ ) vom Langzeitversuch auszugehen.

b) Die Kurven  $\Delta \sigma$  besitzen bei  $\Delta \sigma = 0$ ,  $\sigma_m = \sigma_Z$  eine gemeinsame Tangente, die die  $\sigma_m$ -Achse unter  $45^\circ$  schneidet. Diese Tangente stellt offensichtlich die  $\Delta \sigma$ -Linie für langdauernde statische Belastung,  $n = 10^0 = 1$ , dar.

c) Die Kurven  $\Delta \sigma$  nähern sich mit abnehmendem  $\sigma_m$  einem Maximum  $\Delta \sigma_{max}$ , das sie jedoch erst für negative Werte von  $\sigma_m$  erreichen. Da die Stelle dieses Maximums für alle Kurven praktisch die gleiche ist, dürfen wir annehmen, daß der entsprechende Wert von  $\sigma_m$ , der mit  $\sigma_{mm}$  bezeichnet werden soll, eine charakteristische Größe des untersuchten Materials darstellt. Es ist naheliegend, anzunehmen, das die Kurven  $\Delta \sigma$  symmetrisch zu diesem Maximum verlaufen; damit wird  $\sigma_{mm}$  zum Mittelwert aus Zug- und Druckfestigkeit des Materials,

$$\sigma_{mm} = \frac{\sigma_Z + \sigma_D}{2}.$$

Für unsere Versuchskurven läßt sich  $\sigma_{mm}$  zu  $-2,5$  tons/sq.in. bestimmen; bei  $\sigma_Z = 31,3$  tons/sq.in. entspricht dies einer Druckfestigkeit  $\sigma_D$  (Dauerversuch) von 36,3 tons/sq.in., was durchaus im Rahmen der allgemeinen Erfahrung liegt.

### 3. Die Kurven $\Delta\sigma - \sigma_m$

Es ist nun offenbar zweckmäßig, die Kurven  $\Delta\sigma - \sigma_m$  auf ihre (vermutete) Symmetrieachse zu orientieren, d. h. die neuen Abszissen

$$\rho_m = \sigma_m - \sigma_{mm} = \sigma_m - \frac{\sigma_Z + \sigma_D}{2}$$

einzuführen. Die Werte  $\Delta\sigma$  verschwinden für  $\rho_m = \rho_0$ , wobei

$$\rho_0 = \frac{\sigma_Z - \sigma_D}{2}$$

bedeutet. In Fig. 4 sind die (ausgeglichenen) Versuchswerte in dieser Darstellung aufgetragen. Dabei erscheinen die Lastwechselzahlen  $n = 10^i$  oder, was für die weitere Darstellung aufschlußreicher ist, die Größtwerte  $\Delta\sigma_{max}$  der Spannungen  $\Delta\sigma$  als Parameter.

