Zeitschrift: Nachrichten aus der Eisen-Bibliothek der Georg-Fischer-Aktiengesellschaft

Herausgeber: Eisenbibliothek

Band: - (1965)

Heft: 31

Artikel: Die Ermüdung von Eisen und Stahl und anderen Metallen

Autor: Stüssi, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-378078

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 05.12.2025

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

DIE ERMÜDUNG VON EISEN UND STAHL UND ANDEREN METALLEN

VORTRAG VON PROF. DR. F. STÜSSI, ZÜRICH

I.

Als mich vor einigen Monaten Herr Dr. M. H. Schneebeli, Generaldirektor der Georg Fischer Aktiengesellschaft, Schaffhausen, der Stifterin der Eisenbibliothek, anfragte, ob ich bereit sei, an der diesjährigen Tagung den Vortrag zu halten, habe ich ohne Zögern und mit grosser Freude zugesagt. Ich betrachte die Stiftung Eisenbibliothek als eine derart hochwertige kulturelle Leistung, dass es für mich eine Auszeichnung bedeutet, in irgendeiner Form an der Verwirklichung ihrer Ziele mitzuwirken. Mit ihr hat sich ihr Schöpfer, Herr Dr. h. c. Ernst Müller, ein Denkmal geschaffen, wie man es sich schöner wohl kaum vorstellen kann. Dass auch Gefühle der Dankbarkeit und Verehrung gegenüber diesem hervorragenden Manne, der Ernst Müller war, bei meiner Zusage mitgespielt haben, ist wohl selbstverständlich.

Zunächst habe ich die Wahl meines Themas zu rechtfertigen. In erster Linie wollte ich ein Thema auswählen, das im Rahmen der Tätigkeitsgebiete der Eisenbibliothek liegt. Die Frage der Ermüdung von Eisen und Stahl oder überhaupt der Metalle ist für jeden, der mit der Herstellung, Prüfung oder Verarbeitung von Metallen zu tun hat, von entscheidend wichtiger Bedeutung. Wenn ich schon die Freude und die Ehre habe, hier im Ernst-Müller-Zimmer zu sprechen, dann habe ich den Wunsch, einen Fragenkomplex zu behandeln, mit dem ich durch eigene Arbeit in Beziehung stehe. Endlich möchte ich noch erwähnen, dass die Georg Fischer Aktiengesellschaft der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich zu ihrem hundertjährigen Jubiläum 1955 einen grösseren Geldbetrag zur Unterstützung der Forschung geschenkt hat; aus dieser Schenkung Fischer hat mir damals der Präsident des Schweizerischen Schulrates den Kredit für die Anschaffung eines zweiten Hochfrequenzpulsators, Bauart Amsler, Schaffhausen, bewilligt; auch diese Beziehung spricht für die Wahl meines Themas.

II.

Das Problem der Ermüdung ist auch im alltäglichen Leben nicht unbekannt. Man kann etwa darauf hinweisen, dass nach dem Absturz eines Flugzeuges vom Typ Comet vor einigen Jahren das zuständige Gericht als Absturzursache eindeutig einen Ermüdungsbruch festgestellt hat. Ich möchte ferner jenen Roman «No Highway» von Nevil Shute (London 1948) erwähnen, in dem die ganze Spannung der Handlung durch das Ermüdungproblem verursacht wird.

Wohl wir alle kennen diese Erscheinung der Ermüdung auch aus unserer eigenen Jugendzeit. Wenn bei Bastelarbeiten ein Eisendraht entzweigeschnitten werden musste und wir kein geeignetes Werkzeug besassen, dann konnte dieser Draht durch wiederholtes Hin- und Herbiegen entzweigebrochen werden. Herr Professor Dr. R. Durrer hat mich kürzlich in einem Gespräch daran erinnert, dass man bei diesem Hin- und Herbiegen, dicht am Ohr ausgeführt, ein feines Geräusch hören konnte. Bei jeder dieser Biegungen muss also im Draht etwas vor sich gehen.

Gerade dieser Fall des Bruches eines Drahtes durch wiederholtes Hin- und Herbiegen ist auch in der frühen technischen Literatur erwähnt, nämlich im Buche «Practical Essay on the Strength of cast Iron and other Metals» (London 1822) des ausgezeichneten Ingenieurs Thomas Tredgold. Tredgold braucht in Schaffhausen nicht besonders vorgestellt zu werden, denn wir verdanken ihm die wohl schönste Würdigung der Rheinbrücke Schaffhausen von Johann Ulrich Grubenmann in seinem Buche «Elementary Principles of Carpentry»:

> "The french army, in 1799, destroyed the celebrated bridge across the Rhine at Schaffhausen; but the fame of Grubenmann the carpenter will long continue; and the form of that excellent specimen of the art will only cease to be remembered, when carpentry itself no longer exists."

In der Einleitung zu seinem Buche über Guss-

eisen überliefert Tredgold auch jenen sarkastischen Spruch

"The stability of a building is inversely proportional to the science of the builder"

und zwar im Hinblick auf gewisse Darstellungen der Festigkeitslehre, die an den Bedürfnissen der Konstruktionspraxis vorbeigehen. In einer Fussnote schreibt er über unser Problem folgendes:

"But, in a great number of substances, we seem to have an instinctive knowledge of this property of matter: a bent wire retains its curvature; and it may be broken by repeated flexure, with much less force than would break it at once: indeed, when we attempt to break any flexible body, it is usually by bending and unbending it several times, and its strength is only beyond the effort applied to break it when we have not power to give it a permanent set at each bending. A permanent alteration is a partial fracture, and hence it is the proper limit of strength."

Wir finden hier ein erstes Merkmal des Ermüdungsvorganges mit aller Deutlichkeit ausgesprochen: Die Änderungen, die auch hörbar sind und die Tredgold als einen Teilbruch bezeichnet, bedeuten eine Schädigung des Materials, und der Ermüdungsbruch beruht auf einer Anhäufung von solchen Schädigungen bis zum Bruch.

Tredgold schreibt ferner:

"I was led into this important inquiry by considering the proportions for cannon, and the common method of proving them. It appears from my experiments, that firing a certain number of times with the same quantity of powder would burst a cannon when the strain is above the elastic force of the material, though the effect of the first charge might not be sensible."

Er gibt uns damit einen wichtigen Hinweis, wo wir nach früheren Erkenntnissen über den Ermüdungsvorgang zu suchen haben. Im Buche «Artilleriae Recentior Praxis oder Neuere Geschützbeschreibung» des Stück-Hauptmannes Michael Miethen (Frankfurt und Leipzig 1683) finden wir am Anfang des ersten Kapitels über das Formen der Geschütze folgende Feststellung:

«Daß Formen des Geschützes betreffend / muß auf dasselbe / mehr Fleiß gewendet werden / alß auff einige Sache in der Welt / so von Metall gegossen wird / dann wo in diesen der geringste Mangel erscheinet / kan solcher zwar / in etwas vertuschet werden / daß Pulver aber entdecket selbigen bald / und leidet keine Flikkerey wie bey andern Sachen / als Statuen und dergleichen.»

Wichtig sind hier zwei Punkte. Es wird deutlich erkannt, dass ein Unterschied zwischen ruhender oder statischer Belastung, wie sie bei Statuen vorkommt, und zeitlich veränderlichen Belastungen, wie sie beim Abfeuern eines Geschützes auftreten, vorliegt, und zweitens ist wichtig die Feststellung, dass der Bruch, hervorgerufen durch wiederholte Schädigung des Materials, von einer kleinen Fehlstelle ausgeht. Wenn wir diesen «geringsten Mangel», den Michael Miethen erwähnt, als eine Fehlstelle im Aufbau des Atomgitters deuten, dann können wir feststellen, dass schon vor rund 300 Jahren eine qualitativ durchaus zutreffende Vorstellung des Ermüdungsvorganges vorhanden war.

Für einen Geschützmeister war es sicher wichtig zu wissen, wie viele Schüsse er aus einem bestimmten Geschütz mit einer bestimmten Ladung schiessen konnte. Er war einerseits daran interessiert, möglichst starke Ladungen zu verwenden, um möglichst weit schiessen zu können, aber er musste andererseits diese Ladungsgrösse auch beschränken, damit seine Geschütze möglichst lange gebrauchsfähig blieben. Wir können uns sehr wohl einen Geschützmeister dieser Zeit vorstellen, der praktische Versuche über diese Frage durchgeführt hat, wenn ihm sein Kriegsherr dazu die nötigen Geldmittel zur Verfügung stellte. Mit diesen Versuchen war der Zusammenhang zwischen der Ladungsgrösse und der Zahl der möglichen Schüsse aus dem gleichen Geschützrohr festzustellen. Wir können uns auch vorstellen, dass dieser Geschützmeister die Versuchsergebnisse in einem Diagramm (d. h. in einem kartesischen Koordinatensystem, René Descartes, 1596—1650) dargestellt hat, das etwa durch unsere Abbildung 1 wiedergegeben werden kann. Eine derartige Kurve nennen wir heute zu Ehren von August Wöhler (1819—1914) eine Wöhlerkurve.

