

Zeitschrift: IABSE publications = Mémoires AIPC = IVBH Abhandlungen

Band: 2 (1933-1934)

Artikel: Die Dauerfestigkeit von Niet- und Schweissverbindungen und die Bemessung dynamisch beanspruchter Konstruktionsteile auf Grund der aus Dauerversuchen gewonnenen Erkenntnisse

Autor: Schaechterle, K.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-3410>

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: 17.01.2026

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

DIE DAUERFESTIGKEIT VON NIET- UND SCHWEISS- VERBINDUNGEN

**UND DIE BEMESSUNG DYNAMISCH BEANSPRUCHTER KONSTRUKTIONSTEILE
AUF GRUND DER AUS DAUERVERSUCHEN GEWONNENEN ERKENNTNISSE.**

**LA DURABILITÉ DES ASSEMBLAGES RIVÉS ET SOUDÉS, ET LE
DIMENSIONNEMENT DES ÉLÉMENTS SOLICITÉS DINAMIQUEMENT,
BASÉ SUR LES RÉSULTATS D'ESSAIS À LA DURABILITÉ.**

**ON THE FATIGUE STRENGTH OF RIVETED AND WELDED JOINTS
AND THE DESIGN OF DYNAMICALLY STRESSED STRUCTURAL MEM-
BERS BASED ON CONCLUSIONS DRAWN FROM FATIGUE TESTS.**

Dr. Ing. K. SCHAECHTERLE, Stuttgart.

I.

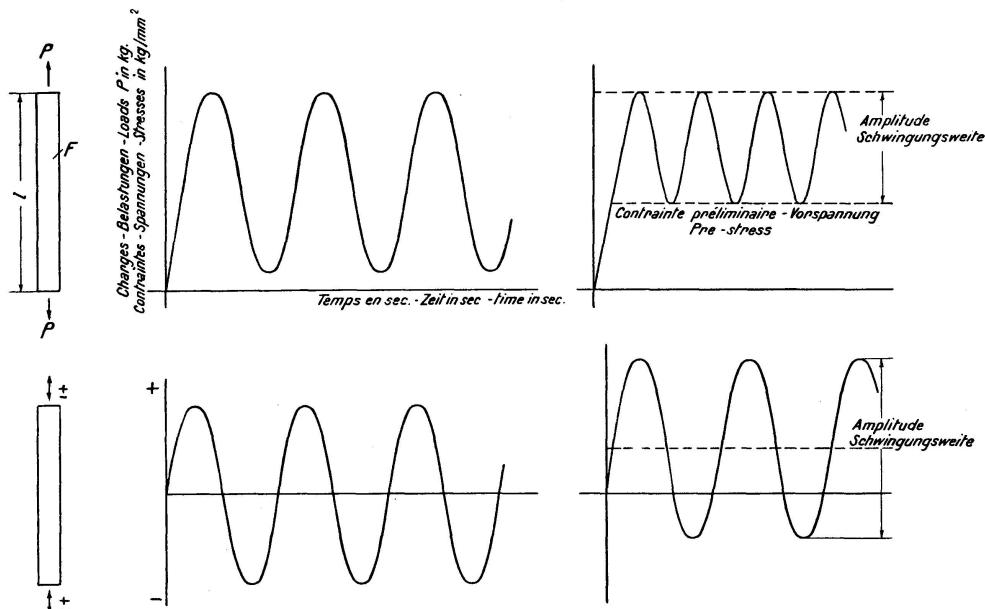
Unsere Erkenntnisse über die Grenzen der Anstrengungen, die ein Werkstoff, ein Konstruktionselement, ein Bauglied oder ein ganzes Tragwerk unter der Einwirkung oftmals wiederkehrender Lastwechsel auf die Dauer aushalten kann, ohne zu brechen, sind seit den bahnbrechenden Forschungsarbeiten WÖHLERS und BAUSCHINGERS wesentlich erweitert und vertieft worden. Insbesondere ist es durch den planmäßigen Ausbau der Dauer- und Wechselfestigkeitsprüfung gelungen, zuverlässige Unterlagen für die Festigkeitsrechnungen der Konstrukteure und für die Bemessung dynamisch beanspruchter Konstruktionsteile zu schaffen. Dank der Initiative von Geheimrat Dr. Ing. E. H. SCHAPER und der Unterstützung durch die Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft und den Deutschen Stahlbau-Verband ist eine der wichtigsten und vordringlichsten Aufgaben der wissenschaftlichen Versuchsforschung auf dem Gebiete des Stahlbrückenbaus — nämlich die Erkundung der Dauerfestigkeiten von Niet- und Schweißverbindungen — mit Erfolg in Angriff genommen worden. Die in den Jahren 1928—1932 an der Materialprüfungsanstalt der Technischen Hochschule Stuttgart unter Leitung von Prof. O. GRAF durchgeführten Dauerversuche¹⁾ haben neue wertvolle Erkenntnisse über das Wesen der Niet- und Schweißverbindungen vermittelt und zur Klärung strittiger Fragen der Berechnung, Bemessung und Gestaltung von genieteten und geschweißten Konstruktionen beigetragen.

Die Dauerfestigkeiten (von LAUNHARDT Arbeitsfestigkeiten genannt) sind abhängig von der Art der Anstrengung, z. B. oftmals wiederholte schwellende Beanspruchungen auf Zug oder Druck, oftmals wiederholte Wechsel zwischen Zug- und Druckbeanspruchungen u. s. w., wobei die Lastspiele vom spannungslosen Zustand oder von einer beliebigen Grundspannung (Vorspannung) ausgehen können oder die überlagernden Spannungen um eine mittlere Spannung pendeln (Fig. 1). Der erstgenannte Fall liegt bei Brücken vor, wo die Grundspannungen aus der ständigen Last (Eigengewicht) durch

¹⁾ Bautechnik 1928, Hefte 7 und 8. Stahlbau 1929, Hefte 11 und 12; 1930, S. 277; 1931, S. 89 und S. 258; 1932, S. 65. Bautechnik 1932, Hefte 22, 23, 44 und 45.

die Spannungen aus den veränderlichen (bewegten) Lasten überlagert werden; der zweite Fall der Schwingungen spielt im Maschinen- und Flugzeugbau eine ausschlaggebende Rolle.

Die Anstrengungen, die zum Bruche führen, erreichen ihren niedrigsten Wert in der „Zugdruckwechselfestigkeit“ bei millionenfach wiederholtem Wechsel gleich großer Zug- und Druckspannungen, ihren größten Wert — „statische Bruchfestigkeit“ — bei einmaliger und stetig bis zum Bruch ansteigender Belastung. Die Anstrengungsgrenze bei schwelender Belastung von Null bezw. einer sehr kleinen Grundspannung ausgehend wird als „Ursprungsfestigkeit“ bezeichnet und liegt beim gewöhnlichen Baustahl (St 37) in der Nähe der Streckgrenze. Bei Anstrengungen, die zum überwiegenden



*Essai de fatigue. Sollicitation aux efforts répétés alternés et non alternés (traction et compression).
Dauerversuche. Schwell- und Wechselbeanspruchung auf Zug u. Druck.
Fatigue-tests. Surge- and alternating strains due to tension and compression.*

Fig. 1.

Teil ruhend wirken (hohe Vorspannungen) steigt die Dauerfestigkeit über die Streckgrenze.

Die Widerstandsfähigkeit von Stählen gegen oftmals wiederholte Belastung ist erstmals von WÖHLER durch Versuche festgestellt worden. Die Ergebnisse seiner in den Jahren 1858 bis 1870 durchgeföhrten Dauerversuche²⁾ hat WÖHLER in folgende Sätze zusammengefaßt:

„Der Bruch des Materials läßt sich nicht nur durch eine, die Tragfestigkeit t überschreitende ruhende Belastung, sondern auch durch vielfach wiederholte Anstrengungen, von welchen keine den Wert t erreicht, herbeiführen. Die Differenzen der Spannungen sind dabei für die Zerstörung des Zusammenhangs insofern maßgebend, als mit ihrem Wachsen die Minimalspannung, welche den Bruch noch herbeiführen kann, sich verringert.“

WÖHLER hat weiterhin für verschiedene Belastungsstufen die Zahl der Wiederholungen festgestellt, bei der der Bruch eintrat und in der sogenannten Wöhlerlinie dargestellt (Fig. 2). Hiernach darf die Beanspruchung umso höher gewählt werden, je weniger Wiederholungen in Aussicht zu nehmen

²⁾ Z. f. Bauwesen 1860, 1863, 1866 und 1870.

sind. Schließlich hat WÖHLER für die Grenzbeanspruchungen bei wiederholten Anstrengungen von gleicher Größe aber entgegengesetzter Richtung (Schwingungsfestigkeit s), bei wiederholten Anstrengungen in gleicher Richtung von Null bis zu einer oberen Grenze ansteigend (Ursprungsfestigkeit u) und bei ruhender Belastung (statische Bruchfestigkeit t) die Verhältniszahlen $s:u:t = 1:2:3$ angegeben, die heute noch benutzt werden.

BAUSCHINGER führte die bahnbrechenden Forschungsarbeiten WÖHLERS weiter, indem er auch die Formänderungen beobachtete, um zu einer Erklärung der von WÖHLER nachgewiesenen Erscheinungen zu gelangen³⁾. Die

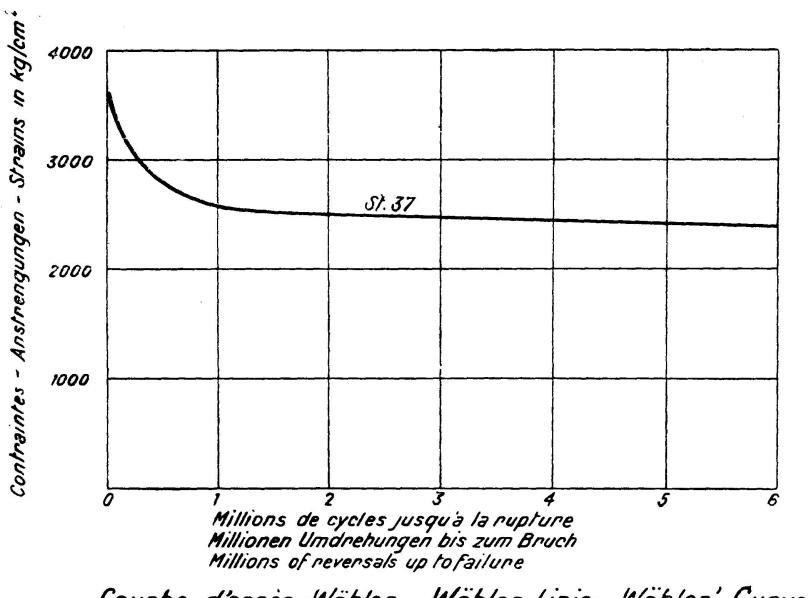


Fig. 2.

Ergebnisse seiner Versuche faßte BAUSCHINGER in folgende Hauptsätze zusammen:

1. Wenn bei wiederholten Anstrengungen auf Zug, deren untere Grenze Null ist, die obere Grenze in der Nähe der ursprünglichen Elastizitätsgrenze liegt, so wird auch durch 5 bis 16 Millionen Wiederholungen dieser Anstrengungen der Bruch nicht erreicht.
2. Durch oftmals wiederholte Anstrengungen zwischen Null und einer oberen Spannung, welche in der Nähe oder auch mehr oder weniger über der ursprünglichen Elastizitätsgrenze gelegen ist, wird diese gehoben und bis über, manchmal weit über die obere Grenze der Anstrengungen hinaus und umso höher, je größer die Anzahl der Anstrengungen ist, ohne jedoch eine gewisse Höhe überschreiten zu können.
3. Wiederholte Anstrengungen zwischen Null und einer oberen Grenze, welche die ursprüngliche Elastizitätsgrenze noch über jene obere Grenze hinauszuheben vermögen, führen den Bruch nicht herbei; wenn aber ihre obere Grenze so hoch liegt, daß die Elastizitätsgrenze nicht mehr darüber hinaus gehoben werden kann, so muß der Bruch nach einer beschränkten Anzahl solcher Anstrengungen erfolgen.
4. Die Zugfestigkeit zeigt sich durch millionenmal wiederholte Anstrengungen nicht vermindert, eher erhöht, wenn das Probestück nach jenen Anstrengungen mit ruhender Belastung abgerissen wird.

³⁾ BAUSCHINGER, Mitteilungen 1886, Heft XIII.

Auf Grund der Versuche von WÖHLER und BAUSCHINGER hat LAUNHARDT die Formel

$$a = u \left(1 + \frac{t-u}{u} \cdot \frac{\min B}{\max B} \right)$$

für die Arbeitsfestigkeit eines auf mittigen Zug oder Druck in den Grenzen $\max B$ und $\min B$ beanspruchten Stabes aufgestellt⁴⁾. Die LAUNHARDT'sche Formel wurde von WEYRAUCH⁵⁾ für Wechsel von Zug und Druck ergänzt durch

$$a = u \left(1 - \frac{u-s}{u} \cdot \frac{\max B'}{\max B} \right)$$

worin $\left(\frac{\max B'}{\max B} \right)$ den numerisch (größeren) Grenzwert der in jedem einzelnen Stabe auftretenden Kraft ohne Vorzeichen bedeutet. Mit den durch Versuche festgestellten Arbeitsfestigkeiten des damaligen Werkstoffs (Schweißeisen) $t = 3300 \text{ kg/cm}^2$, $u = 2200 \text{ kg/cm}^2$ und $s = 1100 \text{ kg/cm}^2$, also

$$\frac{t-u}{u} = \frac{u-s}{u} = \frac{1}{2},$$

hat WEYRAUCH unter der Annahme einer dreifachen Sicherheit ($v = 3$) die bekannten Formeln für die zulässigen Spannungen

$$\sigma_{zul} = 750 \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\min B}{\max B} \right) \text{ kg/cm}^2$$

für Zug oder Druck und

$$\sigma_{zul} = 750 \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{\min B}{\max B} \right) \text{ kg/cm}^2$$

für Wechsel von Zug und Druck erhalten.

Trägt man in einem rechtwinkligen Koordinatensystem die Werte der auf Grund der LAUNHARDT-WEYRAUCH'schen Formel errechneten Arbeitsfestigkeiten (a) als Ordinaten und die zugehörigen Vorspannungen als Abszissen auf (HAIGH'sche Darstellung), so erhält man den in Fig. 3 dargestellten Linienzug⁶⁾. Über den wirklichen Verlauf der Dauerfestigkeitskurve haben erst spätere Versuche Aufschluß gegeben.

SMITH⁷⁾ und MOORE⁸⁾ haben den Einfluß beliebiger Belastungsunterschiede auf die Dauerfestigkeit ausführlicher verfolgt. Mit einer Schwingungsmaschine, die gleichzeitig achsiale Zug- und Druckbelastungen der Prüfstäbe (entsprechend Fig. 4) gestattete, konnte der Verlauf der Schwingungsfestigkeitskurve zwischen Schwingungen um die mittlere Anstrengung Null, Schwingungen einseitig von der Anstrengung Null begrenzt und ganz kleinen Schwingungen um Grenzwerte der axialen Zug- und Druckbelastungen festgestellt werden. In Fig. 5 sind Versuchsergebnisse von SMITH und MOORE eingetragen und zwar für jeden Versuch die Grenzen der Schwingung, die millionenmal wiederkehrend ertragen wurden, in Bezug

⁴⁾ LAUNHARDT, Die Inanspruchnahme des Eisens. Z. d. hannoverischen Arch.- und Ing.-V. 1873, S. 139.

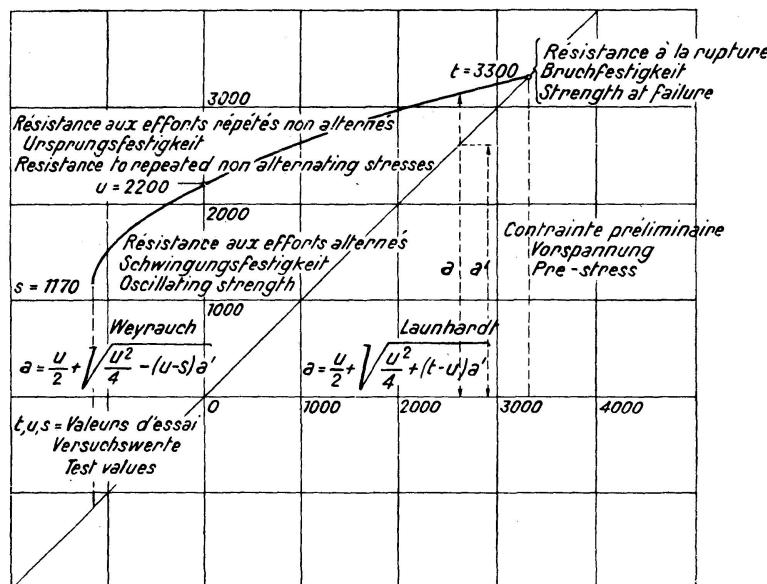
⁵⁾ WEYRAUCH, Die Festigkeitseigenschaften und die Methoden der Dimensionenberechnung von Eisen- und Stahlkonstruktionen. Leipzig, Verlag B. G. Teubner, 1889.

⁶⁾ SCHÄCHTERLE, „Stahlbau“, Jahrgang 1931, Heft 8. Zur Wahl der zulässigen Anstrengungen bei Stahlbrücken.

⁷⁾ Journal of the Iron and Steel Institute, Bd. 82 (1910), S. 246 ff. und Bd. 91 (1913), S. 365, sowie Stahl und Eisen, Bd. 30 (1910), S. 1727 und Bd. 35 (1915), S. 837.

auf die mittlere Anstrengung, d. h. das arithmetische Mittel der Grenz- und der Vorspannung (Darstellung von J. H. SMITH). Wird das Spannungsfeld nach der Druckseite ergänzt, so erhält man einen geschlossenen, linsenförmigen Linienzug (Fig. 6), der einen Bereich umfaßt, in dem Dauerbrüche nicht zu erwarten sind.