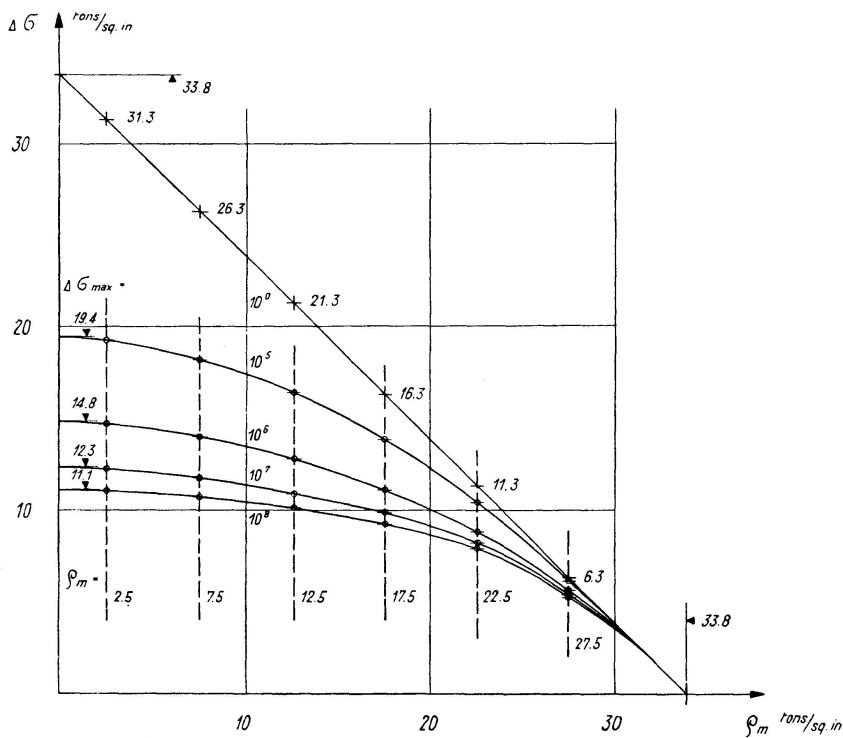


Fig. 4

Um den Charakter dieser Kurven noch besser beurteilen zu können, seien sie noch in einer anderen Darstellung aufgetragen, indem wir Abszissen und Parameter vertauschen. In Fig. 5 sind somit die Spannungen  $\Delta\sigma_{max}$  als Abszissen und die Spannungen  $\rho_m$  als Parameter gewählt.

Es zeigt sich, daß die Kurven  $\Delta\sigma$  der Fig. 5 ihrer allgemeinen Form nach spiegelbildlich zu den Kurven der Fig. 4 verlaufen. Es ist nun äußerst unwahrscheinlich, daß diese Beziehung zwischen den beiden Kurvenscharen eine zufällige ist. Es darf im Gegenteil vermutet werden, daß diese Verwandtschaft den Zusammenhang zwischen den Spannungen  $\Delta\sigma$  und  $\rho_m$  und damit zwischen  $\Delta\sigma$  und  $\sigma_m$  grundsätzlich beherrscht.

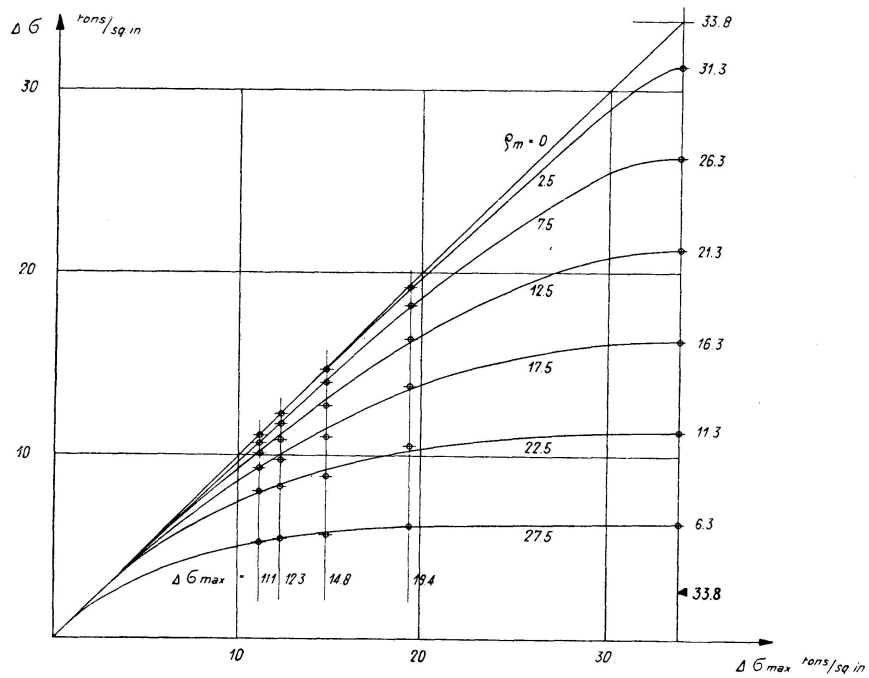


Fig. 5

In Fig. 6 sind für die weitere Diskussion die beiden Kurvenscharen in dimensionslosen Größen aufgetragen, wobei die Bezeichnungen