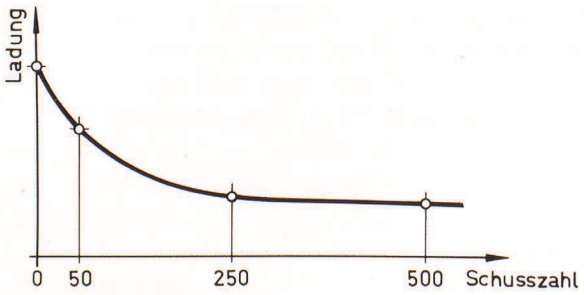

Abb. 1

III.

August Wöhler hat das Problem der Ermüdung erstmals in einer langjährigen, systematischen Versuchsforschung untersucht, um die Ursache für den Bruch von Eisenbahnwagenachsen abzuklären. Die Ergebnisse seiner Versuche hat er 1870 in seinem «Wöhler'schen Gesetz»[1]) zusammengefasst:

> «Der Bruch des Materials läßt sich auch durch vielfach wiederholte Schwingungen, von denen keine die absolute Bruchgrenze erreicht, herbeiführen. Die Differenzen der Spannungen, welche die Schwingungen eingrenzen, sind dabei für die Zerstörung des Zusammenhanges maaßgebend. Die absolute Größe der Grenz-Spannungen ist nur insoweit von Einfluß, als mit wachsender Spannung die Differenzen, welche den Bruch herbeiführen, sich verringern.»

Dieses Gesetz ist eine qualitative Aussage. Es liefert uns keine Zahlenwerte, die dem Konstrukteur als Grundlage zur Bemessung seiner Tragwerke dienen könnten. Es ist heute eine Notwendigkeit, dass das Wöhler'sche Gesetz nach der quantitativen Seite ergänzt wird. Es handelt sich dabei um folgende Problemstellung: Ein Tragwerk, das veränderlichen Belastungen, von denen Abbildung 2 einen kleinen Ausschnitt darstellt, unterworfen ist, muss seine Aufgabe während langer Zeit erfüllen können. Diese erwünschte

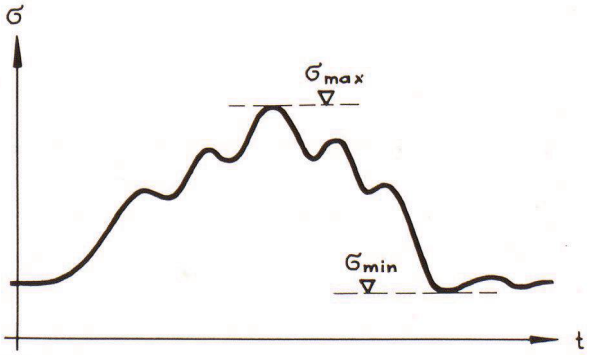

Abb. 2

Betriebsdauer wird bei einem Flugzeug einige Jahre, bei einer Maschine Jahrzehnte, bei einer Brücke jedoch Jahrhunderte betragen, und wir müssen wissen, ob eine Konstruktion die im Laufe dieser langen Zeit auftretenden Beanspruchungen mit ausreichender Sicherheit erträgt oder nicht. Die Lösung dieses Problems interessiert verschiedene Kreise, nämlich den Physiker, denn es handelt sich ja um ein physikalisches Problem, den Metallurgen, der Metalle herstellen will, die ihre Aufgabe während langer Zeit erfüllen können, den Materialprüfer, der der Konstruktionspraxis die Festigkeitswerte der verschiedenen Baustoffe liefern muss, wenn auch vielleicht erst in einer statistischen Form, und vor allem interessiert das Problem den Konstrukteur, der ja die Verantwortung für das gute Verhalten seiner Schöpfungen nur übernehmen kann, wenn er das Materialverhalten während langer Zeit kennt.

Nun ist es leider so, dass wir heute die physikalischen Grundlagen noch nicht kennen, aus denen eine quantitative Lösung des Ermüdungsproblems abgeleitet werden könnte. Mit dieser etwas pessimistischen Feststellung befinde ich mich in der guten Gesellschaft von ausgezeichneten Kennern des Ermüdungsproblems, wie Professor L. Locati in Turin oder Professor W. Weibull, Stockholm. So schreibt Professor Locati[2]):

> «Siamo lontani dal conoscere con esattezza le leggi della fatica: tuttavia l'enorme lavoro sperimentale sviluppato consente di impostare un calcolo di verifica abbastanza soddisfacente»,

und Professor Weibull[3]) stellt fest:

> "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."

Wir befinden uns somit in der Zwangslage, eine quantitative Lösung des Ermüdungsproblems finden zu müssen, auch wenn für ein deduktives Vorgehen die dafür erforderlichen grundlegenden physikalischen Erkenntnisse uns noch nicht zur Verfügung stehen. Dies zwingt uns, einen anderen Weg zu gehen, einen Weg, der in vielen Gebieten der Naturwissenschaften, vor allem in der Biologie, auch begangen werden muss: Wir müssen die Lösung auf phänomenologischem

[1]) A. Wöhler: «Über die Festigkeits-Versuche mit Eisen und Stahl», Zeitschrift für Bauwesen, Jahrgang XX, Berlin 1870.

[2]) L. Locati: «La fatica nelle costruzioni metalliche», Costr.Met., 1961, No. 2.

[3]) 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.

Wege suchen, d. h. wir müssen die Natur durch den Versuch selber fragen; aber wir erhalten nur dann eine brauchbare Antwort, wenn wir unsere Frage durch richtige Versuchsanordnung auch richtig formulieren. Um eine Lösung auf phänomenologischem Wege zu finden, wird es notwendig, das ganze komplexe Problem in eine Reihe von möglichst einfachen Einzelfragen aufzuteilen, und wir müssen die Bescheidenheit aufbringen, uns zunächst auf die Lösung einer solchen einfachsten Einzelfrage zu beschränken, und zwar auch dann, wenn dies Jahre dauern sollte. Dies ist die Besonderheit der Problemstellung, wie ich sie heute bei der Ermüdung sehe.

IV.

Eine erste Vereinfachung des komplexen Problems ist dadurch möglich, dass wir den wirklichen Belastungsvorgang idealisieren; wir betrachten einen glatten Stab, dessen Beanspruchung sich zwischen zwei festen Spannungsgrenzen

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

bewegt (Abbildung 3). Aber auch diese Frage

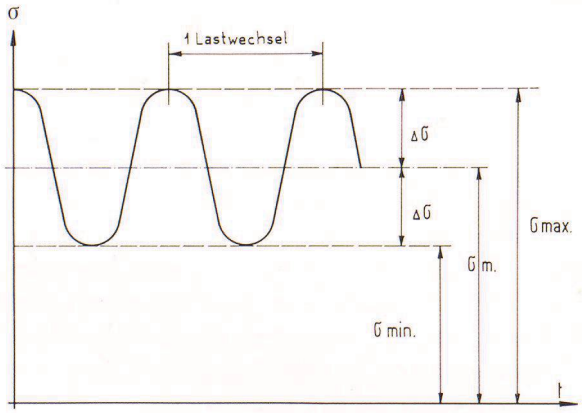

Abb. 3

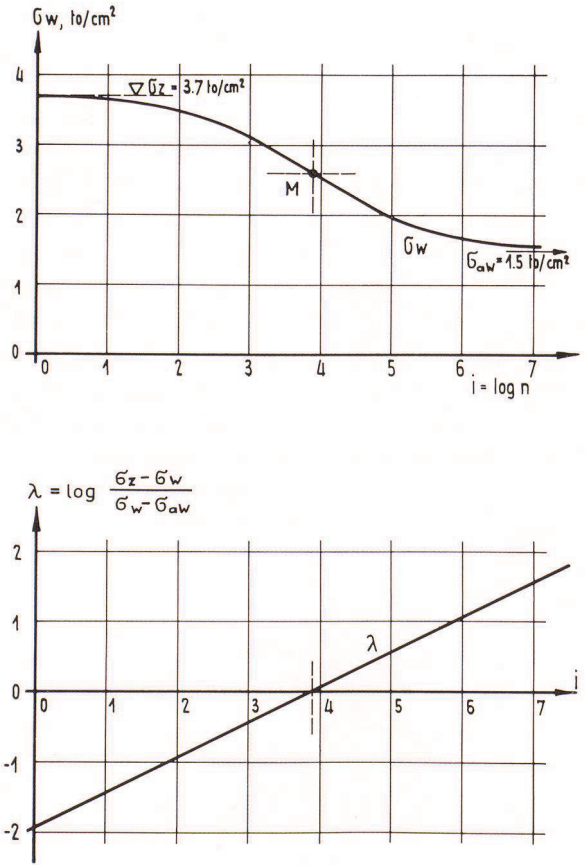

Abb. 4

muss nochmals unterteilt werden, indem wir zuerst einen Spannungswert, beispielsweise die Mittelspannung σ_m und als zweite Frage die Zahl der Lastwechsel konstant halten. In einer weiteren Stufe ist der Einfluss von Kerbwirkungen, wie er bei gelochten oder geschweissten Stäben vorkommt, zu untersuchen, und endlich ist die Kombination verschiedener Spannungsverläufe zu untersuchen, um daraus wenn möglich ein konkretes Bild über den Vorgang der Schadenshäufung zu gewinnen. Dabei ist es Aufgabe einer aufzustellenden Theorie, das Ermüdungsverhalten mit einer möglichst kleinen Anzahl von Kennwerten zuverlässig zu umschreiben.