Die an umlaufenden, auf Biegung mit achsialem Zug oder Druck beanspruchten, sorgfältig polierten Rundstäben ermittelten Spannungsfelder gelten beispielsweise für Wellen, dürfen aber nicht ohne weiteres auf andere



Courbe des résistances à la fatigue d'après Launhardt - Weyrauch.
Arbeitsfestigkeitskurve nach Launhardt - Weyrauch.
Launhardt - Weyrauch 'working strength curve'.

Fig. 3.

Beanspruchungsarten und andersgeartete technische Ausführungen übertragen werden. Grundsätzlich sind die für den Konstrukteur und die Festigkeitsrechnung maßgebenden Beanspruchungsgrenzen (Arbeitsfestigkeiten) unter Verhältnissen und Bedingungen zu erkunden, die denen der praktischen Anwendung entsprechen⁸⁾.

Mit Hilfe von neuen und vervollkommenen Dauerprüfmaschinen sind zunächst die Dauerfestigkeitsdiagramme für die verschiedenen Stahlsorten und die wichtigsten Beanspruchungsarten (Schwell- und Wechselbeanspruchung auf Zug und Druck, Biege- und Drehwechselbeanspruchung ...) an polierten Probestücken festgestellt worden. Wegen der mit dem Überschreiten der Fließgrenze auftretenden plastischen Verformungen scheiden die über Fließgrenze hinaus sich erstreckenden Teile der Diagramme für die praktische Ausnutzung aus. Das restliche nutzbare Spannungsfeld darf näherungsweise durch Geraden begrenzt werden⁹⁾. Bei Wechselbeanspruchung und bei schwelender Beanspruchung mit geringer Vorspannung ist also der Dauerbruch für die Wahl der zul. Spannung maßgebend, bei höherer sta-

⁸⁾ Vergl. GRAF, „Die Dauerfestigkeit der Werkstoffe und der Konstruktionselemente“, S. 20 und 21. Berlin, Verlag Julius Springer.

⁹⁾ Dr. Ing. FR. P. FISCHER, Essen, Vorschlag zur Festlegung der zulässigen Spannungen im Maschinenbau. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, Bd. 76, Jahrgang 1932, Nr. 19.

tischer Vorspannung (überwiegend ruhende Belastung) die Bedingung, daß keine unzulässigen Verformungen auftreten (Verformungsgrenze). Ausgenommen sind örtliche Spannungsschwellen und Spannungsspitzen, auf die noch näher einzugehen ist.

Neuere Forschungen haben gezeigt, daß die Dauerfestigkeitswerte der Baustähle durch Oberflächenzustände (mit und ohne Walzhaut) und Bearbeitungsgrade (geschlichtet, gedreht, geschliffen, poliert ...), noch mehr durch werkstättenmäßig hergestellte Kerben und Bohrungen stark beeinflußt werden. Oberflächenverletzungen sowie Kerben und Bohrungen wirken bei Wechselbeanspruchung festigkeitsmindernd, bei statischer Beanspruchung

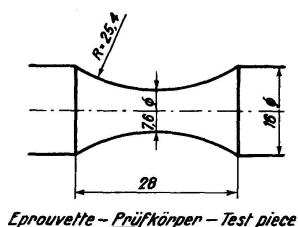


Fig. 4.

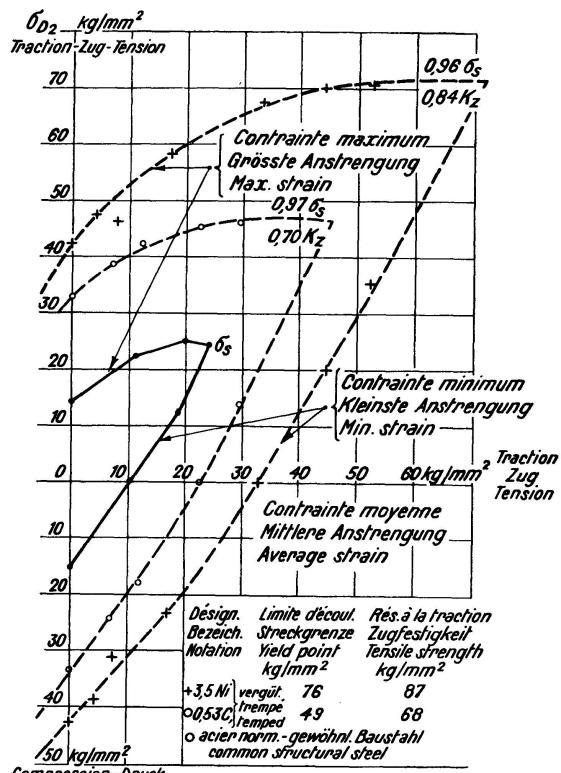


Diagramme de résistance à la fatigue d'après
Dauerfestigkeitsdiagramm nach } Smith & Moore
Diagram of fatigue strength according to }

Fig. 5.

in der Regel festigkeitserhöhend. Dem Bruch zäher Werkstoffe geht bei statischer Beanspruchung immer eine weitgehende plastische Verformung voraus, die mit einer Verfestigung des Werkstoffs verbunden ist. Bei schwingender Anstrengung ist die plastische Verformung und damit auch die Kohäsionsverfestigung gering, so daß die Zerrüttung örtlich bälder einsetzt und die Dauerfestigkeitswerte mehr oder weniger tief unter den entsprechenden statischen Bruchfestigkeitswerten liegen. Die Abminderung der Dauerfestigkeitswerte von Stählen wächst im allgemeinen mit steigender Zugfestigkeit¹⁰⁾. Man hat versucht, diese Feststellungen durch eine Eigenart der

¹⁰⁾ O. GRAF, Dauerfestigkeit von Stählen mit Walzhaut, ohne und mit Bohrung, von Niet- und Schweißverbindungen. V. D. I.-Verlag 1931. — G. BUCHHOLZ und E. H. SCHULZ, Zur Frage der Dauerfestigkeit des hochwertigen Baustahls St 52. Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut d. Ver. Stahlw. A.-G., Bd. II (1931), Lfg. 6, S. 104.

Werkstoffe zu deuten und zur Erfassung der den Dauerbruch beeinflussenden Faktoren die Begriffe Kerbziffer (abhängig von Form und Größe der Kerbe) und Kerbempfindlichkeit (durch stoffliche Eigenart, Gefüge und Oberflächenbeschaffenheit bedingt) eingeführt. Diese haben sich in vielen Fällen als wertvolle Hilfsmittel zur Abschätzung der Bruchgefahr erwiesen. So viel steht heute fest, daß es eine durch die Beanspruchungsart allein gekennzeichnete Wertstofffestigkeit nicht gibt. Ob ein Körper auf Zug, Druck, Biegung oder Verdrehung beansprucht wird, stets ist der an der meist beanspruchten Stelle auftretende räumliche Spannungszustand für den Eintritt des Bruchs maßgebend. Die Vorgänge im plastischen Formänderungsbereich sind noch nicht ausreichend erforscht. Aus statischen Versuchen ist schon

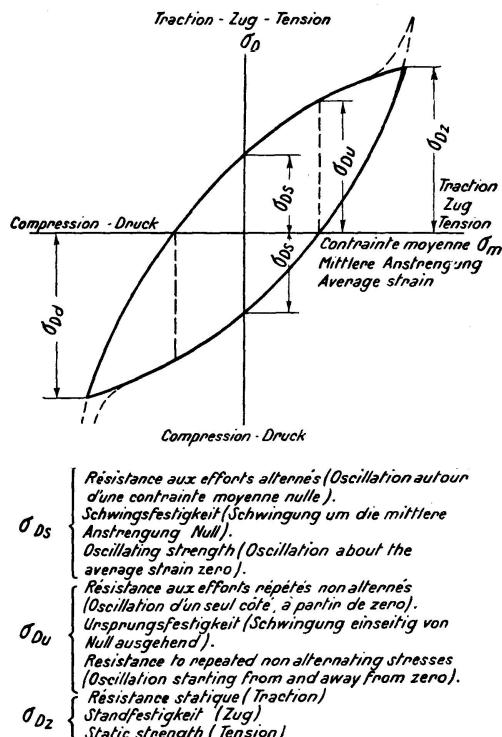


Diagramme de la résistance aux efforts répétés - alternés.
Wechselfestigkeitsdiagramm.
Diagram of strength of repeated alternations.

Fig. 6.

längere Zeit bekannt, daß bei ungleichmäßiger Spannungsverteilung auf einen Querschnitt (z. B. beim Biegestab oder gelochten Zugstab) die weniger beanspruchten Teile die höher beanspruchten am Fließen hindern. Schon die Fließgrenze ist hiernach bei einem und demselben Werkstoff vom Spannungszustand abhängig, der sich beim Übergang vom elastischen Bereich in den plastischen Formänderungsbereich verändert. Ebenso liegen die Verhältnisse hinsichtlich der Dauerfestigkeitswerte, die in hohem Maße von dem gestaltlich bedingten Spannungszustand abhängig sind. Für die Widerstandsfähigkeit eines gleichmäßig beanspruchten, von äußeren Kerbwirkungen freien Stückes ist die kleinste Dauerfestigkeit seiner Teile maßgebend. Zu beachten ist dabei, daß auch Unregelmäßigkeiten im Werkstoff, insbesondere feinste, rißartige Kerben örtlich den Spannungszustand beeinflussen und sich hinsichtlich der Dauerfestigkeit ungünstig auswirken.

II.

Aus dem Vorstehenden geht hervor, daß die Vorschriften über die Berechnung und Bemessung dynamisch beanspruchter Konstruktionsteile auf neuer Grundlage aufzubauen sind. Was bisher zur Beurteilung des Sicherheitsgrades der Stahlkonstruktionen herangezogen wurde, war nur ein Notbehelf. Nachdem es gelungen ist, die Erkenntnisse hinsichtlich der Grenzen der Anstrengungen, die ein Werkstoff oder ein damit hergestelltes Konstruktionselement (Verbindung) bei den verschiedenen Anstrengungsarten dauernd aushalten kann, ohne zu Bruch zu gehen, so zu erweitern und zu vertiefen, daß sie als Grundlagen der Festigkeitsberechnung verwendet werden können, haben die bisherigen hohen Sicherheitswerte ihre Berechtigung verloren. Für die auf Dauerversuche gegründeten zulässigen Beanspruchungen darf der Sicherheitsgrad kleiner gewählt werden. Ganz ohne Sicherheitszahl wird man aber nicht auskommen. In der „Sicherheitszahl“ — oder besser „Unsicherheitszahl“ — bleiben noch zu decken:

- a) Streuungen bzw. Ungleichmäßigkeiten der Werkstoffherstellung, Ungleichmäßigkeiten der chemischen Zusammensetzung und Wärmebehandlung, der Oberflächenbeschaffenheit, mechanische Unvollkommenheiten, z. B. Verunreinigungen, Seigerungen, Schlacken, Poren ...;
- b) Ungenauigkeiten in der Ermittlung der Festigkeitseigenschaften;
- c) Abweichungen in den Festigkeitseigenschaften von Stählen gleicher Benennung, aber verschiedener Herkunft, Herstellung und Behandlung;
- d) Abmessungs- und Gewichtstoleranzen;
- e) unbestimmbare Einflüsse der Bearbeitung und Behandlung in der Werkstatt und auf der Baustelle, unbeabsichtigte und zufällige zusätzliche Spannungen beim Zusammenbau;
- f) Veränderungen, die während der Gebrauchsduer entstehen, Querschnittsverschwächungen durch Korrosion, Verschleiß und sonstige Abnutzung, Lockerungen;
- g) Unsicherheiten der Festigkeitsrechnung sowohl hinsichtlich der äußeren Einwirkungen und Einflüsse als auch der inneren Auswirkungen.

In dem Sicherheitsbeiwert muß außerdem die Bedeutung und Lebenswichtigkeit der Konstruktionsteile oder Bauwerke zum Ausdruck kommen.

Bruchsicherheit, d. h. Vermeidung der Bruchgefahr, ist für den Brückenkonstrukteur oberstes Gesetz. Zur Gewährleistung der Bruchsicherheit gehört zunächst die genaue Kenntnis der in den Konstruktionsteilen tatsächlich auftretenden Spannungen, die sich aus statischen Wirkungen ruhender Lasten und aus dynamischen Wirkungen bewegter Lasten zusammensetzen. Die Größen der ruhenden und schwingenden Beanspruchungen sind sehr verschieden, die dynamischen Vorgänge außerdem noch wenig erforscht¹¹⁾.

Als Beanspruchungsgrenzen kommen, soweit Festigkeitsrücksichten ausschlaggebend sind, bei Brücken nur Dauerfestigkeitswerte in Betracht. Je zuverlässiger die Feststellung der für die Festigkeitsrechnung maßgebenden Beanspruchungsgrenzen, je genauer die Ermittlung der im Bauwerk tatsächlich auftretenden größten Anstrengungen, je gleichmäßiger die Werkstoffgüte, je peinlicher die Werkstoffprüfung und Abnahme, je besser die Verarbeitung in der Werkstatt und der Zusammenbau auf der Baustelle, je ge-

¹¹⁾ KULKA, Stahlbau 1930, Seite 301 bis 305. — SCHNEIDER, Stahl und Eisen 1931, S. 285.

wissenhafter die Überwachung im Betrieb und je sorgfältiger die Unterhaltung des Bauwerks während der Gebrauchsdauer, umso kleiner darf der Sicherheitsgrad gewählt werden.

Dem Hochtreiben der zulässigen Spannungen sind jedoch im Brückenbau enge Grenzen gezogen, schon mit Rücksicht auf die lange Lebensdauer der Bauwerke und die Gefährdung von Menschenleben bei Einstürzen. Besondere Beachtung verdienen die überwiegend dynamisch beanspruchten Bauglieder, an denen sich Dauerbruchanrisse im Verborgenen vorbereiten und bei Nichtbeachtung zu Katastrophen führen können.

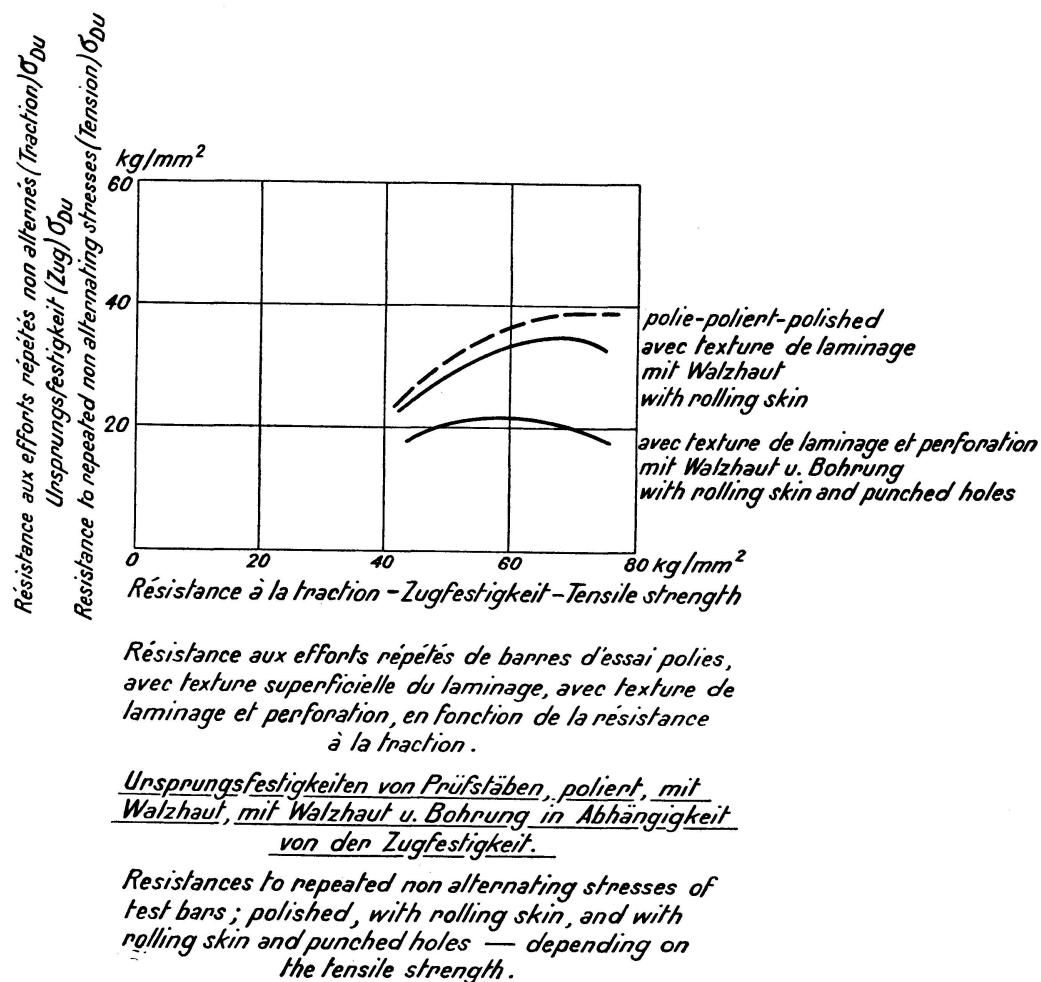
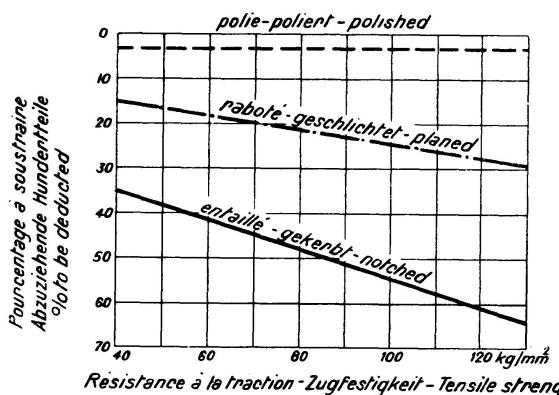


Fig. 7.