$$\mu = \frac{\Delta \sigma}{\rho_0}, \quad \mu_0 = \frac{\Delta \sigma_{max}}{\rho_0}, \quad \xi = \frac{\rho_m}{\rho_0}$$

eingeführt wurden. Die Verwandtschaft zwischen den beiden Kurvenscharen wird durch die schraffierten Flächen mit den Ordinaten  $\lambda$  weiter verdeutlicht. Die Kurven  $\mu$  können offenbar auf vier verschiedene Arten ausgedrückt werden; es ist nämlich

$$\mu = 1 - \xi - \lambda(1 - \xi, 1 - \mu_0) = \mu_0 - \lambda(\xi, \mu_0) = \mu_0 - \lambda(\mu_0, \xi) = 1 - \xi - \lambda(1 - \mu_0, 1 - \xi).$$

Die Vertauschbarkeit der Werte  $\mu_0$  und  $\xi$  mit den Werten  $(1 - \xi)$  und  $\mu_0$  bzw.  $1 - \mu_0$  im Sinne der Fig. 6 läßt nun auf Reziprozitäts- und, im Zusammenhang damit, auf Symmetrieverhältnisse sowohl der Kurven  $\lambda$  wie auch direkt

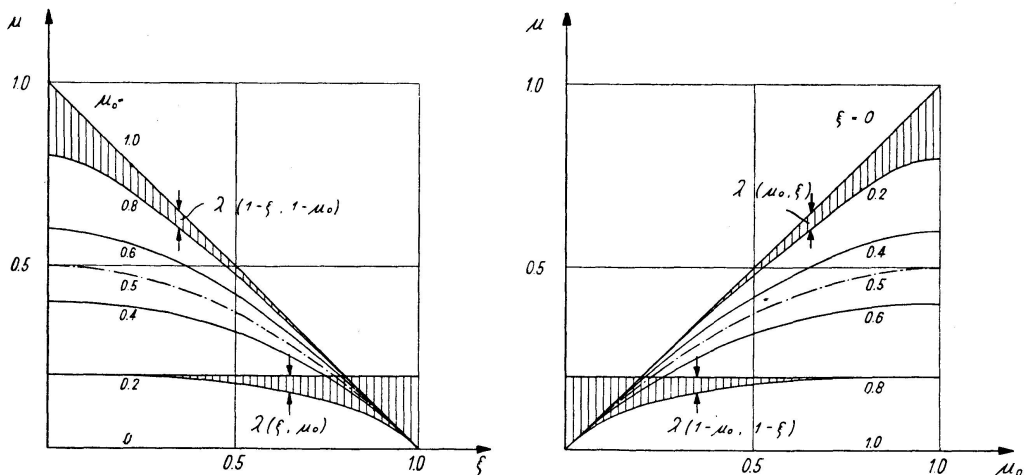


Fig. 6

der Kurven  $\mu$  schließen. Für  $\mu_0 = 0,5$ , bzw.  $\xi = 0,5$  genügt die (in Fig. 6 gestrichelt eingetragene) quadratische Parabel sowohl den Randbedingungen wie auch den Symmetrie- und Reziprozitätsbedingungen der Kurven  $\mu$ .

Auf Grund aller dieser Bedingungen kann für die Kurven  $\mu$  die Beziehung

$$\mu = \frac{\mu_0 \cdot (1 - \xi) \cdot [1 - \mu_0 \cdot (1 - \xi)]}{1 - \mu_0 - \xi + 2\mu_0 \cdot \xi} \quad (1)$$

aufgestellt werden; die folgende Tabelle ist auf Grund dieser Gleichung berechnet:

Tabelle der Werte  $\mu$

$\mu_0 \backslash \xi$	0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
1,0	1,000	0,800	0,600	0,500	0,400	0,200	0
0,8	0,800	0,720	0,567	0,480	0,389	0,198	0
0,6	0,600	0,567	0,480	0,420	0,351	0,189	0
0,5	0,500	0,480	0,420	0,375	0,320	0,180	0
0,4	0,400	0,389	0,351	0,320	0,280	0,167	0
0,2	0,200	0,198	0,189	0,180	0,167	0,120	0
0	0	0	0	0	0	0	0