Als erste Aufgabe stellen wir uns die Frage nach der Lastwechselzahl n, die bei konstanter Mittelspannung σ_m für die verschiedenen Werte von $\Delta\sigma$, oder für $\sigma_{max} = \sigma_m + \Delta\sigma$ den Ermüdungsbruch verursacht. Wir suchen somit die sogenannte Wöhlerkurve für konstante Mittelspannung σ_m (Abbildung 4). Es ist zweckmässig, für die Darstellung dieser Wöhlerkurve nicht die Lastwechselzahl n selber als Abszisse einzuführen, sondern ihren Logarithmus $i = \log n$, weil die Kurve auf diese Weise entzerrt wird. Die Kurve der Wechselfestigkeit beispielsweise, $\sigma_m = 0$, in Abbildung 4 für normalen Baustahl St. 37 dargestellt, bewegt sich zwischen den Grenzen der sta-

tischen Zugfestigkeit σ_{oZ} (konventioneller Kurzzeitversuch der Zugfestigkeit) und dem asymptotischen Endwert σ_{aW}. Es bestehen verschiedene Möglichkeiten, eine solche Kurve durch eine Formel oder einen analytischen Ausdruck zu erfassen. Beispielsweise können wir den Wert der Wechselfestigkeit als gewogenes Mittel der beiden Grenzwerte σ_{oZ} und σ_{aW} formulieren, wobei wir der statischen Zugfestigkeit σ_{oZ} das Gewicht 1, dem asymptotischen Grenzwert σ_{aW} der Wechselfestigkeit dagegen das von der Lastwechselzahl abhängige Gewicht f_W geben. Damit ergibt sich

$$\sigma_W = \frac{\sigma_{oZ} + f_W \cdot \sigma_{aW}}{1 + f_W}. \qquad [1]$$

Eine solche Lösung kann nun entweder eine empirische Näherung sein, die zufällig die untersuchte Kurve mit guter Annäherung darstellt, oder sie kann, wenn wir Glück haben, auch mehr sein, nämlich die eigentliche Lösung der Aufgabe. Sie muss dann nicht nur alle untersuchten Versuchsreihen zutreffend erfassen, sondern die Gewichtsfunktion f_W muss auch einen natürlichen Verlauf besitzen. Es zeigt sich nun bei allen bisher überprüften Versuchsreihen, dass diese zweite Bedingung erfüllt ist, indem sich nämlich für den Logarithmus λ_W dieser Gewichtsfunktion f_W ein linearer Zusammenhang mit dem Logarithmus der Lastwechselzahl ergibt:

$$\lambda_W = \log f_W = p \cdot i + \lambda_o \qquad [1a]$$

oder

$$f_W = a^{\lambda_W} = f_{oW} \cdot n^p. \qquad [1b]$$

Damit besitzt die Kurve σ_W nach Gleichung 1 einen Wendepunkt M für $f_W = 1.0$, $\lambda_W = 0$ mit

$$i_M = -\frac{\lambda_o}{p}, \quad \sigma_M = \frac{\sigma_{oZ} + \sigma_{aW}}{2}.$$

Abbildung 5 zeigt die Auswertung amerikanischer

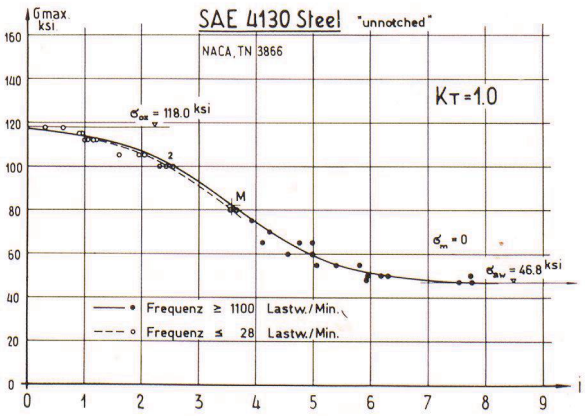

Abb. 5

Versuche über die Wechselfestigkeit eines Flugzeugstahles «SAE 4130 Steel»[4]). Die Übereinstimmung zwischen den Versuchswerten und der berechneten Kurve darf wohl als gut bezeichnet werden. Es macht sich hier auch der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit bemerkbar; die Lastwechselzahlen für den Bruch in einem Pulsator kleinerer Frequenz liegen deutlich und systematisch etwas tiefer als für den Pulsator hoher Frequenz.

Wir wenden uns nun der zweiten Teilfrage zu, nämlich der Bestimmung der Grösstspannung σ_{max} für eine konstant gehaltene Lastwechselzahl n (Abbildung 6). Auch bei dieser Kurve sind an sich verschiedene Möglichkeiten der Formulie-

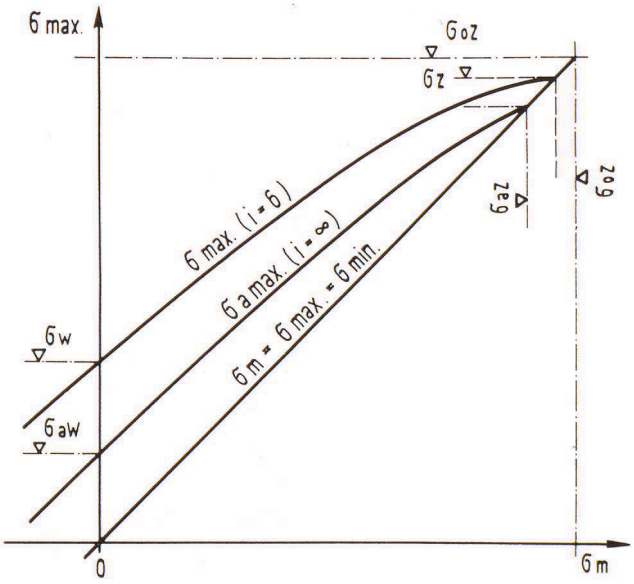

Abb. 6

rung denkbar. Nun muss eine solche Formulierung aber auch eine Besonderheit erfassen können, die bei den meisten Aluminiumlegierungen auftritt, dass nämlich die halbe Schwingungsweite $\Delta\sigma$ nicht erst bei einer Mittelspannung $\sigma_m = \sigma_{oZ}$ verschwindet, wie dies für warm gewalzten Stahl der Fall ist, sondern schon vorher bei $\sigma_m = \sigma_Z < \sigma_{oZ}$. Es handelt sich um eine Erscheinung, die vergleichbar ist mit der Abnahme der statischen Zugfestigkeit unter langdauernder Belastung, wie wir das für Stähle bei hohen Tem-

[4]) W. Illg: «Fatigue Tests on notched and unnotched Sheet Specimens of 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum Alloys and SAE 4130 Steel with special Consideration of the Life Range from 2 to 10000 cycles», NACA, Technical Note 3866, 1956.