Es dürfte sich nicht empfehlen, bei den überwiegend dynamisch beanspruchten Konstruktionsgliedern des Brückenbaus unter eine 1,3 fache Sicherheit gegenüber den maßgebenden, durch Versuche festgestellten Dauerfestigkeiten herunterzugehen. Bauglieder, die zum überwiegenden Teil statisch beansprucht werden und bei denen die unter ungünstigster Zusammenstellung aller äußeren Einwirkungen und Einflüsse errechneten Höchstspannungen nur ganz ausnahmsweise vorkommen, dürfen dagegen unbedenklich mit geringerer Sicherheit bemessen werden. Für letztere kommt in der Regel nicht die Dauerfestigkeit, sondern die Verformungsgrenze in Betracht.

III.

In den Berechnungsvorschriften BE und DIN 1073¹²⁾ ist für hochwertige Stähle St 52 (Zugfestigkeit 52—62 kg/mm², Streckgrenze mindestens 36 kg/mm², Dehnung 20 %) gegenüber dem gewöhnlichen Baustahl St 37 eine um das Maß der Streckgrenzensteigerung von 24 auf 36 kg/mm², also um 50 % erhöhte Beanspruchung zugelassen. Das ist für überwiegend ruhende (statische) Belastung mit gewissen Einschränkungen richtig. Die Überlegenheit der Baustähle St 52 erschien auch hinsichtlich der Dauerfestigkeit erwiesen, nachdem durch Biegeschwingungsversuche auf der SCHENK'schen Prüfmaschine an polierten Stäben aus St 52 Schwingungsfestigkeiten von 30 bis 36 kg/mm² gegenüber 20 bis 24 kg/mm² bei St 37 nachgewiesen werden konnten¹³⁾.



Réduction de la résistance aux efforts répétés alternés pour différents usinages en fonction de la résistance à la traction (essai statique) d'après Fr. P. Fischer, Essen.
Verminderung der Wechselfestigkeit für verschiedene Bearbeitungszustände in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit (statischer Zerreißversuch) nach Fr. P. Fischer, Essen.
Decrease of resistance to repeated alternating stresses for different finishing conditions in relation to the tensile strength (static tension test) according to Fr. P. Fischer, Essen

Fig. 8.

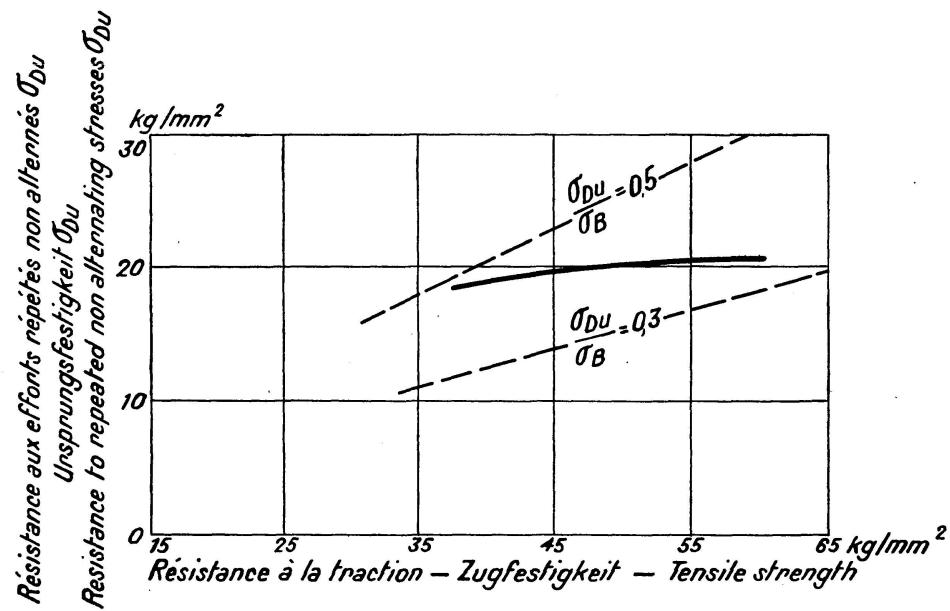
Die beim gewöhnlichen Zugversuch an sorgfältig polierten Rundstäben festgestellten Streckgrenzen der Baustähle sind jedoch als Grundlage der Festigkeitsrechnung und als Ausgangspunkt für die Wahl der zulässigen Spannungen unzureichend. Der Streckgrenze kommt wohl die Bedeutung einer wichtigen Gefahrenzonengrenze zu; sie wird aber nicht allen vor kommenden Bedingungen gerecht. Bei der Entwicklung der hochwertigen Baustähle und den auf die Erhöhung der Streckgrenze gerichteten Bestrebungen hat man sich durch die Begrenzung der statischen Bruchfestigkeit und durch die Bedingung eines Mindestdehnungsvermögens vor zu großer Sprödigkeit zu schützen versucht. Man hat aber nicht hinreichend beachtet, daß die Oberflächenbeschaffenheit (Walzhaut) und die Werkstattbearbeitung (Kerben und Bohrungen) von erheblichem Einfluß sind, daß der Einfluß

¹²⁾ Vorschriften für Eisenbauwerke. Berechnungsgrundlagen für eiserne Eisenbahnbrücken (BE). 1925. W. Ernst & Sohn, Berlin. — Berechnungsgrundlagen für stählerne Straßenbrücken. DIN 1073 vom Sept. 1931. Beuth-Verlag.

¹³⁾ BUCHHOLZ und E. H. SCHULZ, „Zur Frage der Dauerfestigkeit des hochwertigen Baustahls St 52“. Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut der Vereinigten Stahlwerke A.-G. 1931 und 1932.

von Kerben und Bohrungen nicht nur gestaltlich bedingt (Spannungsspitzen im Kerbgrund und am Lochrand), sondern auch in hohem Maße vom Gefüge abhängig ist und daß die verschiedenen Stähle in Hinsicht auf Verarbeitung von Spannungsschwellen und Spannungsspitzen recht verschiedenes Verhalten aufweisen.

Stähle St 52 verschiedener Herkunft, aber von gleicher Zerreißfestigkeit, Streckgrenze und Dehnung, festgestellt an polierten Rundstäben im üblichen Abnahmeversuch, zeigten beim Dauerzugversuch in der Pulsatormaschine an Flachstäben mit Walzhaut erhebliche Unterschiede gegen oftmals wiederkehrende, in weiten Grenzen schwingende Belastung. Weiterhin ist festgestellt worden, daß die Widerstandsfähigkeit der harten Stähle



Résistance aux efforts répétés non alternés en fonction de la résistance à la traction. (Barres perforées avec texture superficielle du laminage).

Ursprungsfestigkeit in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit.
(Gelochte Stäbe mit Walzhaut).

Resistance to repeated non alternating stresses depending on the tensile strength. (Perforated bars with rolling skin).

Fig. 9.

bei Ursprungsbelastung durch Kerben und Bohrungen stärker herabgesetzt wird als die der weichen Stähle (Figuren 7—10). Die Bohrungen für die Nietanschlüsse haben neben der Querschnittsverschwächung wegen der an den Lochrändern auftretenden Spannungsspitzen (Figuren 11—13) eine Verminderung der Dauerfestigkeit zur Folge, die bei harten Stählen größer ist als bei weichen Stählen. Ähnlich wirken unstete Querschnittsübergänge, Eindrehungen, Wulste, Oberflächenverletzungen, Schweißnähte und dergl. (Fig. 14).

Die weichen Stähle haben die wertvolle Eigenschaft, Spannungsspitzen auch bei schwingender Belastung weitgehend auszugleichen und zu verarbeiten. Bei harten Stählen ist dies in geringerem Maße der Fall. Die Vorteile hoher Streckgrenzen wirken sich hauptsächlich bei hohen Vorspannungen

aus, indem Stähle mit höheren Streckgrenzen größere Amplituden der überlagerten Spannungen gestatten. Bei überwiegend ruhender Beanspruchung gewinnt die Streckgrenze die ihr ursprünglich zugeschriebene Bedeutung zurück.

Der Verlauf der Dauerfestigkeitskurven für die Werkstoffe St 37 und St 52 und die verschiedenen Anstrengungsarten, beobachtet an polierten Prüfstäben, ist heute hinreichend genau bekannt. Durch Feststellungen an Stäben mit Walzhaut und Bohrung und an Nietverbindungen im Dauerversuch sind auch die für die Festigkeitsrechnung von genieteten Konstruktionen aus St 37 und St 52 in Betracht kommenden Spannungsfelder angenähert ermittelt worden.

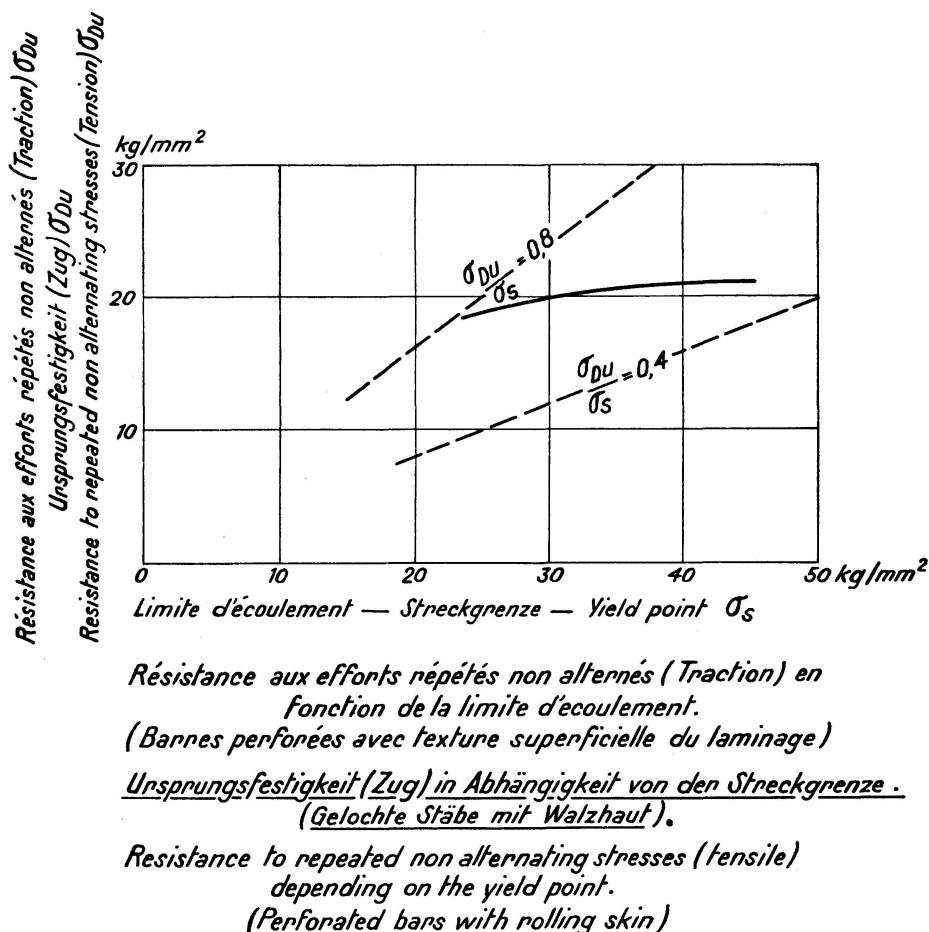
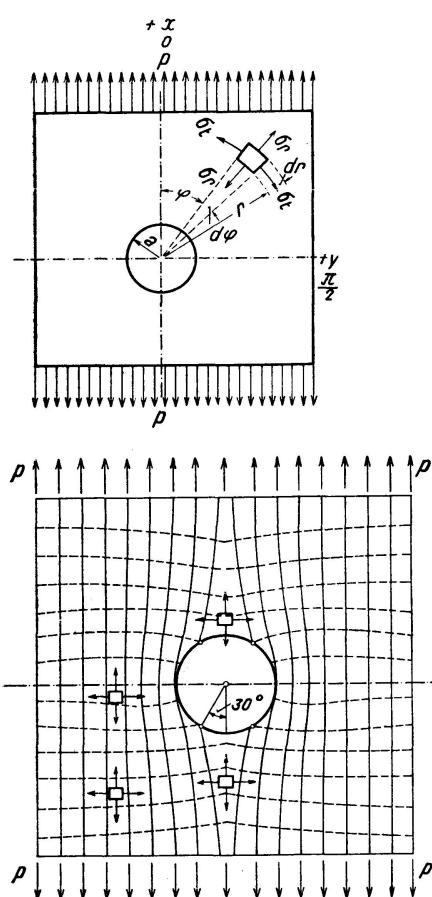


Fig. 10.

Wird eine Belastung, unter der bereits örtliche plastische Verformungen auftreten, oftmals wiederholt, so nehmen die bei jeder Be- und Entlastung bleibenden Formänderungen dauernd ab, bis schließlich ein Ausgleichszustand mit rein elastischem Verhalten erreicht ist. Dabei spielen Verfestigungsvorgänge in den plastizierten Zonen eine wichtige Rolle. Die bei der ersten Belastung eintretende örtliche plastische Verformung vermindert die Spannungen an dieser Stelle (Fig. 15) und ergibt einen Zustand innerer Ver- spannung bei der Entlastung. Da die verbleibenden inneren Spannungen (Nachspannungen) zu den die Verformung erzeugenden Spannungen entgegengesetzt gerichtet sind, so tritt bei oftmals wiederkehrenden Be- und Entlastungen an den Stellen örtlicher Plastizierung ein Spannungsrichtungswechsel ein, wobei der Grad der Wechselwirkung durch die Spannungsver-

teilung beeinflußt wird. Als Folge starker Wechselwirkungen treten Zerrüttungsvorgänge in den Vordergrund. Hieraus läßt sich die günstige Wirkung einer gleichgerichteten Vorspannung bei schwelender Beanspruchung und die ungünstige Wirkung entgegengesetzt gerichteter Vorspannung — Wechselbeanspruchung zwischen Zug und Druck — auf die Dauerfestigkeit erklären.



*Contraintes dans la tôle perforée dues à la traction axiale.
Spannungszustand des gelochten Blechs bei zentrischer Zugbelastung.
Stress diagram of the perforated sheets with central tension.*

Pointe des tensions
Spannungsspitze
Peak of tension

Coefficient d'entaille
Kerbziffern
Notch number in %

pour largeur de tôle: diam. du trou
bei Blechbreite: Lochdurchmesser
with width of sheet: diam. of hole

Fig. 11.

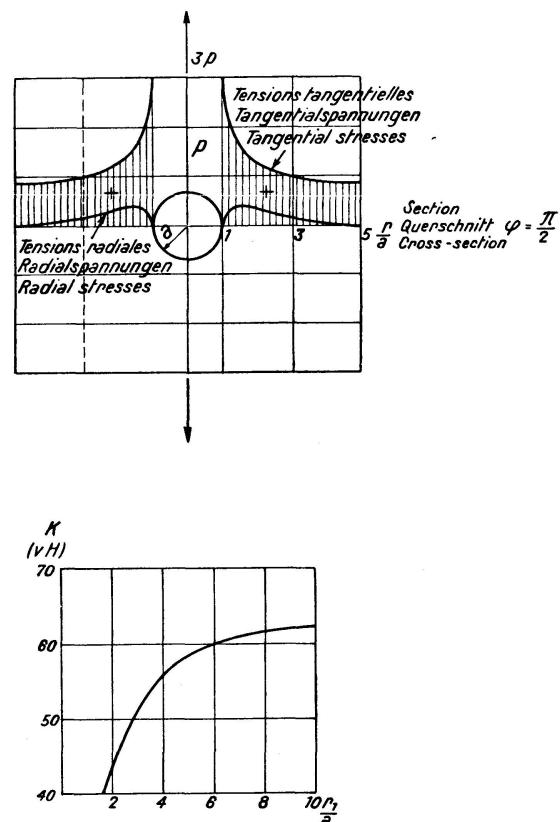


Fig. 12.

In Fig. 16 sind zunächst die an gelochten Flachstäben mit Walzhaut ermittelten Dauerfestigkeiten und Schwingungsweiten für St 37 und St 52 in Abhängigkeit von der Grundspannung angegeben. Die Neigung der Linienzüge ist etwas verschieden; wesentliche Unterschiede sind nicht zu erkennen. Die Überlegenheit der Stähle höherer Festigkeit bei hohen Grundspannungen tritt deutlich hervor.

Fig. 17 zeigt die Schwingungsweiten bezogen auf die Grundspannungen, die im praktischen Verwendungsbereich mit zunehmender Grundspannung (Zug) stetig abnehmen und bei Wechselbeanspruchung mit zunehmender Grundspannung (Druck) stetig zunehmen.

IV.