In Fig. 7 ist noch die Anwendung dieser  $\mu$ -Kurven und ihre Überprüfung durch die Versuche dargestellt. Aus der Darstellung  $\mu - \mu_0$  können für bestimmte Werte  $\mu_0$ , die den Versuchswerten  $\Delta \sigma_{max}$  entsprechen, die zugehörigen Werte von  $\mu$  für verschiedene Werte  $\xi$ ,  $\xi = 0, 0,2, 0,4$  usw., entnommen und damit die Kurven  $\mu - \xi$ , bzw.  $\Delta \sigma - \rho_m$  gezeichnet werden. Die in Fig. 7 eingetragenen Versuchswerte stimmen gut mit den so bestimmten Kurvenwerten überein.

Diese Kurven, die auf Grund der Tabellenwerte leicht aufgetragen werden können, erlauben uns somit, für jeden Wert von  $\mu_0$  die zugehörigen Werte  $\mu$  zu bestimmen. Sobald also die Werte  $\sigma_Z$  und  $\sigma_D$  bekannt sind, sind die Werte  $\Delta \sigma$

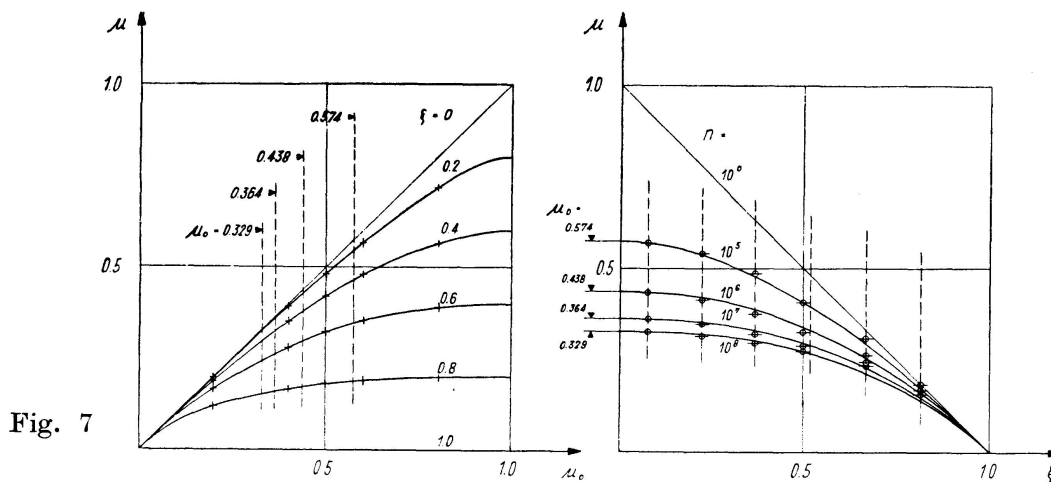


Fig. 7

aus dem Wert  $\Delta \sigma_{max}$  bestimmbar. Da die Kurventafeln unabhängig von den Versuchswerten bestimmt worden sind, darf wohl der Schluß gezogen werden, daß sie, über den untersuchten Fall der Versuchswerte von Noral 26 SWP hinaus, allgemeine Gültigkeit besitzen.