peraturen kennen. Es zeigt sich, dass diese Kurve durch den Zusammenhang

$$\varkappa^2 = \frac{\sigma_{oZ} \cdot (\sigma_{oZ} - \sigma_m) \cdot (\sigma_W - \Delta\sigma) - \sigma_m \cdot \sigma_W \cdot \Delta\sigma}{\sigma_m - \sigma_W + \Delta\sigma} \quad [2]$$

erfasst wird. Dabei bedeutet $\varkappa^2$ eine Kriechkonstante oder sogar Kriechinvariante, die nicht nur von der Lastwechselzahl, sondern auch vom gewählten Koordinatenursprung unseres Diagrammes unabhängig ist. Für warm gewalzten Stahl ist $\varkappa^2 = 0$. Führen wir die Abkürzungen

$$c_1 = \frac{\sigma_{oZ} \cdot \sigma_W + \varkappa^2}{\sigma_{oZ}^2 + \varkappa^2} = \frac{\sigma_W}{\sigma_Z}, \quad c_2 = \frac{\sigma_{oZ} - \sigma_W}{\sigma_{oZ}^2 + \varkappa^2} = \frac{\sigma_Z - \sigma_W}{\sigma_Z \cdot \sigma_{oZ}}$$

ein, so ergibt sich die halbe Schwingungsweite zu

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_W - c_1 \cdot \sigma_m}{1 - c_2 \cdot \sigma_m}. \quad [2a]$$

Dieser Ausdruck gilt somit für jede Lastwechselzahl und damit auch für die asymptotischen Endwerte:

$$\Delta\sigma_a = \frac{\sigma_{aW} - c_{1a} \cdot \sigma_m}{1 - c_{2a} \cdot \sigma_m} \quad [2b]$$

mit

$$c_{1a} = \frac{\sigma_{aW}}{\sigma_{aZ}}, \quad c_{2a} = \frac{\sigma_{aZ} - \sigma_{aW}}{\sigma_{aZ} \cdot \sigma_{oZ}}.$$

Abbildung 7 zeigt als Beispiel die Auswertung von Ermüdungswerten, die im «ALCOA Structural Handbook», 1945, angegeben sind. Diese Ermüdungswerte dürfen als ausgeglichene Versuchswerte betrachtet werden.

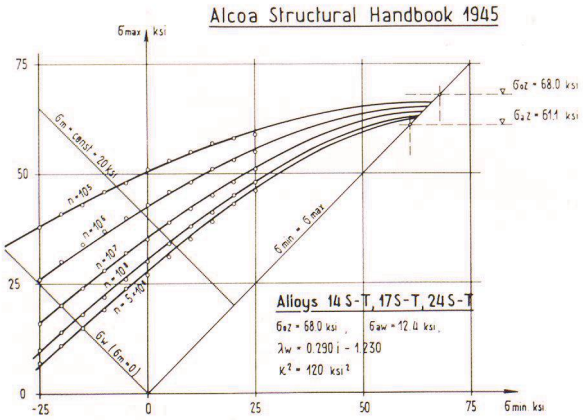

Abb. 7

Nun zeigt sich etwas Überraschendes und zugleich Erfreuliches: Setzen wir nämlich in Gleichung 2a den Wert der Wechselfestigkeit σ_W nach Gleichung 1 ein, wobei dieser gleiche Wert von σ_W auch in den Koëffizienten c_1 und c_2 einzusetzen ist, so ergibt sich nach kurzer Zwischenrechnung ein Ausdruck für die halbe Schwingungsweite $\Delta\sigma$, der in der Form genau der Gleichung 1 entspricht, nämlich

$$\Delta\sigma = \frac{(\sigma_{oZ} - \sigma_m) + f_m \cdot \Delta\sigma_a}{1 + f_m} \quad [1c]$$

oder auch

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \Delta\sigma = \frac{\sigma_{oZ} + f_m \cdot \sigma_{amax}}{1 + f_m}$$

mit

$$f_m = f_W \cdot (1 - c_{2a} \cdot \sigma_m).$$

Damit ist ein innerer Zusammenhang zwischen den beiden behandelten Teilfragen hergestellt, der wohl kaum ein reiner Zufall sein kann. Wir können somit für die Spannungen σ_{max} zu jeder Mittelspannung σ_m Wöhlerkurven analog zu Abbildung 4 darstellen, wobei die zugehörigen λ-Geraden ihre Neigung beibehalten und sich nur parallel verschieben. Der Exponent p erhält damit den Charakter einer Materialkonstanten.

V.

Die angegebenen Zusammenhänge, die für glatte Probestäbe, also ungekerbtes Material, gelten, sind nun noch auf gekerbte Stäbe zu erweitern. Abbildung 8 zeigt mit Versuchsergebnissen von M. Roš und A. Eichinger[5]) an gelochten Stahlstäben ohne Walzhaut den typischen Verlauf der Kurve $\sigma_{max} - \sigma_m$ mit einem Krümmungswechsel.

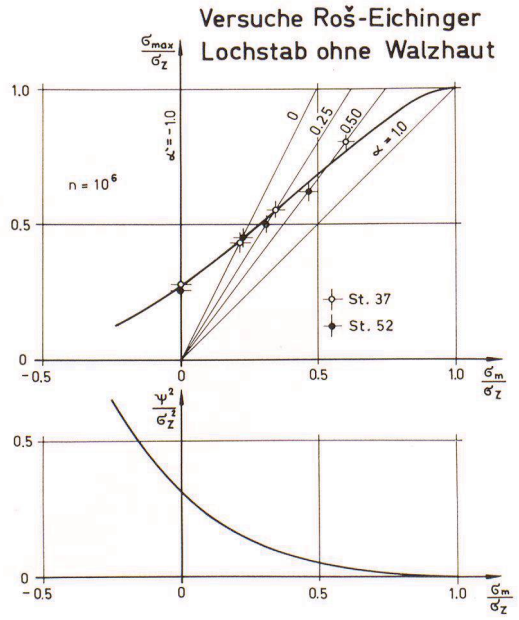

Abb. 8

[5]) M. Roš und A. Eichinger: «Die Bruchgefahr fester Körper bei wiederholter Beanspruchung — Ermüdung — Metalle», EMPA-Bericht Nr. 173, Zürich 1950.

Auch für die analytische Erfassung dieser Kurve bestehen grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten, doch zeigt sich, nach verschiedenen Versuchen, die mich auf die Dauer nicht befriedigten, dass die Lösung durch Erweiterung der Gleichung 2 zu suchen ist:

$$\varkappa^2 + \psi^2 = \frac{\sigma_{oZ} \cdot (\sigma_{oZ} - \sigma_m) \cdot (\sigma_{kW} - \Delta\sigma_k) - \sigma_m \cdot \sigma_{kW} \cdot \Delta\sigma_k}{\sigma_m - \sigma_{kW} + \Delta\sigma_k}. \qquad [2c]$$

Die Kerbfunktion ψ^2 ist wieder von der Lastwechselzahl unabhängig, jedoch nicht mehr eine Konstante wie $\varkappa^2$, sondern abhängig von der Mittelspannung σ_m. Bei allen bisher untersuchten Versuchsreihen verläuft diese Kerbfunktion nach einer Kettenlinie und kann somit angeschrieben werden in der Form:

$$\psi^2 = \psi_o^2 \cdot \frac{\operatorname{Cosh} \omega x - 1}{\operatorname{Cosh} \omega - 1} \qquad [2d]$$

wobei

$$x = 1 - \frac{2\,\sigma_m}{\sigma_{oZ} + \sigma_{aZ}}.$$

Die Kerbfunktion enthält also zwei Kenngrössen, nämlich ψ_o^2 (entsprechend $\sigma_m = 0$) und ω. Es scheint, dass der Wert von ω im ganzen nur wenig variiert, dagegen ist ψ_o^2, bzw. ψ_o^2/σ_{oZ}^2 stärker veränderlich und drückt offenbar eine gewisse Veränderlichkeit in der Kerbempfindlichkeit des Materials aus, die somit nicht nur im asymptotischen Endwert der Wechselfestigkeit σ_{kaW} zum Ausdruck kommt. Es ist eine Aufgabe der nächsten Untersuchungen festzustellen, ob für diese Kennwerte bestimmte Zusammenhänge vorliegen oder nicht.

Mit der Form der Gleichung 2 c zusammen mit der Langzeitgleichung 1 ist damit das Ermüdungsverhalten allgemein in geschlossener Form umschrieben. Es gelten grundsätzlich die für den glatten Stab angegebenen Beziehungen, und vor allem gilt Gleichung 1 c auch für den gekerbten (gelochten oder geschweissten) Stab, wobei wiederum die Kennziffer p der Langzeitbeziehung für ein bestimmtes Material erhalten bleibt. Für warm gewalzten Stahl verschwindet auch beim Kerbstab die Kriechinvariante $\varkappa^2$.