Der erste im Jahr 1927 vom Verfasser gemeinsam mit Prof. O. GRAF aufgestellte Versuchsantrag umfaßte ein-, zwei- und dreireihige Nietverbindungen, Stäbe und Laschen aus St 37 und St 52, Niete aus St 34, St 52 und St 44, nach

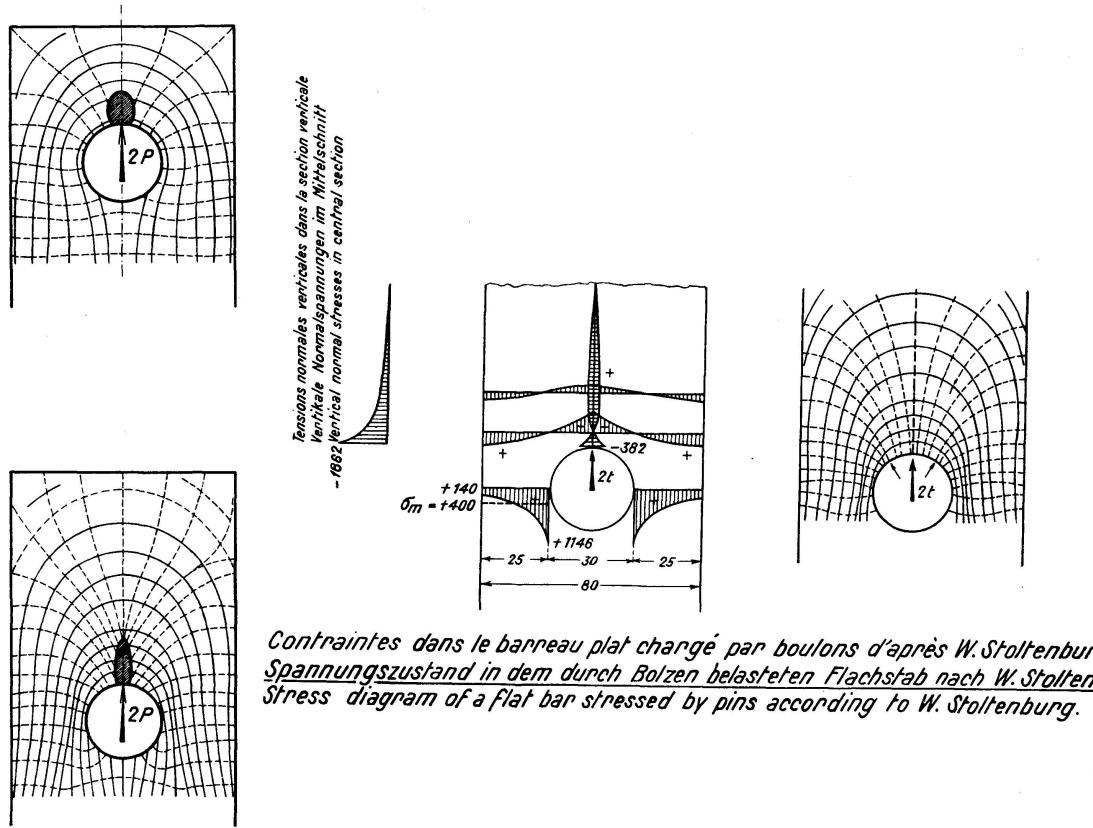
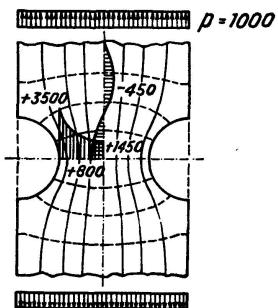


Fig. 13.

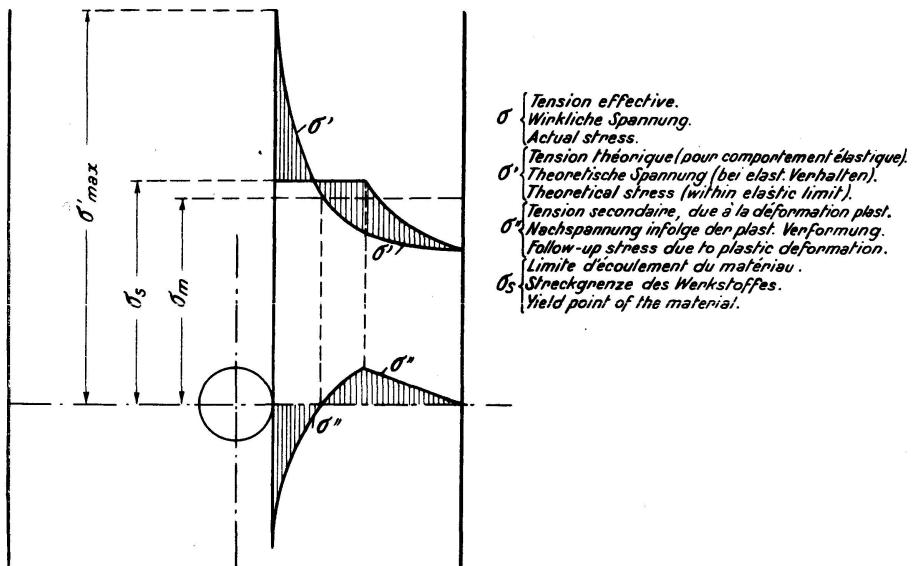


*Contraintes dans le barreau plat
avec entailles latérales.
Spannungszustand des Flachstabes mit
seitlichen Kerben.
Stress distribution in the flat bar provided
with lateral notches.*

Fig. 14.

den BE bemessen und ohne Zwischenanstrich vernietet. Im Dauerzugversuch waren die Ursprungsfestigkeiten und Dauerfestigkeitswerte bei Vorbelastung (Grundspannung $\frac{1}{3}$ und $\frac{2}{3}$ der größten Anstrengung) festzustellen.

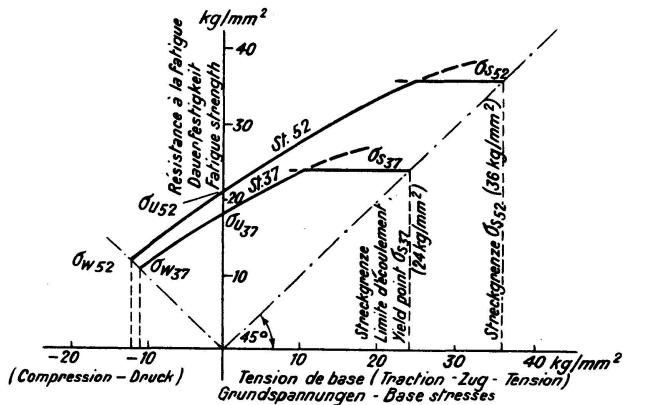
Zur Durchführung der Vorversuche stand in der Materialprüfungsanstalt der Technischen Hochschule Stuttgart die Dauerprüfmaschine (Bauart AMSLER, Fig. 18) mit selbsttätiger Steuerung zur Verfügung. Man hat zunächst mit



Egalisation des tensions dans le barreau plat perforé par déformation plastique du bord de trou.
Spannungsausgleich beim gelochten Flachstab infolge der plastischen Verformung am Lochrand.
Stress equilibrium in the perforated flat bar due to the plastic deformation of edge of hole.

Fig. 15.

niedrigen Lastwechselzahlen (1–2 Lastwechsel je Minute) begonnen und ist später auf höhere Lastwechselzahlen (26–30 Lastwechsel je Minute) übergegangen.



Résistances à la fatigue basées sur les tensions primaires (tension+, compression-) des barreaux plats perforés ayant la texture superficielle du laminage en acier St.37 et St.52.
Dauерfestigkeiten bezogen auf die Grundspannungen (Zugt., Druck-)
von Flachstäben mit Walzhaut und Bohrung aus St.37 und St.52.
Fatigue strengths in relation with base stresses (tension+, compression-)
of flat bars of steel St.37 and St.52.

Fig. 16.

Zur Ermittlung der Ursprungsfestigkeit ist man zuerst in der Weise vorgegangen, daß die Belastung stufenweise gesteigert und auf jeder Stufe das Belastungsspiel bis zum Erreichen des Ausgleichzustandes fortgesetzt wurde. Auf der letzten Belastungsstufe, wo ein Ausgleich nicht mehr stattfand,

nahmen die bleibenden Formänderungen dauernd zu bis zum Bruch. Die Messung der gesamten und bleibenden Längenänderungen auf jeder Laststufe des Dauerversuchs zu Beginn und nach Beendigung der Lastspiele und der Vergleich mit den entsprechenden Beobachtungen beim gewöhnlichen (statischen) Zugversuch gab wertvolle Aufschlüsse über die inneren Vorgänge bei oftmals wiederkehrenden Anstrengungen¹⁴⁾ (Figuren 19—30). Um rascher zu praktisch verwertbaren Ergebnissen zu gelangen, sind nach dem Vorschlag von Prof. O. GRAF die weiteren Versuche auf Pulsatormaschinen mit 350 Lastwechseln je Minute durchgeführt worden. Ausgehend von der statischen Bruchlast, hat man dabei für stufenweise herabgesetzte Belastungen die Zahl der Lastwechsel bis zum Bruch bestimmt und die Versuchsergebnisse in eine Wöhlerlinie aufgetragen (Fig. 31). Auf diese Weise wurde jeweils diejenige Belastung ermittelt, bei welcher der Prüfkörper 2 Millionen Lastwechsel ertrug, ohne zu Bruch zu gehen. Die dieser Belastung entsprechende Anstrengung bezogen auf den Nutzquerschnitt wird als Dauerzugfestigkeit

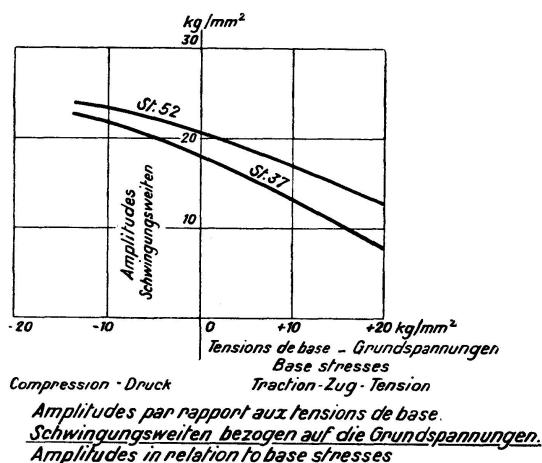


Fig. 17.

bezeichnet¹⁵⁾. Die so errechnete mittlere Spannung gilt für die Verbindung als Ganzes und gibt einen zuverlässigen Anhalt für die Ausnutzung des Werkstoffes.

Die Stuttgarter Versuche sind nicht nur auf Nietverbindungen üblicher Ausführungsart beschränkt worden. Man hat auch die Verhältnisse und Bedingungen zur vollkommeneren Ausnutzung der zur Verfügung gestellten Werkstoffe erkundet.

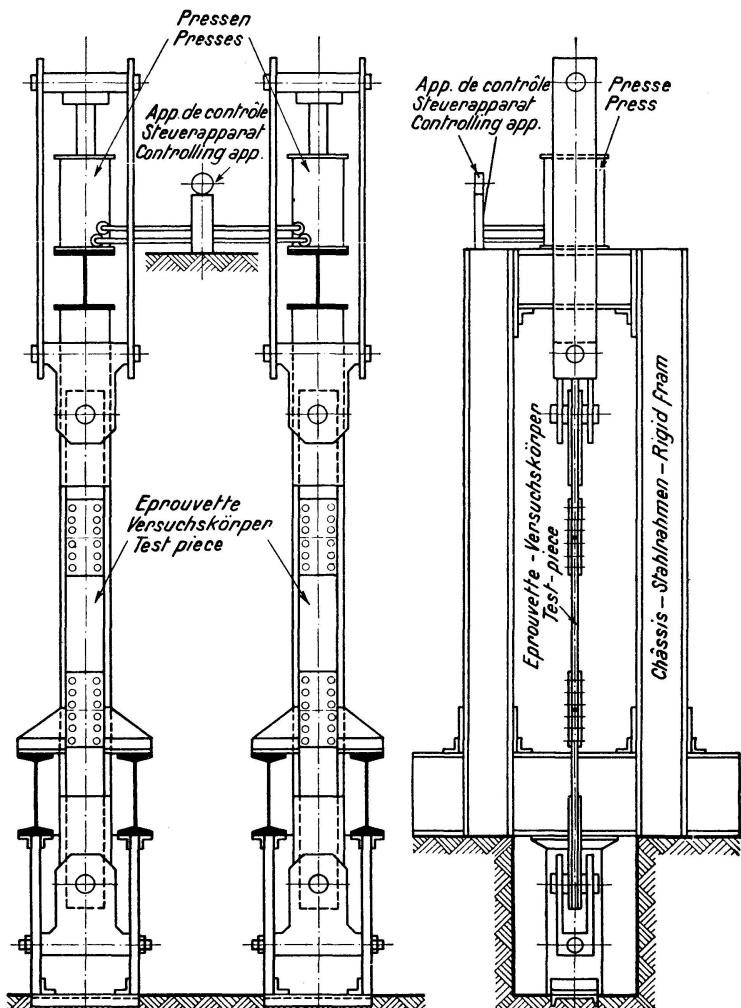
Zur Beurteilung der Dauerversuche mit Nietverbindungen wurden die Ergebnisse der üblichen Werkstoffprüfung herangezogen, an polierten Prüfstäben nach DIN 1605 Streckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Querschnittsverminderung bestimmt, weiterhin gewöhnliche Zugversuche mit genieteten Prüfkörpern gleicher Abmessung und Herstellung durchgeführt.

Um die mit Rücksicht auf die Nietverbindung an die Werkstoffe zu stellenden Anforderungen zu ergründen, wurden mit den von der stahl-

¹⁴⁾ SCHÄCHTERLE, Dauerversuche mit Nietverbindungen. Der Stahlbau 1930, Heft 24 und 25.

¹⁵⁾ Bei 2 Millionen Lastwechseln ist keineswegs die „absolute“ Dauerfestigkeit erreicht. Um dieser nahe zu kommen, müßten die Dauerversuche auf $10 \cdot 10^6$ bis $100 \cdot 10^6$ Lastwechsel ohne Bruch ausgedehnt werden. Die bei 2 Millionen Lastwechseln erhaltenen Dauerfestigkeiten ermöglichen einen Vergleich und genügen den Ansprüchen der Praxis.

erzeugenden Industrie zur Verfügung gestellten Stählen Vergleichsversuche durchgeführt und an Flachstäben mit Walzhaut und mit Bohrung (Fig. 32) auf der Pulsatormaschine die Ursprungsfestigkeiten ermittelt. Dabei ergab sich bei Flachstäben mit Walzhaut aus St 37 die Ursprungsfestigkeit σ_{Du} in



*Machine pour essais de longue durée.
Dauerprüfmaschine.
Fatigue testing machine.*

Fig. 18.

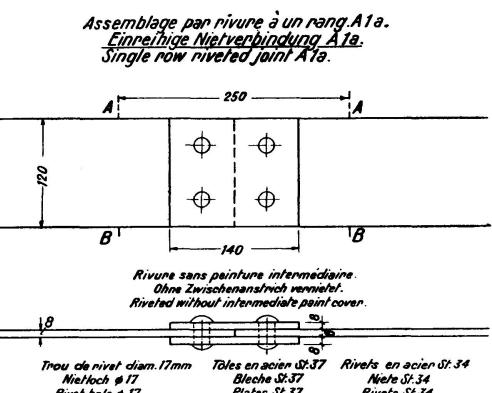


Fig. 19.

Fig. 19—23.

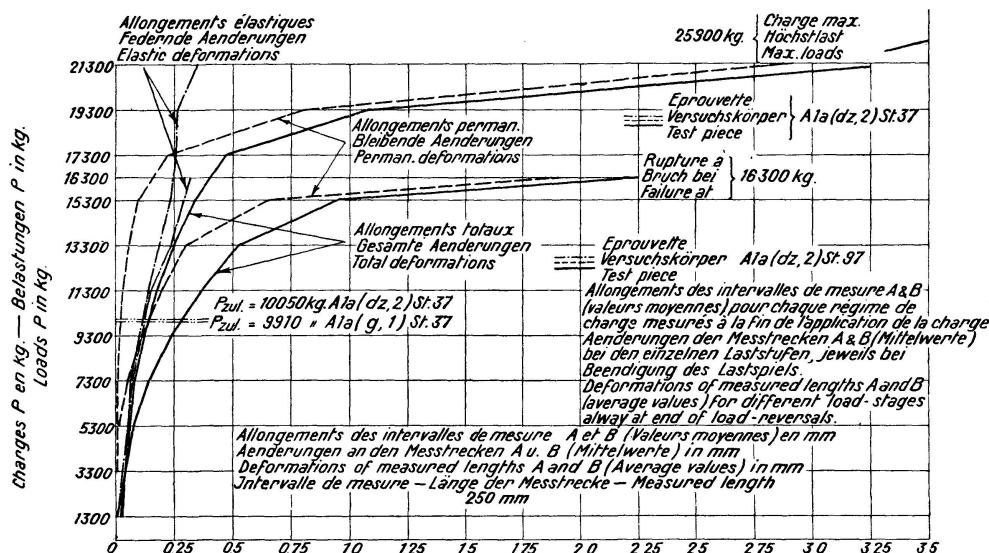
Confortement d'un assemblage par rivure à un rang au cours de l'essai normal de traction et de l'essai de fatigue.

Verhalten einer einreihigen Nietverbindung beim gewöhnlichen Zugversuch und beim Dauerversuch.

Behaviour of a single row riveted joint for ordinary tension test and for fatigue-tension test.

der Nähe der Streckgrenze, bei gelochten Stäben mit Walzhaut aus St 37 zwischen 0,75 und 0,85 σ_s . Wesentlich größer war der Spannungsabfall bei gelochten Stäben aus St. 52, das Verhältnis $\frac{\text{Ursprungsfestigkeit } \sigma_{Du}}{\text{Streckgrenze } \sigma_s}$ schwankte zwischen 0,4 und 0,6.