#### 4. Die Wöhlerkurve für $\Delta \sigma_{max}$

Um die Werte  $\Delta \sigma$  für jeden Wert von  $\sigma_m$  bestimmen zu können, fehlt uns noch der Zusammenhang zwischen  $\Delta \sigma_{max}$  und der Lastwechselzahl  $n = 10^i$ , d. h. die Wöhlerkurve für  $\Delta \sigma_{max}$ . Diese Wöhlerkurve muß für  $n = 10^0 = 1$  die Ordinate  $\rho_0$ ,

$$\rho_0 = \frac{\sigma_Z - \sigma_D}{2},$$

besitzen und sich für große Lastwechselzahlen asymptotisch einem Festwert  $\Delta \sigma_0$  nähern. Außerdem ist anzunehmen, daß für eine sehr kleine Zahl von Lastwechseln die Abnahme der Festigkeit gegenüber der statischen Festigkeit nur unbedeutend ist; die Wöhlerkurve muß also für  $n = 10^0$  eine horizontale Tangente besitzen. Diesen Bedingungen entspricht der Ansatz

$$\underline{\Delta \sigma_{max} = \Delta \sigma_0 + (\rho_0 - \Delta \sigma_0) \cdot e^{-\frac{i}{\omega}}.} \quad (2)$$

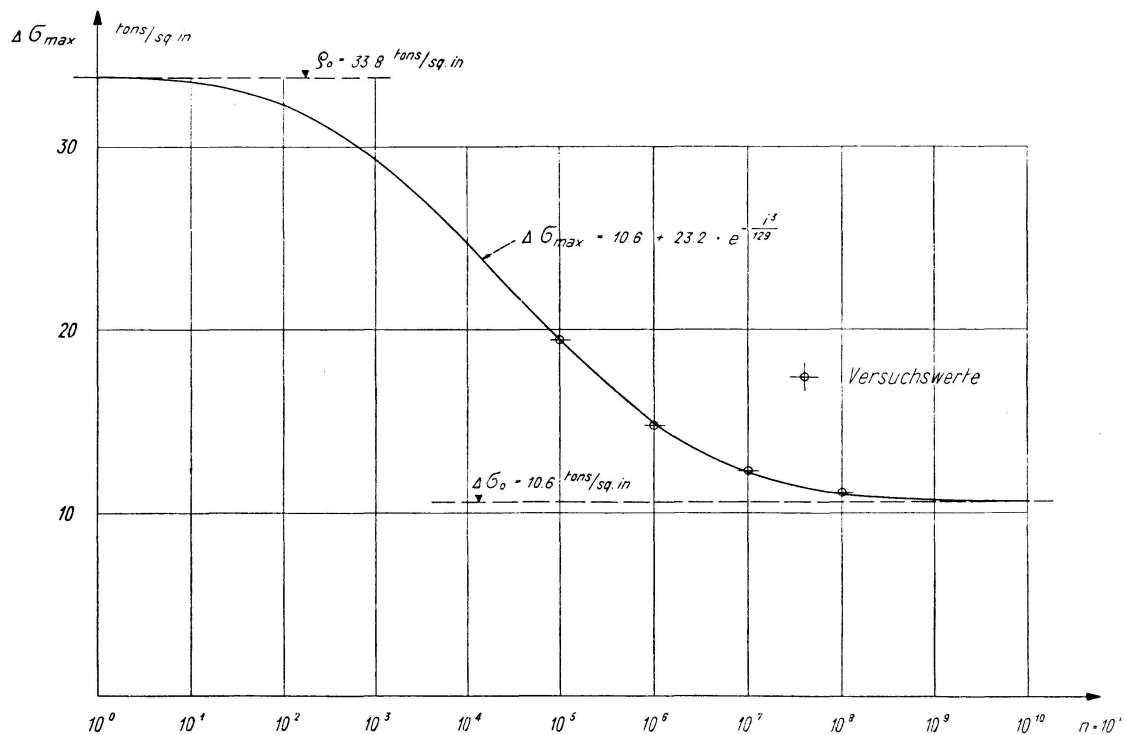


Fig. 8

Für die hier ausgewerteten Versuche habe ich die Werte  $p \cong 3$  und  $\omega \cong 129$  gefunden; mit  $\rho_0 = 33,8$  tons/sq. in. ergibt sich somit die Gleichung der gesuchten Wöhlerkurve zu

$$\underline{\Delta \sigma_{max} = 10,6 + 23,2 \cdot e^{-\frac{i^3}{129}} \text{ (in tons/sq. in.)}}$$

Diese Kurve ist in Fig. 8 aufgetragen und mit den Versuchswerten verglichen. Die Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung ist sehr gut; sie könnte theoretisch durch noch schärfere Bestimmung des Exponenten  $p$  noch etwas weiter verbessert werden.