In den Abbildungen 9 und 10 sind eigene Versuchsergebnisse an Lochstäben aus «Stahl von Roll» dargestellt, während die Abbildungen 11 und 12 die entsprechenden Ergebnisse der Al-Zn-Legierung UNIDUR der Schweizerischen Aluminium AG zeigen. Ich möchte hier Herrn Professor Dr. Durrer, der mir das Material für die Probestäbe aus Stahl kostenlos zur Verfügung

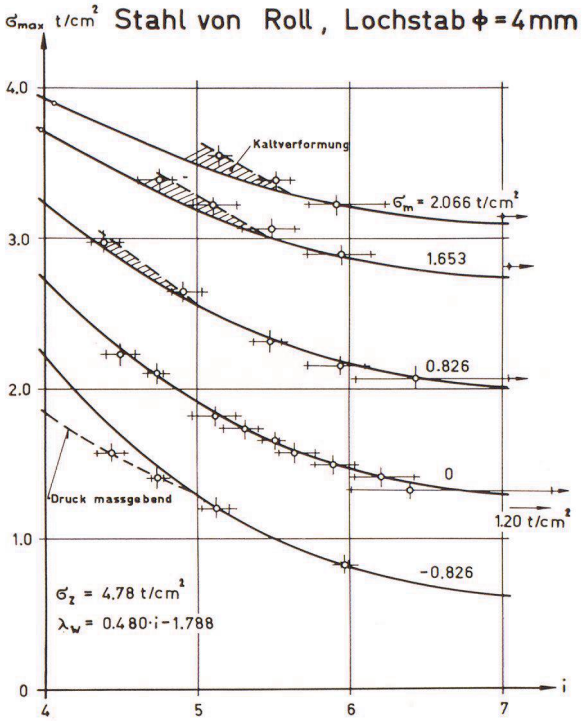

Abb. 9

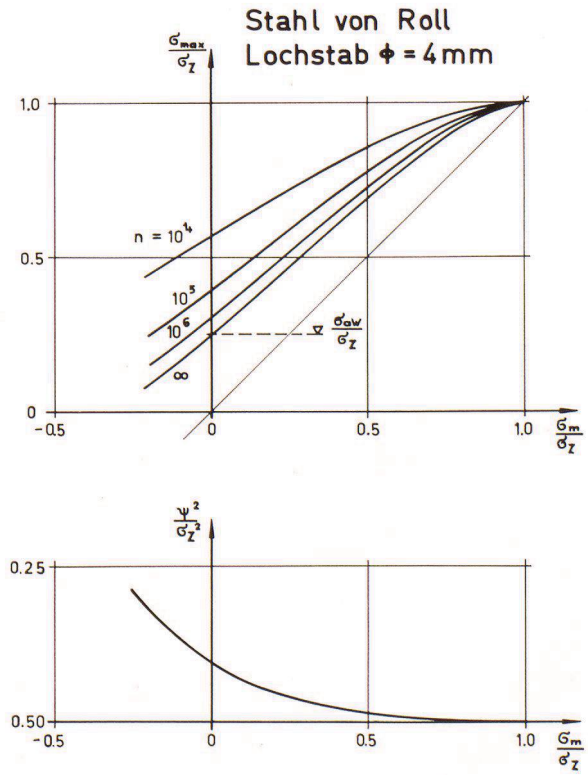

Abb. 10

gestellt hat und ganz besonders auch Herrn Direktor K. Guler von der Schweizerischen Aluminium AG, der mich seit Jahren bei diesen Ermüdungsuntersuchungen unterstützt, bestens danken. Dankbar erwähnen möchte ich aber auch meinen getreuen Mitarbeiter, Herrn E. Peter, technischer Assistent, der seit Jahren unermüdlich und mit stets gleichbleibender Zuverlässigkeit unsere Versuche durchführt.

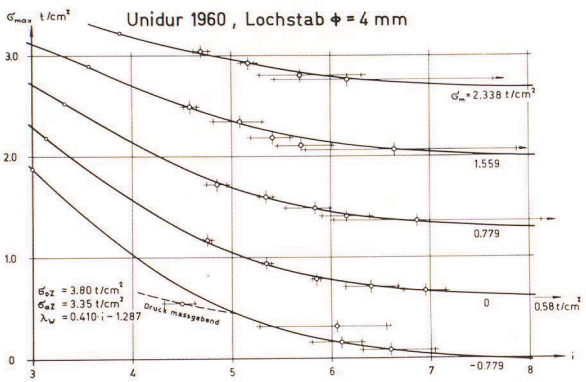

Abb. 11

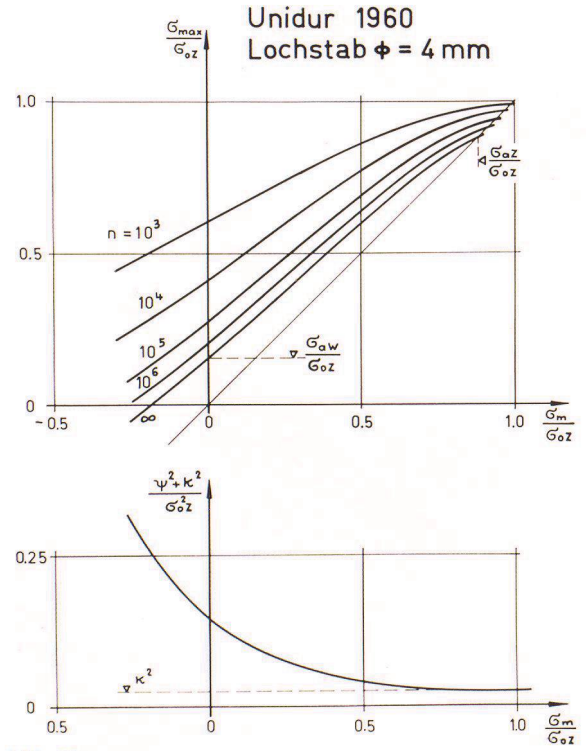

Abb. 12

VI.

Die Aufstellung einer Ermüdungstheorie auf phänomenologischem Weg hat mit zwei gewichtigen Schwierigkeiten zu rechnen, nämlich mit den unvermeidlichen Streuungen der Versuchswerte und zweitens mit einem zusätzlichen Einfluss, den ich einer Kaltverformung zuschreibe. Dass Streuungen bei Ermüdungsversuchen unvermeidlich sind und auch recht gross sein können, ist wohl in allen Laboratorien bekannt. Man könnte wohl daran denken, zur Bestimmung eines einzelnen Versuchswertes eine sehr grosse Zahl von Einzelversuchen durchzuführen, um möglichst zuverlässige Mittelwerte zu erhalten, doch ist dieses Vorgehen normalerweise wegen des erforderlichen grossen Zeitaufwandes nicht gangbar. Es bleibt deshalb nichts anderes übrig, als die Versuchsergebnisse vor der Auswertung möglichst sorgfältig auszugleichen, ausgehend davon, dass sowohl die Wöhlerkurven σ_{max} für verschiedene Mittelspannungen σ_m wie auch die Kurven σ_{max}-σ_m für verschiedene Lastwechselzahlen n nicht nur stetig verlaufen, sondern auch stetig zusammenhängen müssen. Da die Fehler der Versuche infolge von Streuungen im Sinne der Ausgleichsrechnung grundsätzlich als grobe Fehler zu bewerten sind, kommt ein Fehlerausgleich mit Hilfe der Gauss'schen Methode der kleinsten Quadrate leider nicht in Betracht. Der Ausgleich von Versuchsergebnissen erfordert Erfahrung und Fingerspitzengefühl und ist deshalb häufig nicht einfach. Abbildung 13 zeigt zur Veranschaulichung dieser Verhältnisse Versuche der Aluminium Laboratories Ltd. in Banbury (England) an vollen Probestäben der Aluminiumlegierung Noral 26 SW. Es ist wohl einleuchtend, dass

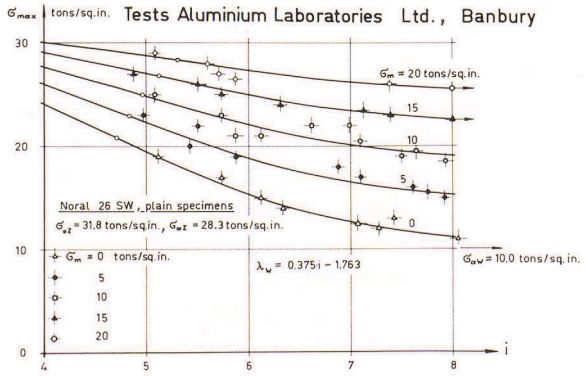

Abb. 13

derartige Versuche mit grösseren Streuungen, wie sie jedoch normalerweise durchaus vorkommen können, keine Aufstellung einer Theorie gestatten, aber sie können dazu dienen, bei entsprechendem Ausgleich der Versuchswerte zu prüfen, ob die aufgestellte Theorie auch hier

wenigstens im Rahmen der offensichtlichen Streuungsgrössen zutrifft.