Die an Breitstäben mit Walzhaut festgestellten Ursprungsfestigkeiten von Proben St 52 aus den Jahren 1927 bis 1930, die den behördlichen Abnahmevorschriften entsprachen, lagen kaum höher als die unter den gleichen Bedingungen festgestellten Werte eines guten St 37, einige sogar

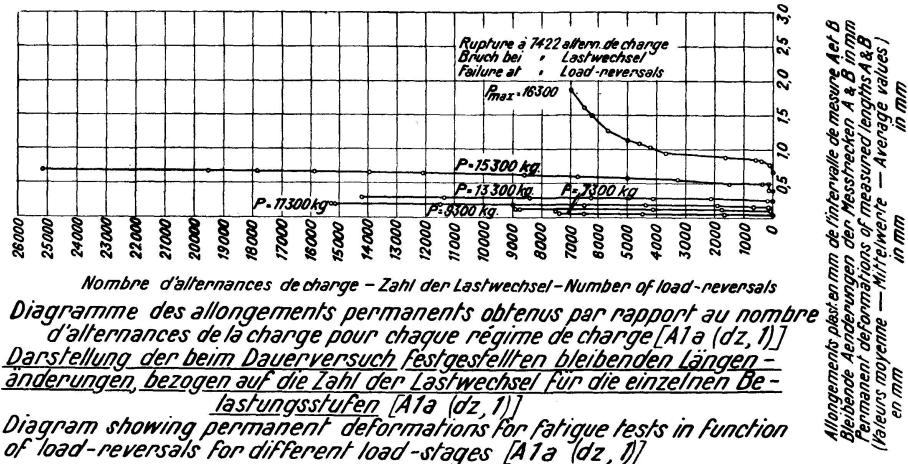


*Comparaison des allongements totaux et permanents mesurés par essais statiques et de fatigue.
Gegenüberstellung der beim statischen u. beim Dauerversuch gemess. gesamten u. bleib. Längenänderungen.
Comparison of the total and permanent deformations for static and fatigue tests.*

[Alfa(g, 1)] & [Alfa(dz, 1)]

Fig. 20.

darunter. Der niedrigste Wert $\sigma_{Du} = 1500 \text{ kg/cm}^2$ wurde an einem Siliciumstahl mit rauher Oberfläche und feinen rißartigen Kerben in den Randzonen festgestellt (Fig. 33). Bei Stählen mit glatter Oberfläche war der Spannungs-



*Nomb d'alternances de charge — Zahl der Lastwechsel — Number of load-reversals
Diagramme des allongements permanents obtenus par rapport au nombre d'alternances de la charge pour chaque régime de charge [Alfa(dz, 1)]
Darstellung der beim Dauerversuch festgestellten bleibenden Längenänderungen, bezogen auf die Zahl der Lastwechsel für die einzelnen Belastungsstufen [Alfa(dz, 1)]
Diagram showing permanent deformations for fatigue tests in function of load-reversals for different load-stages [Alfa(dz, 1)]*

Fig. 21.

abfall kleiner (Fig. 34 und Tafel 1). Die Erkenntnis, daß Stähle, bei denen die Steigerung der Festigkeit und die Erhöhung der Streckgrenze mit starker Zunahme der Kerbempfindlichkeit erkauft ist, für die Zwecke des Brückenbaus ungeeignet sind, hat die weitere Entwicklung der hochwertigen Stähle richtunggebend beeinflußt. Daß es inzwischen gelungen ist, hochwertige Stähle herzustellen, die den Anforderungen des Konstrukteurs weitgehend entsprechen, beweist die Tafel 2.

Durch Aufnieten von Platten auf gelochte Stäbe ohne Zwischenanstrich (Fig. 35) konnte bei St 37 die Widerstandsfähigkeit gegen oftmais wiederholte Belastungen gesteigert werden (z. B. von 1800 bis 2300 kg/cm²), was auf eine Entlastung der Lochwand durch den Gleitwiderstand infolge der Klemmwirkung der Niete hindeutet. Eine gleich günstige Wirkung war an

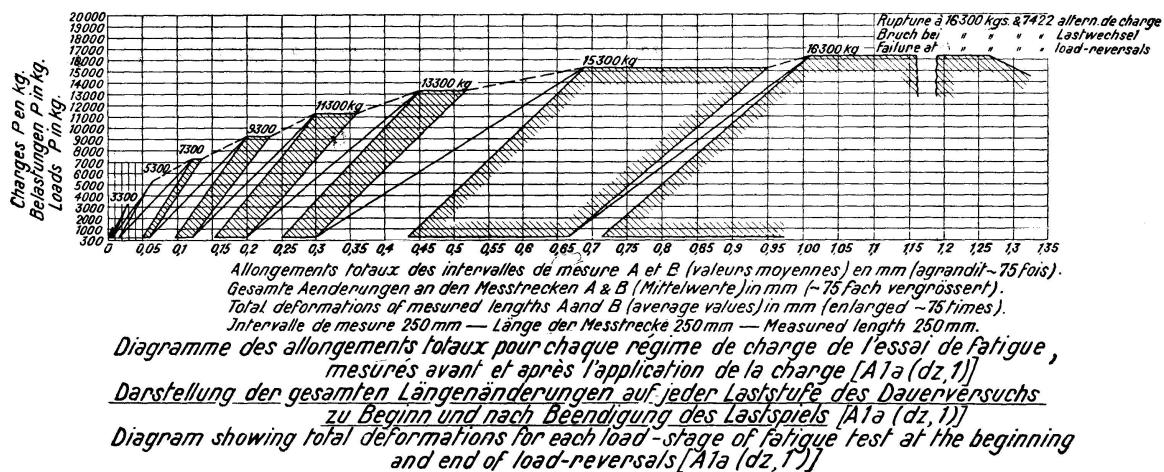


Fig. 22.

gelochten Stäben aus St 52 mit Nieten St 52 nicht zu beobachten (vergl. Tafel 3). Bei einer dreireihigen Nietverbindung — Bleche St 37, Niete St 34 — trat die Zerstörung des Prüfkörpers außerhalb der Lochwand ein (Fig. 36).

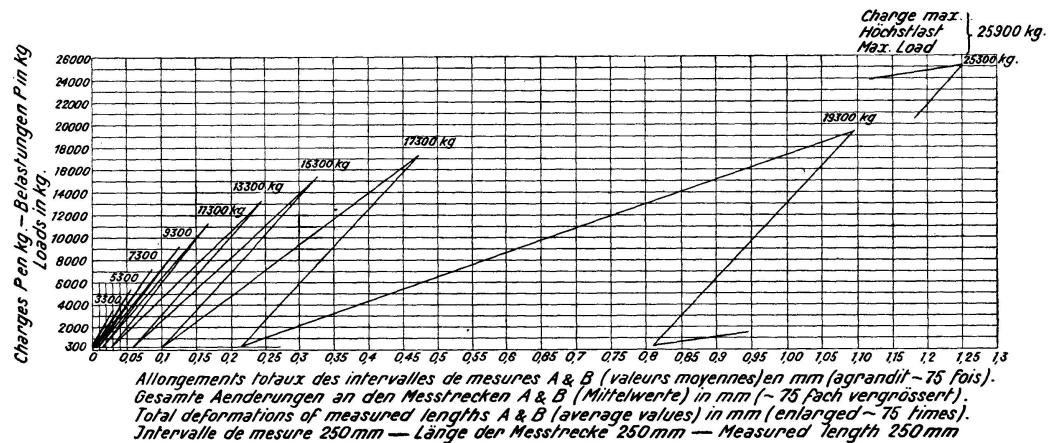


Fig. 23.

Diese Feststellung beweist den großen Einfluß der Klemmwirkung der Niete, der im Gleitwiderstand zum Ausdruck kommt.

Der Gleitwiderstand ist abhangig von der Ausführung der Nietung und vom Nietwerkstoff. Nach Untersuchungen von Prof. GRAF ist die Klemmkraft der Niete aus St 52 sowohl bei Nietung mit Lufthammern als mit Pressen kleiner ausgefallen als bei Nieten St 34.

Auf Grund der ungünstigen Ergebnisse mit Nieten aus St 52 hat man neuerdings für Konstruktionen aus St 52 Niete aus St 44 vorgeschrieben. Bei der Ausführung langer Niete ist zu fordern, daß der Nietschaft vorgestaucht wird. Es scheint, daß Niete höherer Festigkeit zur Erzielung eines größeren Gleitwiderstandes eines höheren Nietdrucks bedürfen.

Jeder Praktiker des Stahlbrückenbaus weiß, daß für die Bewährung und dauernde Haltbarkeit der Nietverbindungen neben der Festigkeit der Reibungsschluß von ausschlaggebender Bedeutung ist. Das Streben der Prak-

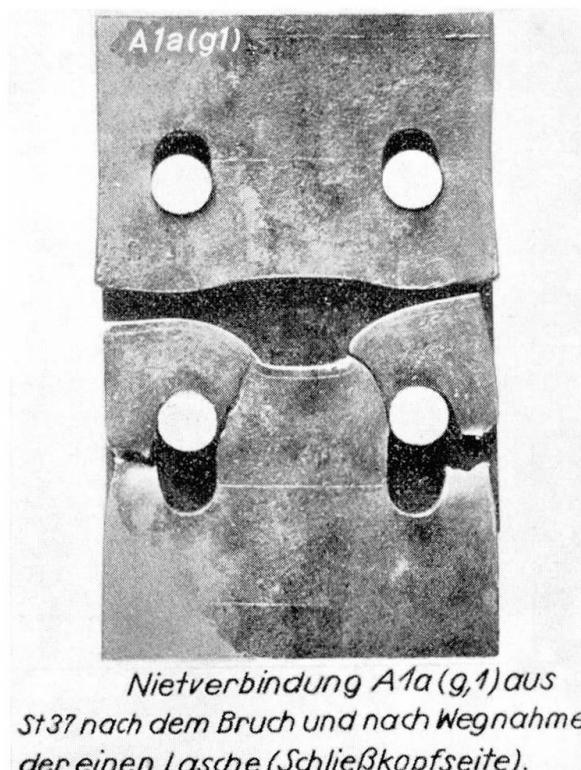


Fig. 24.
Rivure A 1 a (g, 1) en acier St 37 après rupture et après enlèvement du couvre-joint (côté de la tête de fermeture).
Nietverbindung aus St 37 nach dem Bruch und nach Wegnahme der einen Lasche (Schließkopfseite).
Riveted joint steel St 37, after rupture and after removing one butt strap (on the side of the closing head).

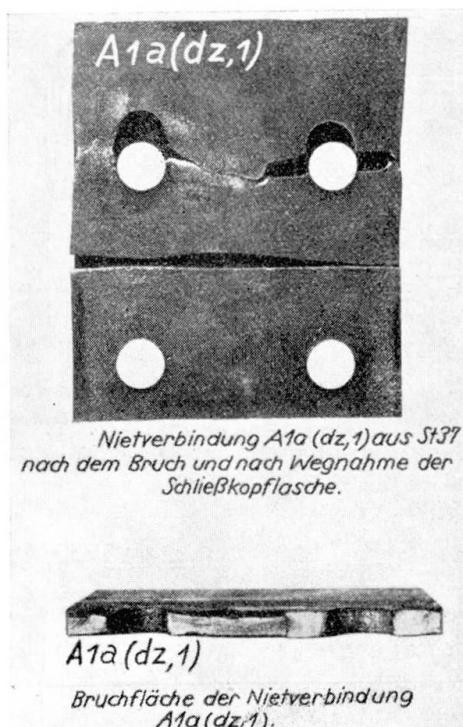


Fig. 25.

Rivure A 1 a (g, 1) en acier St 37 après rupture et après enlèvement du couvre-joint (côté de la tête de fermeture).
Nietverbindung aus St 37 nach dem Bruch und nach Wegnahme der einen Lasche (Schließkopfseite).
Riveted joint steel St 37, after rupture and after removing one butt strap (on the side of the closing head).

tiker war deshalb immer auf das starke Zusammenpressen der zu verbindenden Teile zur Erzielung eines möglichst hohen Gleitwiderstandes gerichtet. Durch Zwischenanstriche aus Bleimennige oder sonstigen Rostschutzfarben wird die Reibung zwischen den Blechen vermindert. Die Ursprungsfestigkeit von Nietverbindungen, Bleche St 37, Niete St 34, ohne Zwischenanstrich vernichtet, wurde zu 19—21 kg/mm² gefunden, die aus den gleichen Werkstoffen hergestellten und an den Berührungsflächen mit magerer Bleimennige gestrichenen Verbindungen ergaben Ursprungsfestigkeiten von höchstens 13 kg/mm². Bei den aus St 52 hergestellten Nietverbindungen war der entsprechende Spannungsabfall noch etwas größer. Die Schmierwirkung der Ölfarbanstriche nimmt mit zunehmendem Alter der Prüfkörper ab.

Bei mehrreihigen Nietverbindungen, z. B. Zugstößen von Blechen, die nach den heute gültigen Vorschriften BE oder DIN 1073 bemessen und dem gewöhnlichen Zerreißversuch unterworfen werden, tritt der Bruch in der Regel durch Abreißen des Bleches in dem durch die Nietlöcher verschwächten Querschnitt bei den äußersten Nieten nach vorausgegangenen starken Verformungen und Einschnürungen ein (Fig. 24—30 und 36). Die aus der Bruchlast B_z errechnete Spannung σ_{Bz} entspricht annähernd der Zugfestig-

Tableau 1 — Tafel 1 — Table 1.

Matiériaux Werkstoff — Material	St. 37 Qualité de réception Abnahmefähigkeit Delivery quality	St. 52	
		Barre A avec entailles fines, en forme de fissures sur les bords Stab A (Abb. 23) mit feinen rißart. Kerben in der Randzone Bar A with hair cracks in the marginal zone	Barre B avec surface lisse sans entailles Stab B (Abb. 24) mit glatter Oberfläche ohne Kerben Bar B with smooth surface free of cracks
Résistance à la traction — Zugfestigkeit kg/mm ² — Tensile strength	38	54	56
Allongement à la rupture — Bruchdehnung % — Elongation at rupture	24	25	25
Striction à la rupture — Bruchquerschnittsverminderung % — Reduction in area at fracture	60	61	63
Limite d'écoulement — Streckgrenze — Yield point	28	36	38
Résistance aux efforts répétés non alternés — Ursprungsfestigkeiten kg/mm ² — Initial strengths	Barreau d'essai entièrement poli — Prüfstab allseitig poliert — Test bar polished on all sides	29	35
	Barreau plat ayant sur deux surfaces la texture superficielle du laminage et poli aux sections — Flachstab an zwei Flächen mit Walzhaut, an den Schnittflächen poliert — Flat bar with rolling skin on two areas and polished sections	28	21
	Barreau plat perforé ayant la texture superficielle du laminage — Flachstab mit Walzhaut und Bohrung — Flat bar covered with rolling skin, with punched holes	19	15
			23

keit des Werkstoffes. Der Dauerzugversuch ergibt andere Brucherscheinungen. Die Zerstörung des Bleches geht vom seitlichen Lochrand der ersten Niete aus, beginnt mit einem Anriß (spröder Trennungsbruch), der sich allmählich vergrößert, bis der Restbruch unter den vom gewöhnlichen Zerreißversuch her bekannten Erscheinungen eintritt (Fig. 24—30 und 36). Die Dauerbruchlast liegt dabei wesentlich unter der statischen Bruchlast.

Einige Ergebnisse vergleichender Versuche mit doppelachsigen Zugstößen (ein-, zwei- und dreireihige Nietverbindungen), aus Baustählen verschiedener Güte und Herkunft hergestellt, sind in Tafel 4 (Stahlbau, 3. Jahrgang, 1930, Heft 25) zusammengestellt.

Mit den Bruchlasten beim Dauerversuch und beim gewöhnlichen Zugversuch wurden die Vergleichszahlen Dauerbruchfestigkeit und Dauerbruchfestigkeit errechnet. Die Ursprungsfestigkeit σ_{Du} der dreireihigen Streckgrenze

Nietverbindung aus Blechen St 37 und Nieten St 34 betrug 50 bis 60 % der im gewöhnlichen Zerreißversuch festgestellten statischen Bruchfestigkeit σ_{Bz} . Die Dauerversuche mit dreireihigen Nietverbindungen gleicher Abmessungen

Fig. 26—30.

Confortement d'un assemblage avec rivure à trois rangs à l'essai normal de traction et à l'essai de fatigue à la traction.

Verhalten einer dreireihigen Nietverbindung beim gewöhnlichen Zugversuch und beim Dauerzugversuch.

Behaviour of a triple riveted joint for ordinary tension test and for fatigue-tension test.

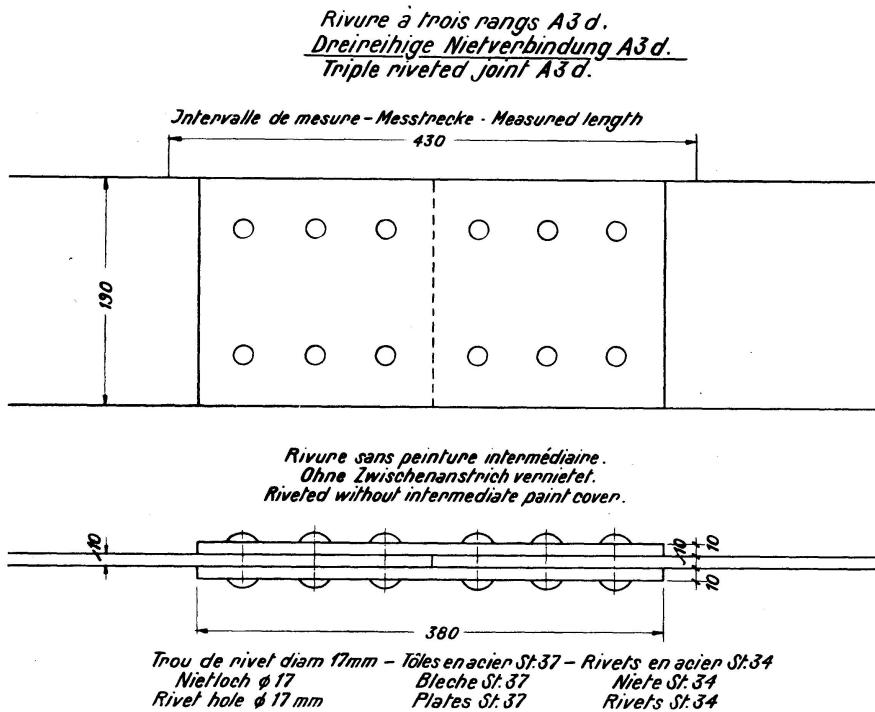


Fig. 26.

aus hochwertigen Stählen (Bleche und Niete St 52) ergaben ein Verhältnis

$$\frac{\text{Ursprungsfestigkeit } \sigma_{Du}}{\text{stat. Bruchfestigkeit } \sigma_{Bz}} = 0,30 \text{ bis } 0,40.$$

Wie ist die Nietverbindung zu gestalten, damit die Dauerfestigkeit einen Größtwert erreicht?