Es wird selbstverständlich an Hand eines umfassenderen Versuchsmaterials zu untersuchen sein, wie groß der Exponent  $p$  für verschiedene Legierungsarten ist. Dagegen dürfte feststehen, daß der angegebene Ansatz die Wöhlerkurve grundsätzlich gut wiedergibt.

### 5. Schlußbemerkungen

Der hier vorgelegte Versuch einer Theorie der Dauerfestigkeit beschreibt die gesuchten Zusammenhänge mit einer Mindestzahl von Kennwerten, nämlich mit der Zug- und Druckfestigkeit unter statischer Langzeitbelastung und einer Wöhlerkurve. Ich wiederhole, daß die Versuchsgrundlage, die zur Aufstellung dieser Theorie geführt, recht schmal ist; eine Überprüfung durch systematische Versuchsreihen ist deshalb nicht nur erwünscht, sondern notwendig.

P. S. Während der Drucklegung stelle ich fest, daß Prof. W. WEIBULL, Stockholm, in seiner Abhandlung „The statistical aspect of fatigue failures and its consequences“ (Fatigue and Fracture of Metals, edited by W. M. Murray, Massachusetts Institute of Technology, 1952) in Erweiterung eines Vorschlages von E. Epremian, Carnegie Institute of Technology, den gleichen Ansatz wie unsere Gleichung 2 zur Darstellung der Wöhlerkurve von Stahl verwendet hat.

F. St.

### Zusammenfassung

Ausgehend von Versuchen der Aluminium Laboratories Limited in Banbury (England) an Probestäben aus der Aluminiumlegierung Noral 26 SWP wurde versucht, eine Theorie der Dauerfestigkeit aufzustellen, die die Spannung  $\Delta \sigma$ ,

$$\Delta \sigma = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2},$$

in Funktion der mittleren Spannung  $\sigma_m$ ,

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2},$$

aus der Zug- und Druckfestigkeit des Materials unter Langzeitbelastung und aus der Wöhlerkurve für  $\Delta \sigma_{max}$  zu bestimmen erlaubt. Für die Wöhlerkurve wurde ein genügend anpassungsfähiger Ausdruck angegeben.

Da die Versuchsgrundlage dieser Theorie schmal ist, wird sie durch weitere systematische Versuchsreihen zu überprüfen sein.

### Summary

Basing on tests made by Aluminium Laboratories Limited, Banbury, England, on specimen in aluminium alloy Noral 26 SWP, the author tried to establish a theory on the endurance strength where the stress  $\Delta \sigma$ ,

$$\Delta \sigma = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2},$$

in function of the mean stress  $\sigma_m$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2},$$

may be determined from the properties of the material under tension and compression under long-term loads and from the Wöhler curve for  $\Delta \sigma_{max}$ .

For the Wöhler curve a sufficiently adaptable equation was found.

As this theory has been established basing on small scale tests it will have to be checked by further systematical test series.

### Résumé

En se basant sur des essais effectués par les Aluminium Laboratories Limited, à Banbury (Angleterre), sur des éprouvettes en alliage léger Noral 26 SWP, l'auteur se propose d'établir une théorie de la résistance à la fatigue qui permette de déterminer la contrainte  $\Delta \sigma$

$$\Delta \sigma = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2},$$

en fonction de la contrainte moyenne  $\sigma_m$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2},$$

à partir de la résistance à la traction et à la compression dans le cas d'une application de longue durée de la charge, et de la courbe de Wöhler pour  $\Delta \sigma_{max}$ . Il indique pour la courbe de Wöhler une expression se prêtant suffisamment bien à l'adaptation.

Cette théorie, appuyée sur des bases expérimentales très limitées, nécessite des essais systématiques ultérieurs, aux fins de contrôle.