Die zweite Schwierigkeit besteht darin, dass gelegentlich bei grösseren Spannungswerten eine Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit gegenüber den theoretisch zu erwartenden Werten eintritt. Dieser Einfluss ist beispielsweise in den schraffierten Zwickeln der Abbildung 9 (Lochstab Stahl von Roll) zu erkennen. Ein weiteres Beispiel ist in Abbildung 14 mit Versuchen der Aluminiumlegierung 2024-T3 von W. Illg[4]) dargestellt.

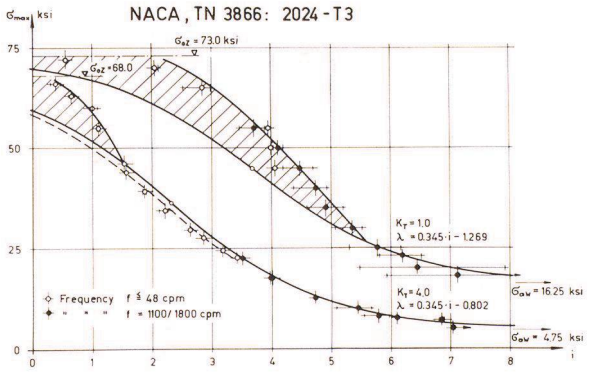

Abb. 14

Aus diesen Versuchen zeigt sich, dass dieser Störungseinfluss mit wachsender Kerbwirkung zurücktritt. Sehr deutlich ist dieser gleiche Einfluss auch bei den Versuchen von Hartmann, Holt und Eaton[6]) (Abbildung 15) zu erkennen. Dieser Einfluss dürfte einer Kaltverformung durch die Beanspruchungen während der ersten Lastwechsel zuzuschreiben sein. Diese Erklärung wird bestätigt durch Versuche von J. O. Lyst[7]) an Aluminiumstäben mit und ohne vorgängige Kaltverformung (Abbildung 16). Es zeigt sich hier, dass der Einfluss der Kaltverformung nur für relativ kleine Lastwechselzahlen eintritt («low cycle fatigue»), dass er dagegen für diejenigen Lastwechselzahlen, mit denen wir beispielsweise bei Maschinen und Brücken rechnen müssen, vollständig verschwindet. Es dürfte sich somit bei diesem Kaltverformungseinfluss um eine metastabile Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit handeln.

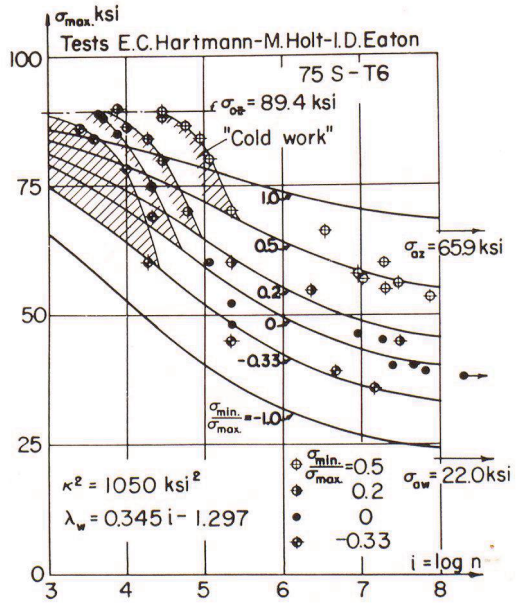

Abb. 15

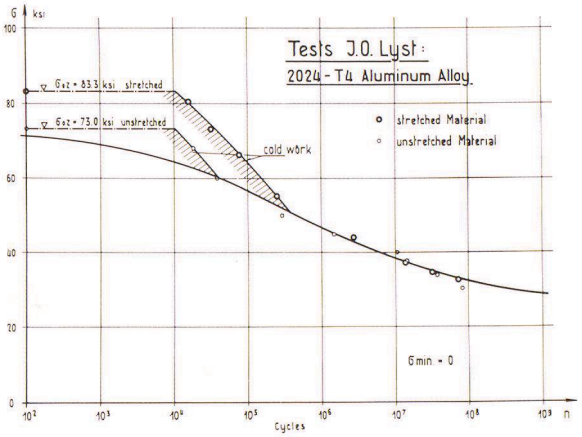

Abb. 16

VII.

Es darf heute festgestellt werden, dass die Bedeutung des Ermüdungsvorganges mehr und mehr anerkannt wird. Als Beweis dafür sei mit Abbildung 17 auf die Ermüdungsversuche an Strassenbrücken aus Stahl hingewiesen, die in den letzten Jahren von der American Association of State Highway Officials[8]) vorgenommen worden sind. Diese Versuche zeigen deutlich, dass auch bei Strassenbrücken die Ermüdungsgefahr besteht, wenn das Material zu hoch beansprucht wird und sie geben einen deutlichen Hinweis dafür, dass bei der Festsetzung der zulässigen Be-

[6]) E. C. Hartmann, M. Holt and I. D. Eaton: «Static and Fatigue Strengths of High-Strength Aluminum-Alloy bolted Joints», NACA, Technical Note 2276, 1951.

[7]) J. O. Lyst: «Effects of Stretching on the Fatigue Strength of 2024-T4 Aluminum-Alloy», Materials, Research and Standards, Sept. 1962.

[8]) J. W. Fisher and I. M. Viest: «Fatigue Life of Bridge Beams subjected to controlled Truck Traffic», 7. Kongress der IVBH, Rio de Janeiro 1964 — Vorbericht.

anspruchungen für Stahltragwerke die Ermüdungsgefahr entsprechend zu berücksichtigen ist, derart, dass Ermüdungsbrüche an Tragwerken, auch bei langer Betriebsdauer, ausgeschlossen bleiben.

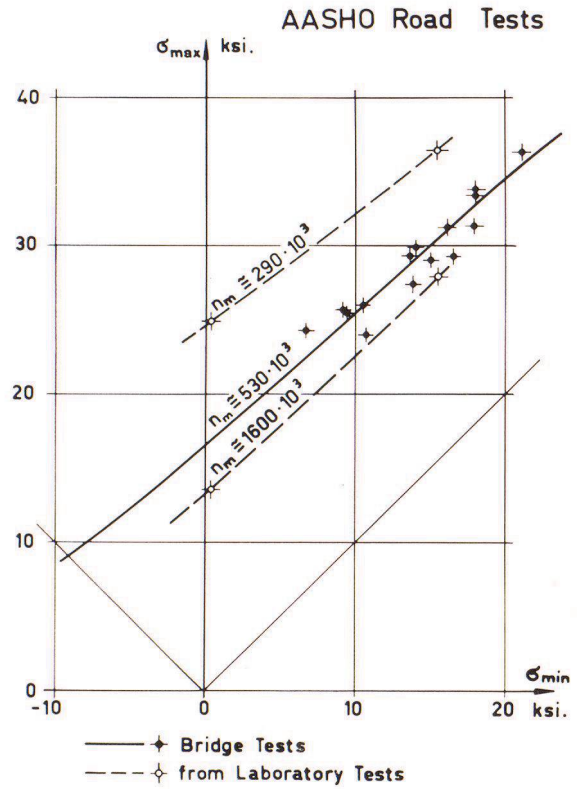

Abb. 17

VIII.

Es zeigt sich, dass die in Gleichung 1 angegebene Beziehung auch weitere Langzeitvorgänge an Baustoffen zutreffend zu erfassen vermag. Einige Beispiele sollen dies beleuchten. Abbildung 18

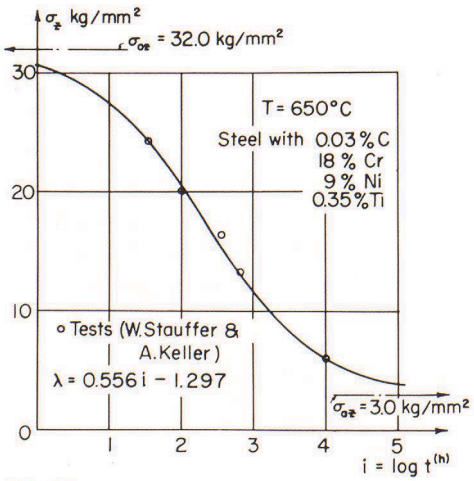

Abb. 18

zeigt Versuche von W. Stauffer und A. Keller[9]) über die Zeitstandfestigkeit von Stahl bei hoher Temperatur.