Zur Beantwortung dieser Frage mußten Versuchsreihen geprüft werden, um den Einfluß der Verhältnisse $\sigma : \tau : \sigma_l$ festzustellen. Man variierte $\sigma : \tau$ zunächst zwischen 0,8, 1,0 und 1,2 und für jede dieser Nietbesetzungen $\sigma : \sigma_l$ zwischen 1,5, 2,0 und 2,5. Die Versuchsreihen lieferten folgende Ergebnisse:

Je stärker die Nietbesetzung, d. h. je kleiner $\frac{\tau}{\sigma}$, umso größer der Reibungswiderstand, umso höher die Dauerfestigkeit der Verbindung (Fig. 39). Bei

Tableau 2 — Tafel 2 — Table 2.

Matériaux Werkstoff — Material	St. 52	
	Epaisseur -- Dicke — Thickness 8 mm	10 mm
Limite supérieure d'écoulement — Obere Streckgrenze σ_{s_0} — Upper yield point	43	41
Limit inférieure d'écoulement — Untere Streckgrenze σ_{su} — Lower yield point	42	39
Résistance à la traction — Zugfestigkeit k_2 — Tensile strength	65	55
Allongement à la rupture — Bruchdehnung % — Elongation at rupture	20	25
Striction à la rupture — Querschnittsverminderung % — Reduction in area at fracture	44	58

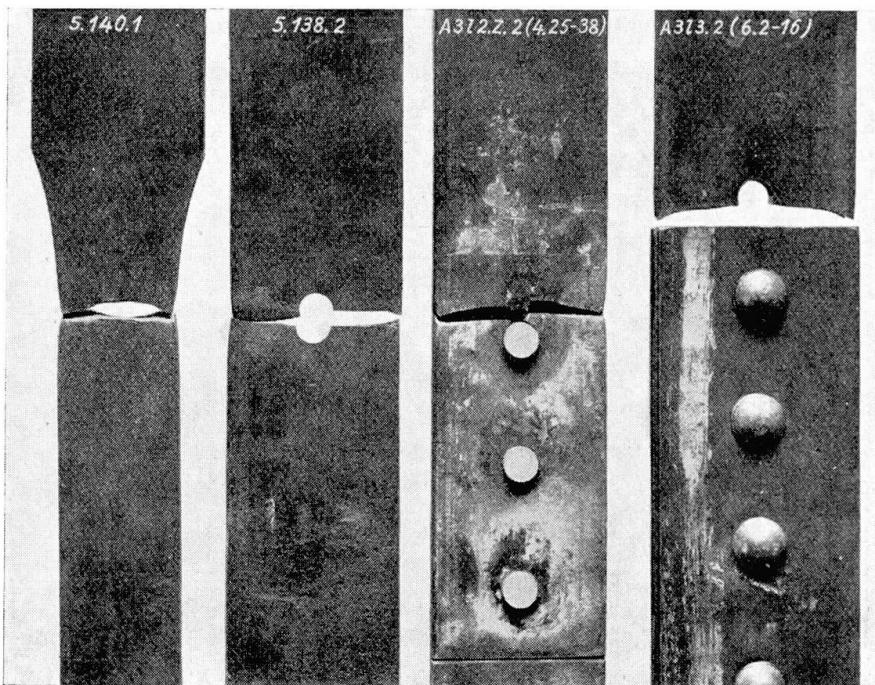
Résultats des essais de fatigue sur des barreaux plats perforés et non perforés.

Ergebnisse der Dauerversuche mit gelochten und ungelochten Flachstäben.

Results of fatigue tests of flat bars with and without punched holes.

Barre d'essai Prüfkörper — Test bar	Contraintes nominales à la limite supérieure de charge en kg/mm ² pour contrainte préliminaire de 0,5 kg/mm ² Nennspannungen an der oberen Belastungsgrenze in kg/mm ² bei 0,5 kg/mm ² Vorspannung Nominal stresses at the upper load limit in kg/mm ² with a pre-stress of 0,5 kg/mm ²
Barre pleine — Vollstab 60 × 10 mm — Full bar	37
Barreau plat 85 × 10 mm perforé. Les côtes resserrés sont aplani dans le sens longitudinal, diamètre des trous 17 mm — Gelochter Flachstab 85 × 10 mm. Schmalseiten in der Längsrichtung geschlachtet. Lochdurchmesser 17 mm — Perforated flat bar 85/10 mm. Edges planed longitudinally. Diameter of holes 17 mm	22
Rivure à trois rangs, barres et couvre-joints 85 × 10 mm, diamètre des trous de rivure 17 mm. Surfaces de contact sablées et rivées sans vernis intermédiaire — Dreireihige Nietverbindung, Stab und Laschen 85 × 10 mm, Nietloch-durchmesser 17 mm. Berührungsflächen mit Sandstrahl-behandelt und ohne Zwischenanstrich vernietet. $\sigma : \sigma_t : \tau = 1 : 1,32 : 0,50$ — Riveted triple row joint, bar and straps 85/10 mm. Rivet hole diameter 17 mm. Contact areas sand-jet treated and riveted without intermediary point cover	21

Rupture après l'essai de fatigue de traction.
 Bruchbilder nach dem Dauerzugversuch.
 Fractures after the fatigue tension test.



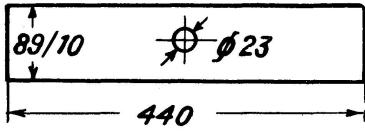
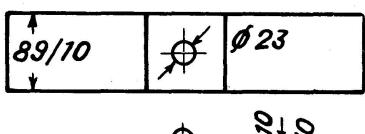
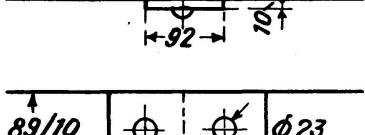
dichter Nietbesetzung steigt die Dauerfestigkeit der Nietverbindung über die des gelochten Stabes. Nach $\tau \geq 1,0$ setzt ein starker Spannungsabfall ein. Bei Lochwanddrücken σ_l zwischen 1,5 und 2,0 σ , sowie $\tau = 0,80$ ist die Abnahme der Dauerfestigkeit gering, überschreitet der Lochwanddruck jedoch den Wert 2,5 σ , so tritt ein starker Spannungsabfall ein (Fig. 40).

In Fig. 41 sind die Ursprungsfestigkeiten von Nietverbindungen St 37 (Niete St 34) für gleichbleibenden Lochwanddruck $\sigma_l = 2,5 \sigma$ und verschiedene Nietbesetzung $\tau = 0,8$ bis 1,25 σ in Hundertteilen der Ursprungsfestigkeit des gelochten Stabes bezogen auf τ/σ aufgetragen. Mit zunehmender τ/σ fällt die Kurve stetig ab. Bereits bei $\tau = 1,0 \sigma$ ist die Ursprungsfestigkeit des gelochten Stabes erreicht.

In Fig. 42 sind die Ursprungsfestigkeiten der Nietverbindungen St 37 für verschiedene Verhältnisse σ_l/σ in Abhängigkeit von der Nietbesetzung $\frac{\tau}{\sigma}$ aufgetragen.

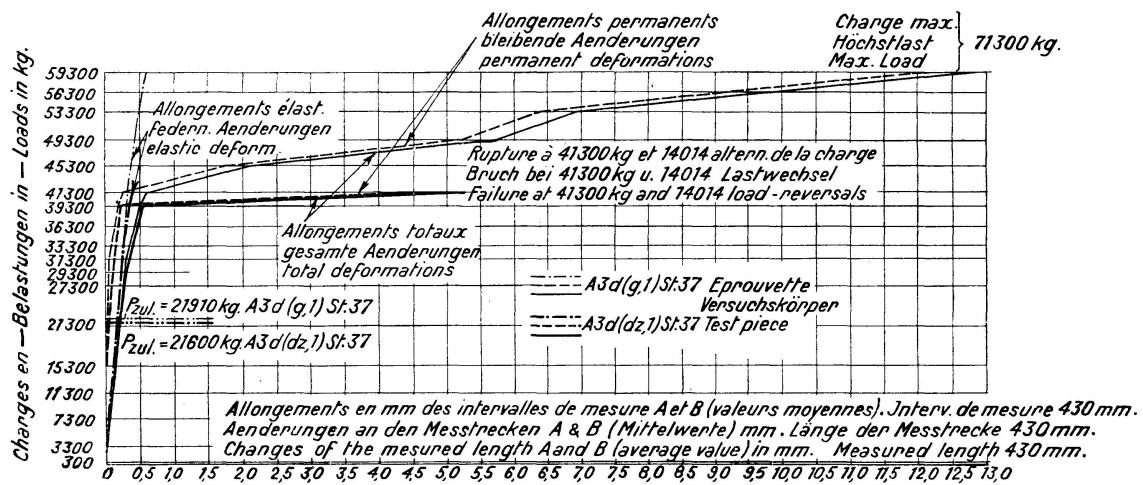
Bei dichter Nietbesetzung ($\frac{\tau}{\sigma} < 0,8$) und mäßigem Lochwanddruck ($\sigma_l < 1,5 \sigma$) ist die Zerstörung des Blechs vor dem ersten Nietloch möglich, wobei die Dauerfestigkeit der Nietverbindung über der des gelochten Stabes (Grundform) liegt. Im übrigen erfolgt der Bruch bei den üblich bemessenen Nietverbindungen stets in dem durch die Nietlöcher verschwächten Querschnitt der äußeren Nietreihen. Die vom Lochrand ausgehenden Dauerbruchanrisse verlaufen etwas geneigt zur Stabachse (Fig. 43), während am gelochten Stab im Dauerzugversuch der Einriß am Lochrand senkrecht zur

Tableau 3 — Tafel 3 — Table 3.

Matériaux — Werkstoff — Material	St. 37	St. 52
Résistance à la traction — Zugfestigkeit kg/mm ² — Tensile strength	44	57
Allongement à la rupture — Bruchdehnung % — Elongation at rupture	29	21
Striction à la rupture — Bruchquerschnittsver- minderung % — Reduction in area at fracture	65	59
Limite d'écoulement — Streckgrenze — Yield point	30	36
Eprouvettes-Prüfstäbe - Test bars		
	18	18
	23	17
	18	14
		

Hauptzugrichtung eintritt (Fig. 44). Diese Erscheinung ist auf die ungleichmäßige Verteilung des Lochwanddruckes zurückzuführen und weist darauf hin, daß die Formänderungen der Niete möglichst niedrig zu halten sind. Brüche in den Nieten ergaben sich erst bei $\tau > 1,25 \sigma$ und auch hier nur bei Ursprungsbelastung. Die Niete wurden jedoch nicht abgeschert, wie beim gewöhnlichen Zugversuch (Fig. 49), sondern durch Biegeüberanstrengung zerstört (Fig. 50, 51). Eine Erhöhung der zulässigen Scherbeanspruchung, die an sich mit Rücksicht auf die Widerstandsfähigkeit der Niete möglich wäre, hat starke Verformungen der Niete zur Folge, wodurch die Verteilung des Lochwanddrucks und damit die Anstrengung des Werkstoffs am Rande der Nietlöcher ungünstig beeinflußt wird.

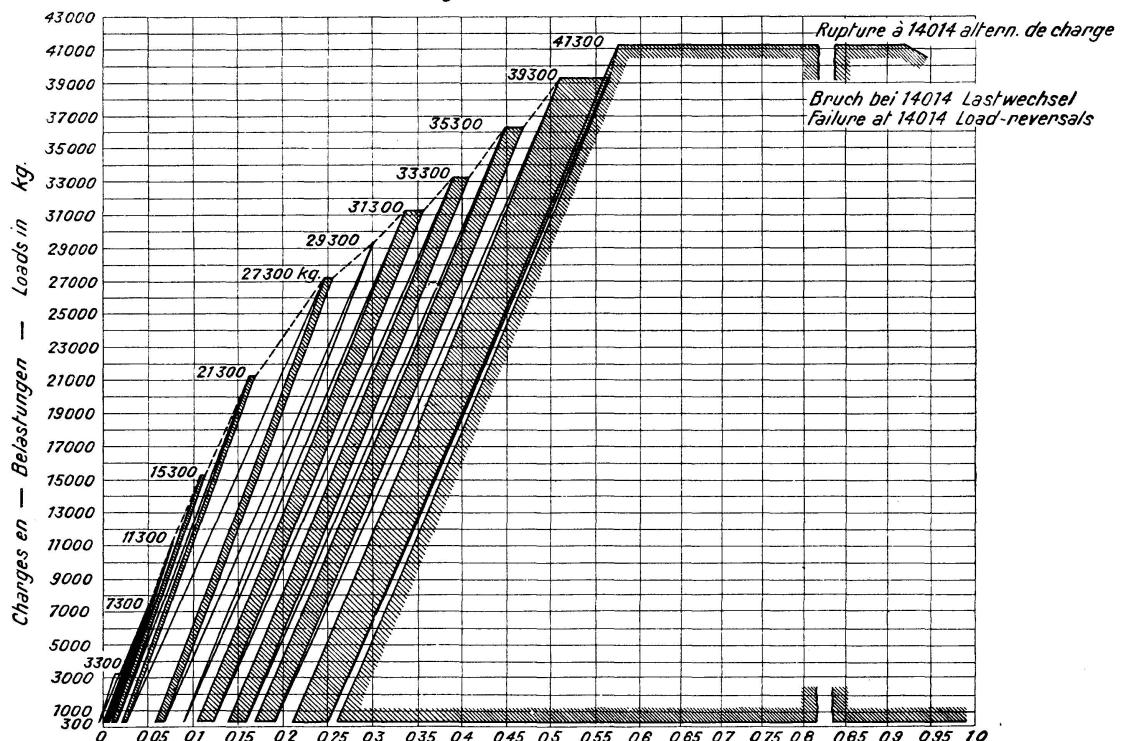
Nach den Ergebnissen der Stuttgarter Dauerversuche kann in Übereinstimmung mit den älteren statischen Versuchen und mit den langjährigen praktischen Erfahrungen die von SCHWEDLER getroffene Wahl der Verhältniszahlen $\tau_{zul} = 0,8 \sigma_{zul}$ und $\sigma_{l,zul} = 2,0 \sigma_{zul}$ für die Bemessung der Nietverbindungen aus gewöhnlichem Baustahl als sehr glücklich bezeichnet werden. Eine Erhöhung der zulässigen Scherspannung τ_{zul} auf σ_{zul} und des zulässigen



Comparaison des allongements totaux et permanents, mesurés par essai statique et de fatigue.

Gegenüberstellung der gesamten und bleibenden Längenänderungen beim statischen und beim Dauerversuch.

Comparison of total and permanent deformations of length for static and fatigue tests.



Allongements totaux en mm des intervalles de mesure A et B (valeurs moyennes). Intervalle de mesure 430 mm.
Gesamte Aenderungen an den Messstrecken A & B (Mittelwerte) in mm. Länge der Messstrecke 430 mm.
Total deformations of the measured length A and B (average value) in mm.

Diagramme des allongements totaux pour chaque régime de charge de l'essai de fatigue, mesures au commencement et à la fin de l'application de la charge.

Darstellung der gesamten Längenänderungen auf jeder Laststufe des Dauerversuches zu Beginn und bei Beendigung des Lastspiels.

Diagrams showing total deformations for different load - stages during fatigue tests, always at the beginning and end of the load-reversals.

Fig. 27 und 28.

Tableau 4 — Tafel 4 — Table 4.

Eprouvettes barreau plat perforé Prüfkörper gelochter Flachstab Test pieces perforated flat bar Rivure — Nietverbindung ¹⁰ — Riveted joint Verhältnis — Proportion $\sigma : \sigma_l : \tau$			Essai ord. à la traction Gewöhnl. Zugversuch Ordinary tension test Contraintes dues à la charge de rupture Bruchlastspannungen Stresses at failure in kg/mm ²			Essai de fatigue Dauerversuch Fatigue test (contrainte préliminaire - Vorspannung - pre-stress $\sigma_g = 0,5 \text{ kg/mm}^2$)		
	σ_{max}	$\sigma_l max$	τ_{max}	σ_0	σ_{l_0}	τ_0	Charged.rupture statique Stat. Bruchlast Static load at failure	Limite d'écoulement Streckgrenze Yield point
1 Gelochter Flachstab St. 37 Nietverbindung	40			19			0,5	0,8
2 Bleche St. 37, Niete St. 34 einreihig 1 : 4,16 : 1,54	21	85	31 ⁵ (Niete abgescherkt)	11	45	17	0,5	0,4 ₅
3 1 : 2,48 : 0,78	40	99	31 ⁶ (Flachstab gebrochen)	20	50	16	0,5	0,8
4 1 : 2,50 : 0,93	—	—	—	20	50	19	0,5	0,8
5 1 : 2,50 : 1,08	—	—	—	17	42	18	0,4	0,7
6 1 : 2,50 : 1,24	—	—	—	13	32	16	0,3	0,6
7 zweireihig 1 : 2,1 : 0,79	36	76	28 ⁵ (Niete abgescherkt)	19	40	15	0,5	0,8
8 dreireihig 1 : 1,4 : 0,52	38	53	20 ⁶ (Flacheisen gebrochen)	21	29	11	0,5 ₅	0,9
1 Gelochter Flachstab St. 52 Nietverbindung	55			16			0,3	0,4
2 Bleche St. 52, Niete St. 52 einreihig 1 : 2,48 : 0,74	52	128	38	21	52	15	0,4	0,6
3 1 : 4,18 : 0,90	29	119	42	8,0	33	12	0,3	0,2
7 zweireihig 1 : 2,10 : 0,75	54	111	39 ⁶ (Flacheisen gebrochen)	10	20	7	0,2	0,3
8 dreireihig 1 : 1,40 : 0,51	54	77	28 ⁶ (Desgleichen)	10	14	5	0,2	0,3
2 Nietverbindung Bleche St. 52, Niete St. 44 einreihig 1 : 1,56 : 0,68	58	91	39	16	25	11	0,3	0,4
7 zweireihig 1 : 1,56 : 0,72	58	91	39	12	19	9	0,2	0,3
9 mit Zwischenanstrich 10 ohne „“	—	—	—	18	28	13	0,3	0,5
8 dreireihig 1 : 1,49 : 0,56	57	85	32	21	31	12	0,4	0,5