Mit Relaxation bezeichnen wir die Spannungsverminderung, die in einem vorgespannten Draht bei konstant gehaltener Länge eintritt; Abbildung 19 zeigt die Auswertung von solchen Rela-

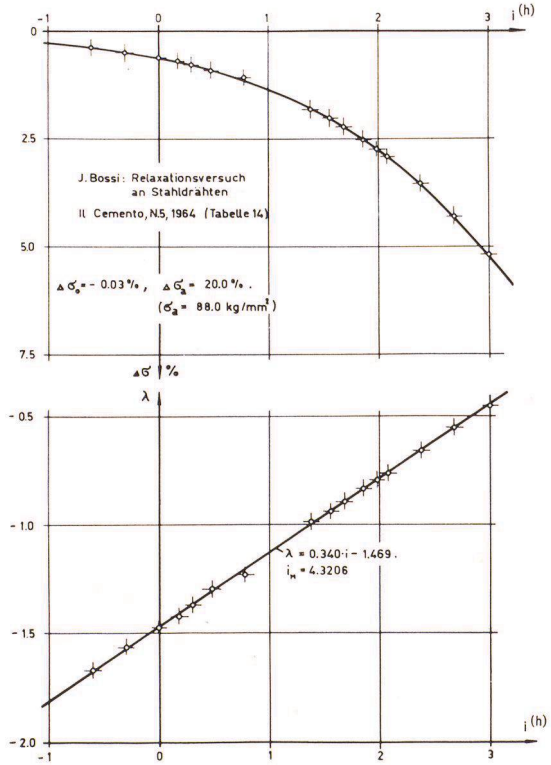

Abb. 19

xationsversuchen von J. Bossi[10]), während in Abbildung 20 die Auswertung von belgischen Kriechversuchen von R. de Strycker[11]) dargestellt ist. Endlich ist mit Abbildung 21 noch das Kriechen von Beton nach Versuchen von T. C. Hansen gezeigt[12]).

[9]) W. Stauffer und A. Keller: «Durchführung von Zeitstandsversuchen im Vielstabofen mit kleiner Stabform», Schweizer Archiv, 22. Jhg., Heft 10, 1956.

[10]) J. Bossi: «Prove di rilassamento su fili di acciaio», Pubblicazione No 128, Istituto di Scienza delle Costruzioni, Politecnico di Milano – Estratto da «Il Cemento», No. 5, 1964.

[11]) R. de Strycker: Comptes rendus de recherches de l'I.R.S.I.A. no 24: «Travaux du comité pour l'étude du fluage des métaux aux températures ordinaires (Recherches des Centres de Liège et de Louvain)», Bruxelles 1960.

[12]) T. C. Hansen: «Creep of Concrete. The Influence of Variations in the Humidity of the ambient Atmosphere», 6. Kongress der IVBH, Stockholm 1960, Thema I — Vorbericht.

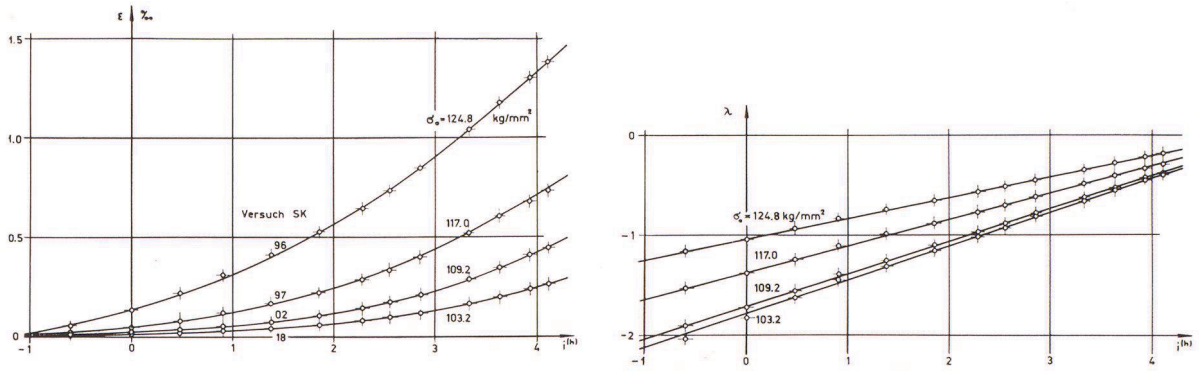

Abb. 20

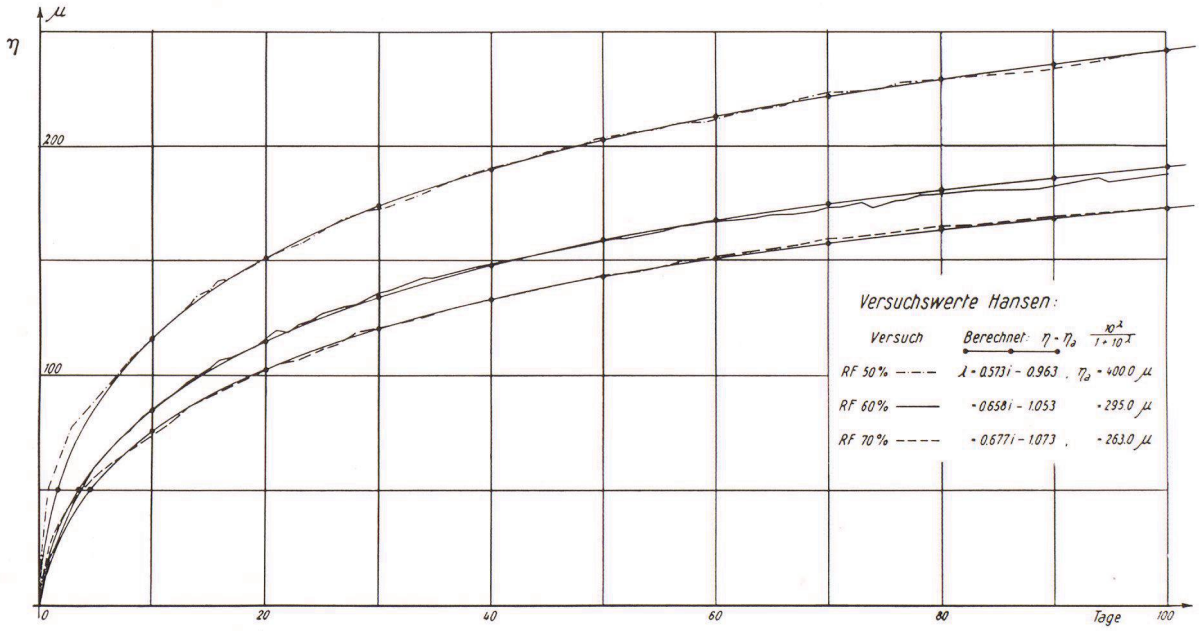

Abb. 21

IX.

Mit den folgenden Bildern möchte ich zum Schluss meinen Standpunkt präzisieren. Es ist der Standpunkt des Stahlbauers, der seine Bauwerke so zu entwerfen hat, dass sie auf lange Zeit vollwertig ihren Dienst leisten. Der Stahlbau hat in den letzten Jahrzehnten eine äusserlich erkennbare Entwicklung in der Richtung auf möglichst einfache und klare Bauformen aufzuweisen. Unter den hervorragenden Bauwerken früherer Generationen, die heute noch vollwertig ihre Dienste leisten, dürfte wohl in erster Linie der Eiffelturm in Paris, der dieses Jahr 75 Jahre alt geworden ist, erwähnt werden; Abbildung 22 zeigt die erste Entwurfsskizze zu diesem Bauwerk, aufgestellt vom Culmann-Schüler Maurice Koechlin. Aber auch die berühmte Eisenbahnbrücke über den Firth of Forth, eröffnet 1890, ist nur wenig jünger als der Eiffelturm. In ihrer unmittelbaren Nähe steht die neue Strassenbrücke über den Firth of Forth, eine Hängebrücke von rund 1000 Meter Spannweite, die am 4. September 1964 von der Königin von England eröffnet worden ist. Abbildung 23 zeigt somit zwei Meisterwerke der Brückenbaukunst und veranschaulicht einen wichtigen Entwicklungsabschnitt des Stahlbaues.