¹ barreau plat perforé² rivure³ tôles⁴ à un rang⁵ rivet cisallé

perforated flat bar

riveted joint

sheets

single row

rivet show

⁶ barreau plat rompu⁷ à deux rangs⁸ à trois rangs⁹ avec vernis intermédiaire¹⁰ sans vernis intermédiaire

flat bar broken

double row

triple row

with intermediary paint cover

without intermediary paint cover

Lochwanddrucks $\sigma_{l,zul}$ auf 2,5 σ_{zul} erscheint bei besonders sorgfältig hergestellten Nietverbindungen aus St 37 (Niete St 34) auch für dynamische Anstrengung unbedenklich. Demgegenüber ist bei Nietverbindungen aus hochwertigen Stählen, z. B. St 52, eine stärkere Nietbesetzung $\tau_{zul,52} = 0,64 \sigma_{zul,52}$ und eine Herabsetzung des zulässigen Lochwanddrucks auf 1,5 $\sigma_{zul,52}$ zu empfehlen. Die aus dem ungünstigeren Verhalten der Nietverbindungen St 52 gefolgte Abminderung der zulässigen Scherspannung und des zulässigen Lochwanddrucks um 20 % gegenüber den bisherigen Werten lässt sich durch die

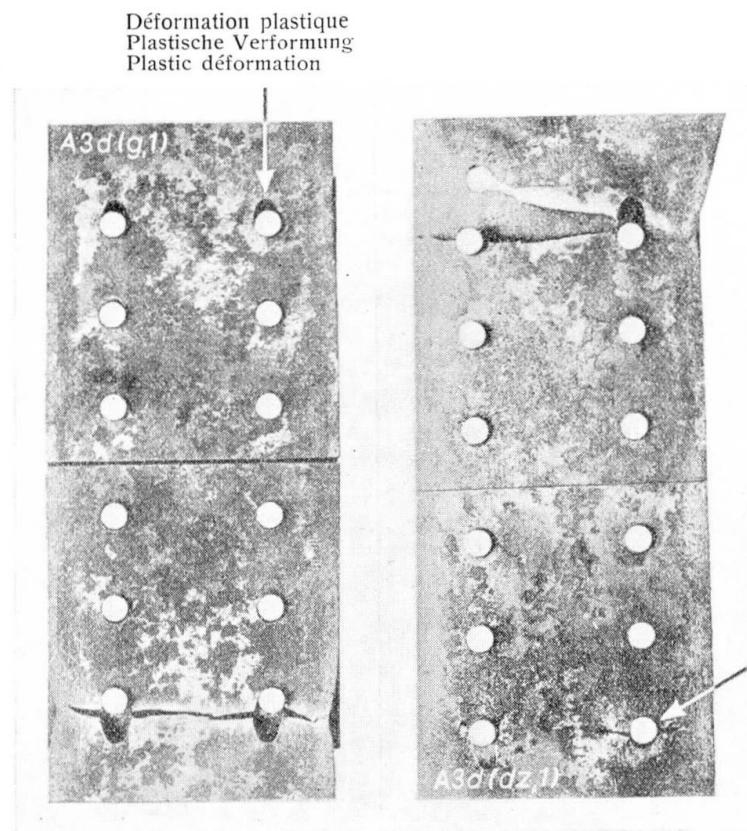


Fig. 29.

Fig. 30.

von Prof. GRAF nachgewiesene geringere Schließkraft der Niete St 44 erklären. Die deutsche Reichsbahn hat in ihren „vorläufigen Bestimmungen für die Lieferung von Stahlbauwerken“ den Versuchsergebnissen insoweit Rechnung getragen, als unter IV. der zulässige Lochwanddruck $\sigma_{l,zul,52}$ auf 2,0 $\sigma_{zul,52}$ (statt bisher 2,5 $\sigma_{zul,52}$) herabgesetzt wurde.

Zu erwähnen ist noch, daß zur Zeit Dauerversuche zur Ermittlung der Zugdruckwechselfestigkeit von Nietverbindungen im Gange sind. Die Versuche werden auf einer von der Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg gelieferten Dauerprüfmaschine für 200 t Höchstlast (Zug oder Druck, Biegung, sowie Wechsel von Zug und Druck) durchgeführt. Nach den vorläufigen Ergebnissen steht zu erwarten, daß die Zugdruckwechselfestigkeit von Nietverbindungen mit $\sigma:\tau:\sigma_l = 1:2:0,8$ bei St 37 und St 52 zwischen 1400 und 1600 kg/cm² liegt.

Nach den aus statischen Versuchen vorliegenden Erkenntnissen ist bei mehrreihigen Nietverbindungen der Anteil der einzelnen hintereinander liegenden Nietreihen an der Kraftübertragung sehr verschieden. Die äußerste

Nietreihe übernimmt den größten, die mittlere Nietreihe den kleinsten Kraftanteil, solange die Spannungen unter der Elastizitätsgrenze liegen. Auf höheren Belastungsstufen tritt eine Annäherung an die theoretischen Grenzfälle ein:

- Stab und Laschen starr, Niete elastisch, bei dem die Stabkraft sich gleichmäßig auf alle Niete verteilt;
- Stab und Laschen elastisch, Niete starr, bei der nur die äußersten Niete eines Anschlusses beansprucht werden, die dazwischen liegenden spannungslos bleiben.

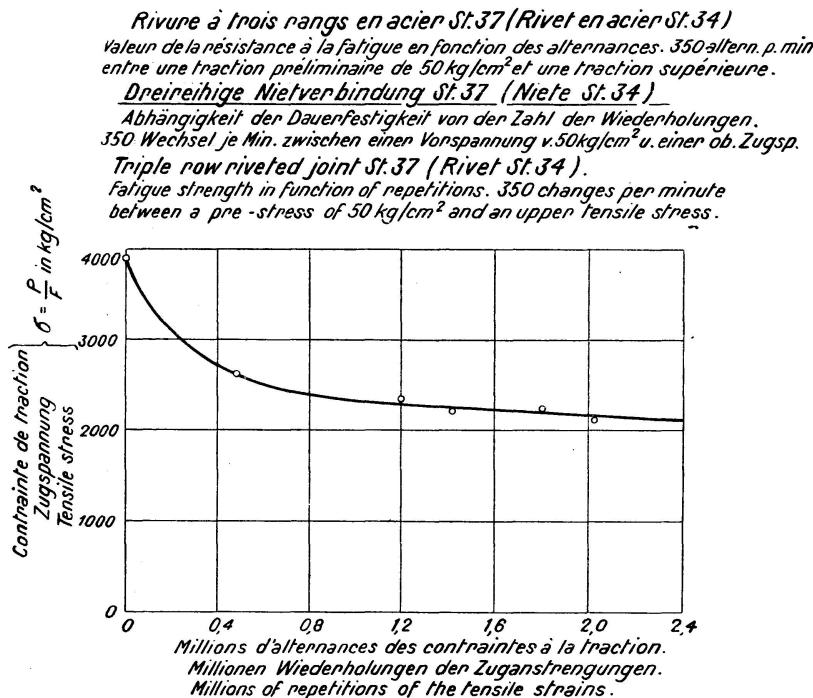


Fig. 31.

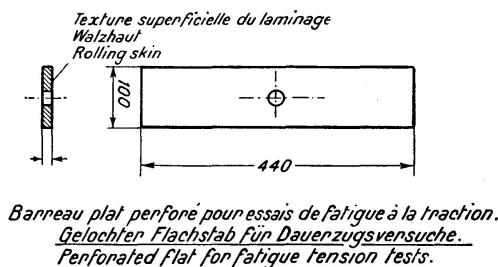


Fig. 32.

Durch oftmals wiederholte Belastung vermag sich die Nietverbindung auf den jeweiligen Belastungszustand einzuspielen. Schon im zulässigen Spannungsbereich ändert sich die Kraftverteilung auf die einzelnen Nietreihen; sie ist beim Erreichen des Ausgleichzustands günstiger als bei der einmaligen Belastung. Auch in dieser Hinsicht sind die Nietverbindungen aus weichen Stählen denen aus harten Stählen überlegen. Um die mehrreihige Nietverbindung harter Stähle nachgiebiger zu machen, hat man Bleche aus St 52 mit Nieten St 34 verbunden und damit eine wesentliche Steigerung der Dauerfestigkeit und eine günstigere Ausnutzung des Werkstoffs erzielt.

Die Tatsache, daß die im Dauerversuch festgestellten Dauerfestigkeitswerte unter den im gewöhnlichen Zugversuch festgestellten statischen Bruchfestigkeiten liegen, läßt sich dadurch erklären, daß bei allmählich und stetig ansteigender Belastung bis zum Bruch (statischer Bruchversuch) bei Werkstoffen mit plastischem Verhalten ein weitgehender Spannungsausgleich eintritt, die Wirkung der Spannungsschwellen und Spannungsspitzen durch die Plastizität des zähen Werkstoffs teilweise oder ganz überwunden wird.

Bei oftmals wiederholter schwelender (in einer Richtung stetig ansteigender und nach einer Ruhepause wieder absinkender) Belastung bilden die

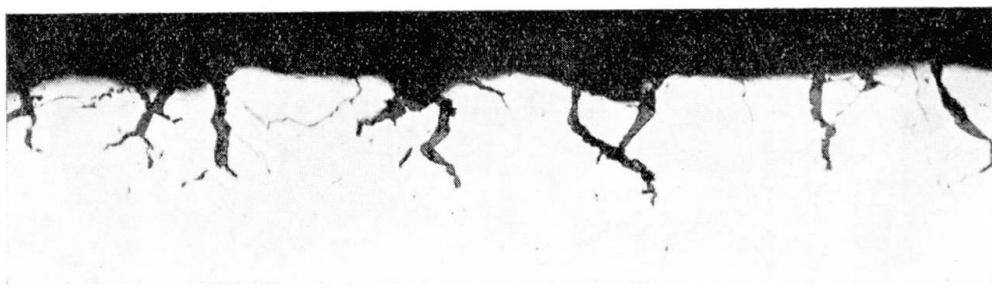


Fig. 33.

Zône périphérique d'une pièce en acier St 52, avec de nombreuses fissures pénétrantes-grossessement 66.

Randzone eines Stahls 52. Mit zahlreichen rißartigen Kerben. Vergr. 66 \times .
Marginal zone of a steel 52. With many crack-like indentations. Magn. 66.

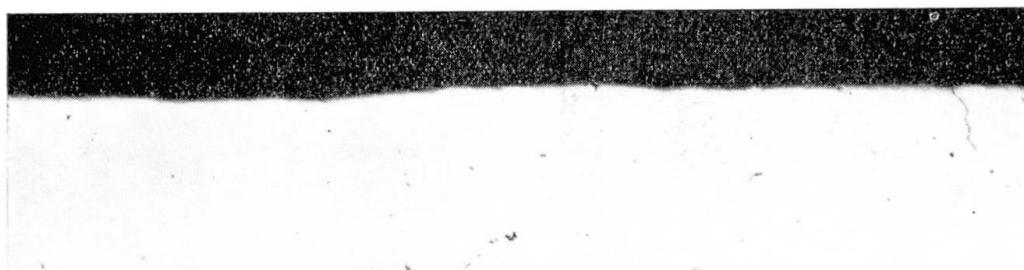


Fig. 34.

Pièce en acier St 52 avec surface lisse, sans fissuration. Grossessement 66.

Stahl 52 mit glatter Oberfläche, ohne Kerben. Vergr. 66 \times .
Steel 52 with smooth surface, without cracks. Magn. 66.

Stellen örtlichen Spannungsanstiegs (z. B. der Spannungsspitzen im Lochrande der äußeren Nietreihen) den Ausgangspunkt des Dauerbruchs. Das plastische Formänderungsvermögen bleibt gesetzmäßig auf kleine Stellen beschränkt, von denen die Kohäsionszerrüttung ausgeht. Ein Spannungsausgleich kann deshalb nur in beschränktem Maße stattfinden. Fände ein Spannungsausgleich überhaupt nicht statt, so würden zweifellos die Spannungsspitzen viel früher zum Bruche führen. Auch müßte eine einreihige Verbindung verhältnismäßig mehr leisten als eine mehrreihige Verbindung. Das Einspielen der Nietverbindung auf den jeweiligen Belastungszustand bei oftmals wiederkehrenden Lastspielen ermöglicht, daß die Nietverbindung als Ganzes auch bei örtlicher Überschreitung der Fließgrenze sich noch elastisch verhält. Die Dauerversuche bestätigten die erstmal von SCHACHENMAIER in seinem Vortrag über „die Zähigkeit der Flußeisensorten als Sicherheitsgrad

bei Eisenbauten“ (Hauptversammlung des Deutschen Stahlbau-Verbands 1922) vertretene Auffassung¹⁶⁾), „daß sich mit wachsenden Belastungen infolge der dem Werkstoff innenwohnenden Zähigkeit ein Ausgleich der Belastungen und Spannungen vollziehe und eine Verfestigung eintrete und daß

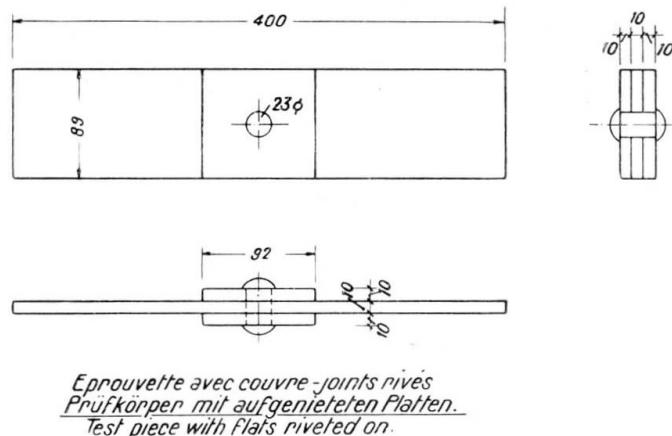
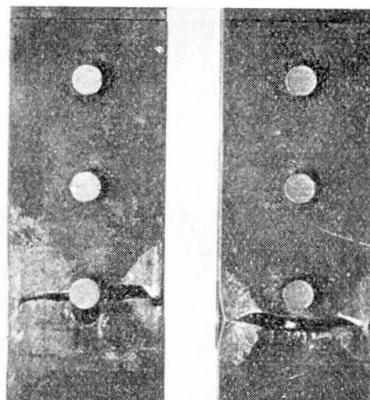


Fig. 35.



$\sigma = 24,0 \text{ kg/mm}^2$
1201600 Lastwechsel $\sigma = 22,7 \text{ kg/mm}^2$
1786400 Lastwechsel
St 37 (b, 4722)

Fig. 36.

Rivure à trois rangs à grande résistance de glissement. Images de rupture, un couvre-joint étant enlevé. Rupture à la fatigue. Fissure en dehors du trou.

Dreireihige Nietverbindung mit Bruchbildern, eine Lasche abgenommen. Dauerbruchanriß außerhalb der Lochwand.

Low slip triple joint. Fractures, one strap removed. Fatigue failure. Cracks outside edge of hole.

sich diese günstigen Wirkungen bis zu einem gewissen Grade auch bei oft-mals wiederholten Belastungen zeige“.

Bisher bestand ein unüberbrückbarer Widerspruch zwischen der in der Praxis üblichen Berechnung von Nietverbindungen und den Ergebnissen genauer Messungen im praktisch zulässigen Spannungsbereich beim statischen Zugversuch. Der theoretischen Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der Last auf die einzelnen Niete einer Verbindung stand eine beim gewöhnlichen Zugversuch nachgewiesene weitgehend ungleichmäßige Kraftverteilung auf

¹⁶⁾ Bauingenieur 1922, Heft 24.

die einzelnen Niete gegenüber. Die Dauerversuche haben die Verhältnisse geklärt; dabei sind wertvolle neue Erkenntnisse gewonnen worden, die mit den günstigen praktischen Erfahrungen durchaus in Einklang stehen. Innerhalb der aus Dauerversuchen hergeleiteten Anstrengungsgrenzen darf mit einem elastischen Verhalten der Nietverbindung als Ganzes gerechnet werden. Hiefür gelten die mathematischen Gesetze der Elastizitätslehre. Die Übertragung der neuen Erkenntnisse auf die Praxis, d. h. die Anwendung einer auf Dauerprüfergebnissen aufgebauten Festigkeitsrechnung verbürgt die betriebsichere Ausführung dynamisch beanspruchter Bauteile.

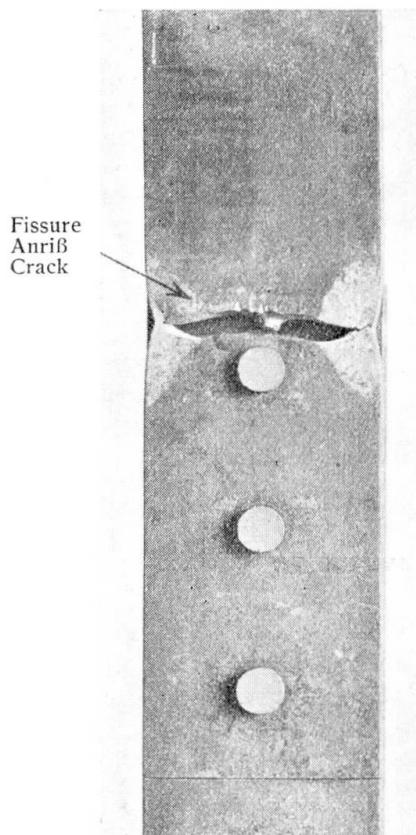


Fig. 37.

Assemblage rivé à haute résistance de glissement. Amorce de rupture à la fatigue en dehors du rivetage.

Nietverbindung mit hohem Gleitwiderstand. Dauerbruchanriß außerhalb der Nietlochwandung.

Low-slip riveted joint. Cracks developing at fatigue failure away from edge of rivet-hole.