Die heutige Kunst des Hängebrückenbaues verdankt ihren entscheidenden Impuls der George-Washington-Brücke über den Hudson River in New York, mit der O. H. Ammann von Schaff-

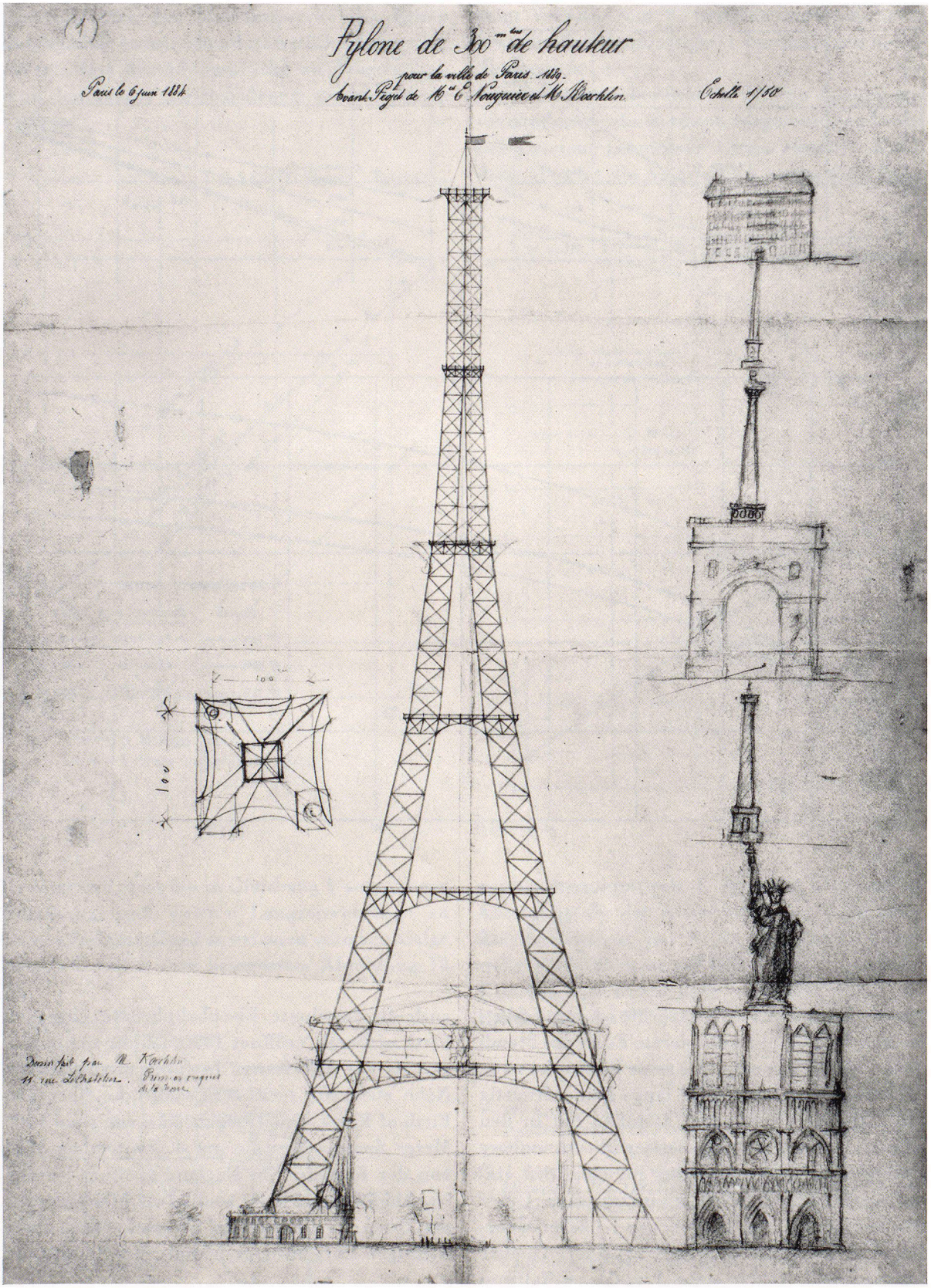

Abb. 22

hausen 1931 zum ersten Mal in unserer Geschichte eine Spannweite von mehr als 1000 Meter verwirklicht hat. Von Anfang an ist eine spätere Vergrösserung der Verkehrskapazität geplant

worden, und 1962 ist die ausgebaute Brücke mit zwei Fahrbahnebenen in Betrieb genommen worden (Abbildung 24). Das letzte und grösste Brükkenbauwerk ist die Verrazano-Narrows-Brücke über die Hafeneinfahrt von New York, mit einer Spannweite von beinahe 1300 Meter, ebenfalls von O. H. Ammann erbaut (Abbildung 25). Dieses neueste Bauwerk von O. H. Ammann wird von späteren Generationen wohl als das Meisterwerk der Brückenbaukunst unserer Zeit angesehen werden.

Bauwerke sind so zu entwerfen, dass sie während langer Zeit ihre Dienste leisten können. Eine der Bedingungen, die somit erfüllt werden muss, ist die, die einzelnen Bauteile so zu bemessen, dass die Gefahr von Ermüdungsbrüchen auch nach langer Zeit ausgeschlossen bleibt. Das ist der Grund dafür, dass sich der Konstrukteur eingehend mit dem Ermüdungsproblem zu beschäftigen hat und dass er gezwungen ist, sich selber eine phänomenologische Theorie des Ermüdungsvorganges aufzustellen, solange es nicht möglich ist, eine Ermüdungstheorie aus physikalischen Grundtatsachen abzuleiten.

Die hier skizzierten Versuche stellen damit einen Beitrag zu dieser Konstruktionsgrundlage dar. Sie werden, wie alle phänomenologisch gefundenen Erkenntnisse, stets durch neue Versuche überprüft und wenn nötig verbessert werden müssen. Auch ist eine Ergänzung durch Abklärung des eigentlichen Schädigungsvorganges dringend erwünscht und darum eine Aufgabe der näheren Zukunft. Es wäre erfreulich, wenn diese Zusammenhänge über ihre direkte Konstruktionsaufgabe hinaus dem Physiker helfen könnten, die eigentlichen physikalischen Grundgesetze solcher Langzeitvorgänge aufzuzeigen, um die Forschung auf diesem Gebiete abzuschliessen.

Abb. 23

Abb. 24
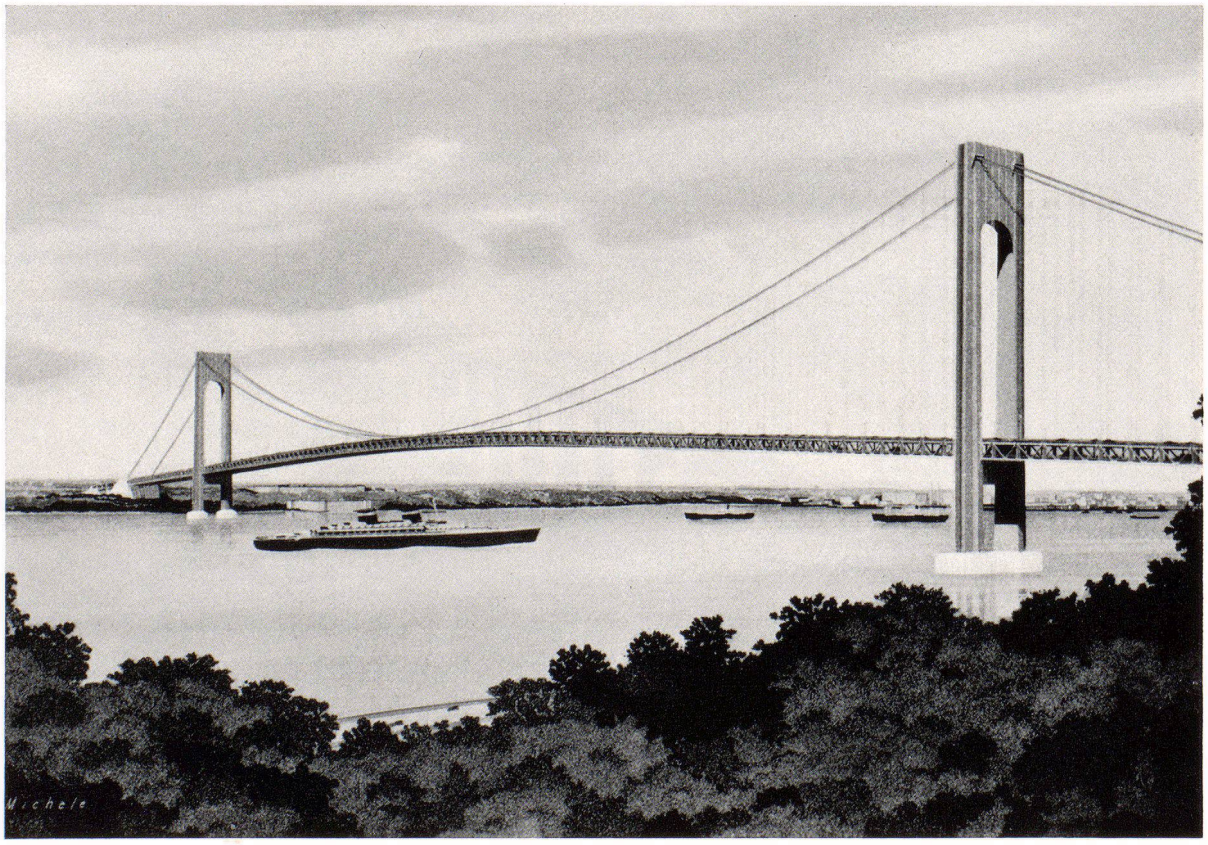
Abb. 25