Nach den Ergebnissen der Stuttgarter Versuche mit Nietverbindungen (Bleche St 37, Niete St 34), die für $\sigma : \sigma_t : \tau = 1 : 2 : 0,8$ bemessen und ohne Zwischenanstrich vernietet wurden, ist die Dauerfestigkeit des gelochten Stabes mit Walzhaut nahezu erreicht worden. Mit stärkerer Nietbesetzung $\tau \leq 0,8 \tau$ und Lochwanddrücken σ_t unter $1,5 \sigma$ hat sogar die Nietverbindung unter Ursprungbelastung mehr geleistet als nach der Dauerfestigkeit des gelochten Stabs aus dem gleichen Werkstoff zu erwarten war. Mehrmals ist der Dauerbruch neben dem auf die Nietlöcher verschwächten Querschnitt eingetreten. Bei Stählen St 52 ist es möglich, durch entsprechende Gestaltung und Ausführung der Nietverbindung und Verwendung eines geeigneten Nietenstahls die an Flachstäben mit Walzhaut und Bohrung nachgewiesene Dauerfestigkeit auszuschöpfen. Hiernach sind die am gelochten Stab ermittelten Spannungsfelder ohne weiteres auch für genietete Konstruktionen aus St 37 und St 52 verwendbar.

V.

In den letzten Jahren ist zu der Nietung die Schweißung als wichtiges Konstruktionsmittel hinzugekommen. Die rasche Entwicklung der Schweißtechnik gab Veranlassung zur Aufstellung von Richtlinien für die Berechnung, Bemessung und Durchbildung geschweißter Konstruktionen¹⁷⁾. Im Jahre 1931 sind die Vorschriften für geschweißte Stahlbauten DIN 4100 erschienen¹⁸⁾¹⁹⁾. Sie stützen sich auf Erfahrungen und statische Bruchversuche mit Schweißverbindungen und einfachen Konstruktionen.

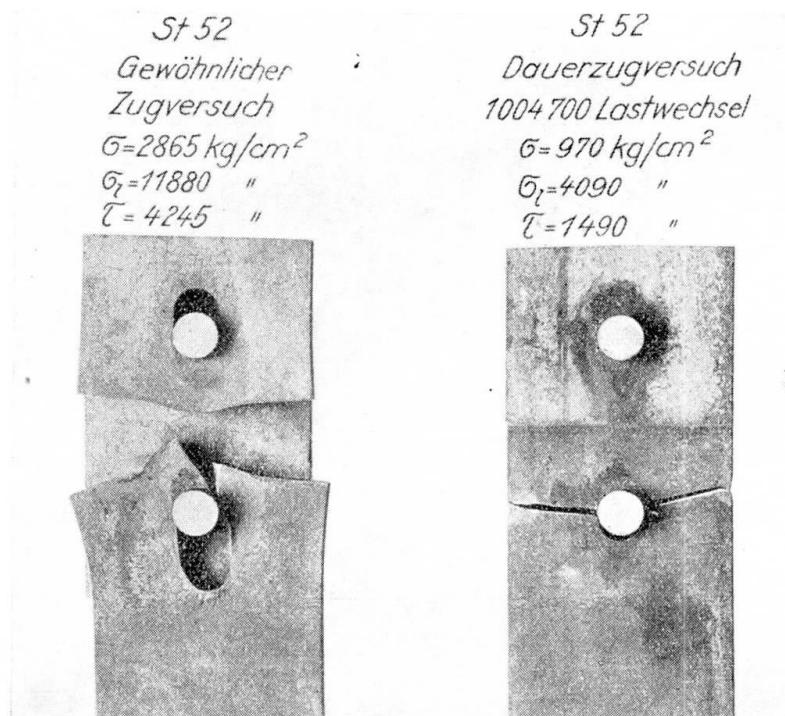


Fig. 38.

Rivure à un rang
Einreihige Nietverbindung.
Single row riveted joint.
Essai de traction ordinaire.
Gewöhnlicher Zugversuch.
Ordinary tension test.

Tôles, Bleche, Straps St. 52
Rivets, Niete, Rivet St. 52
 $\sigma : \sigma_l : \tau = 1 : 4,2 : 1,5$
Essai de fatigue à la traction.
Dauerzugversuch.
Fatigue tension test.

Die statischen Bruchversuche geben wohl einen Anhalt für die Tragfähigkeit bei überwiegend ruhender Belastung, genügen aber nicht zur Beurteilung des Verhaltens von Bauteilen, die oftmals wiederholten Belastungen unterworfen sind.

Um die Leistungsfähigkeit der üblichen Schweißverbindungen zu erkunden und einwandfreie Grundlagen für die Bemessung und bauliche Durchbildung dynamisch beanspruchter Konstruktionsteile zu erhalten, sind im Auftrage von Geheimrat Dr. Ing. e. h. SCHAPER an der Materialprüfungs-

¹⁷⁾ Richtlinien für die Ausführung geschweißter Stahlbauten im Hochbau. Stahlbau 1930, Heft 9.

¹⁸⁾ DIN 4100. Vorschriften für geschweißte Stahlbauten vom 10. Mai 1931. Beuth-Verlag G. m. b. H., Berlin.

¹⁹⁾ KOMMERELL, Erläuterungen zu den Vorschriften für geschweißte Stahlbauten. Berlin 1931. Verlag Wilh. Ernst & Sohn, Berlin.

anstalt der Technischen Hochschule Stuttgart von Prof. O. GRAF zahlreiche Dauerversuche mit Schweißverbindungen (Stumpfstöße, Laschenverbindungen mit Stirn- und Flankenkehlnähten) und geschweißten Blechträgern durchgeführt worden.

Die Beurteilung der Schweißverbindungen auf Grund von statischen Bruchversuchen allein kann leicht zu Fehlschlüssen führen, besonders dann, wenn bei dem gewöhnlichen Zug-, Druck- oder Biegungsversuch die Vorgänge im plastischen Verformungsbereich nicht genügend beachtet werden. Die Verformungsgrenze ist bei Schweißverbindungen nur durch sehr feine Messungen festzustellen, wobei vorher über den Kraftfluß und die örtlich auftretenden Spannungsschwellen und Spannungsspitzen Klarheit geschaffen

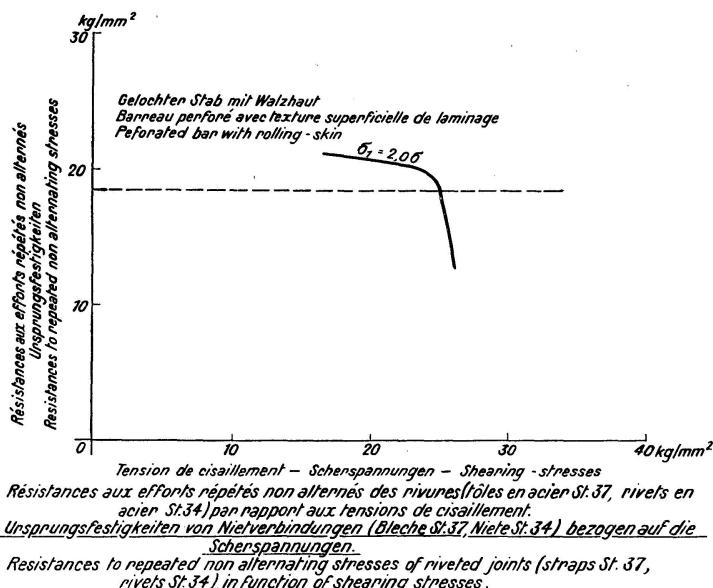


Fig. 39.

werden muß²⁰⁾). Ergebnisse solcher Messungen an Laschenverbindungen mit Flankenkehlnähten sind in Fig. 52 dargestellt.

Gegenüber den statischen Bruchversuchen haben die Dauerversuche zu oft überraschenden Ergebnissen geführt. Durch die Dauerversuche sind nicht nur Mängel der bisher üblichen Anordnungen aufgedeckt, sondern auch neue Erkenntnisse über das Wesen der Schweißverbindungen gewonnen worden. Die Versuche haben weiterhin gezeigt, wie durch konstruktive Maßnahmen die Leistungsfähigkeit der Verbindungen gesteigert werden kann und außerdem zur Klärung werkstofflicher Fragen beigetragen.

Die Leistungsfähigkeit einer Schweißverbindung bei oftmals wiederholter Belastung ist abhängig von den Festigkeitseigenschaften der Schweißnaht und von den durch thermische Beeinflussung (Verschmelzung) geänderten Eigenschaften des Mutterwerkstoffs in unmittelbarer Nähe der Schweißnaht (Übergangszone), mehr aber noch bedingt durch die Art der Kraftübertragung und den Verlauf des Kraftflusses.

Bei dynamisch beanspruchten Konstruktionen ist möglichst ungestörter Kraftfluß anzustreben, Spannungsschwellen und -Spitzen, die durch plötz-

²⁰⁾ E. GABER, Zusammenwirken von Nietung und Schweißung bei Zug und Druck. Bauingenieur 1932, S. 290.

liche Querschnittsänderungen und Umlenkungen des Kraftflusses entstehen, sollen möglichst niedrig gehalten werden.

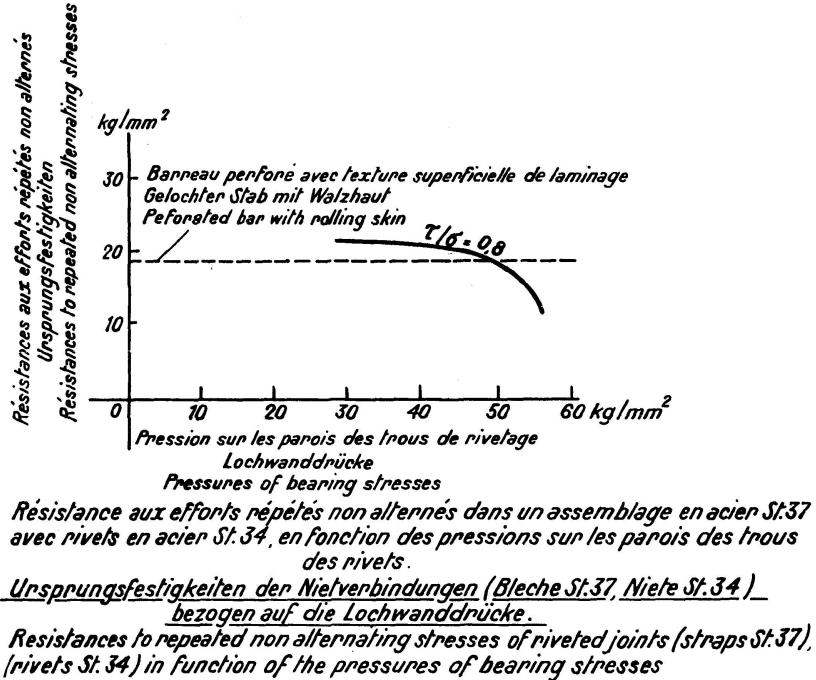
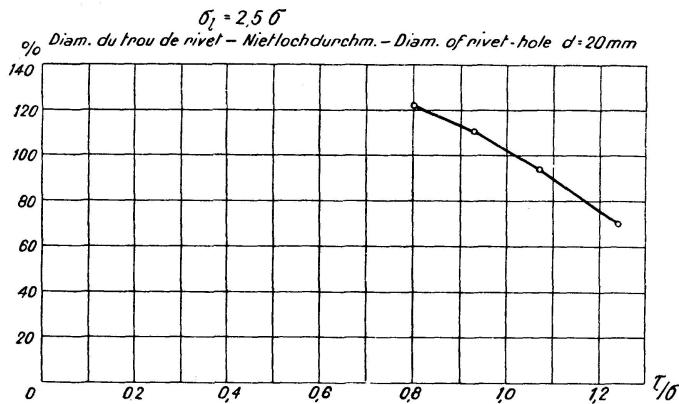


Fig. 40.

Auf Grund von elastizitätstheoretischen Erwägungen war zu erwarten, daß der geradlinige, ungebrochene Kraftfluß bei den Stumpfnähten sich hin-



Résistances aux efforts répétés non alternés dans un assemblage en acier St.37 avec rivets en acier St.34, pour $\delta_l = 2,56$ et $T = 0,8$ à $1,25$ δ en % de la résistance aux efforts répétés non alternés du barreau perforé.

Ursprungsfestigkeiten von Nietverbindungen St.37 (Niete St.34) bei $\delta_l = 2,56$ und T zw. $0,8$ u. $1,25$ δ in Hundertteilen der Ursprungsfestigkeit des gelöcherten Stabes.

Resistances to repeated non alternating stresses of riveted joints St.37 (rivets St.34) at $\delta_l = 2,56$ and $T = 0,8$ - $1,25$ δ in % of same resistance of perforated flat.

Fig. 41

sichtlich der Dauerfestigkeit der Verbindung günstiger auswirken muß als die Kraftübertragung durch Stirn- und Flankenkehlnähte, bei denen hohe Spannungsschwellen und Spannungsspitzen unvermeidlich sind. Die Dauerversuche haben auch bestätigt, daß Verbindungen mit Stumpfnähten höhere Tragfähigkeit besitzen als Laschenverbindungen.

Das Neue und Eigenartige der geschweißten Konstruktion ist der Stumpfstoß (Fig. 53) mit V-, X- oder U-Naht, der eine ungebrochene, fast geradlinige Kraftübertragung an der Verbindungsstelle ermöglicht. Probestäbe mit Stumpfnaht, dem gewöhnlichen Zerreißversuch unterworfen, lieferten 90 bis 100 % der Zerreißfestigkeit des ungestoßenen Stabes je nach Güte der Schweißnaht. Der Bruch tritt bei guter Verschmelzung außerhalb des Bereichs der Schweißnaht im Werkstoff mit den bekannten Begleiterscheinungen (Einschnürung) auf Fig. 54). Im Dauerzugsversuch ergaben stumpf mit V-, X- oder U-Nähten gestoßene Flachstäbe aus St 37 Ursprungsfestigkeiten zwischen 1400 und 1600 kg/cm² je nach Güte der Schweißnaht, gegenüber einer Ursprungsfestigkeit des ungestoßenen Stabes (mit Walzhaut) zwischen 2000 und 2400 kg/cm². Der Dauerbruchanriß ging bei V- und X-Nähten in der

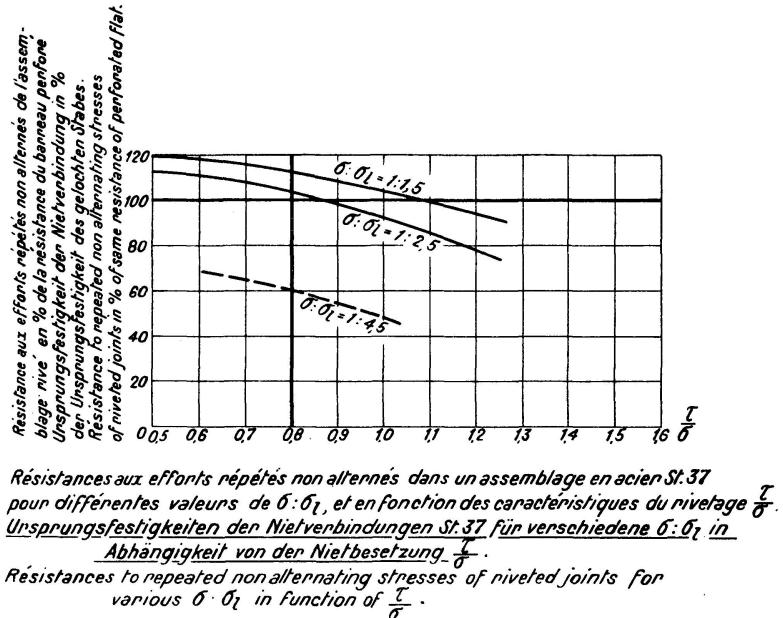


Fig. 42.

Regel von der Kegelspitze aus und verlief bei Quernähten in der Schweiße, bei Schrägnähten im Werkstoff annähernd senkrecht zur Kraftrichtung (Fig. 54). Da ein einachsiger Spannungszustand vorliegt und das statische Kraftfeld zunächst störungsfrei ist, so kann die Abminderung der Dauerbruchfestigkeit des gestoßenen Stabes gegenüber dem ungestoßenen nur auf Kerbwirkung, auf Poren, Blasen, Schlackeneinschlüsse in der Schweiße oder mangelhaften Einbrand und auf Erhitzungs- und Schrumpfspannungen, die mit der Herstellung der Schweißnaht zusammenhängen, zurückgeführt werden. Beobachtungen an Feinschliffen haben auch ergeben, daß mangelhafter Einbrand an der Nahtwurzel, Fehlstellen am Schweißnahtrand oder im Kern der Schweiße den Ausgangspunkt von Anrisse bildeten (Fig. 55 und 56).

Um eine gute Verschmelzung an der Nahtwurzel zu erzielen und um die Schrumpfspannungen möglichst niedrig zu halten, ist bei elektrischer Lichtbogenschweißung mit dünnen Drähten vorzuschweißen. Beginnt man mit dicken Schweißdrähten, so fällt der Einbrand ungleichmäßig aus, an der Wurzel zu schwach, in der Nahtmitte zu tief. Zur Verbesserung der Stumpfstoße kommen noch folgende Maßnahmen in Betracht:

- a) Vergrößerung des Wurzelmaßes bei einem Öffnungswinkel von 60° (Vorschlag BURKHARDT).
- b) Vergrößerung des Öffnungswinkels auf 120° mit gleichzeitiger Erweiterung des Wurzelmaßes auf 5 mm (Vorschlag DÖRNEN).

So verbesserte Stumpfstöße ergaben Dauerfestigkeiten bis 1700 kg/cm^2 . Die Werkstoffausnutzung ist also höher als bei der Nietverbindung, wo mit 15- bis 20 prozentigem Flächenverlust durch die Bohrungen zu rechnen ist und deshalb der Werkstoff in gezogenen Teilen nur mit rd. $1400\text{--}1500 \text{ kg/cm}^2$ bezogen auf den unverschwächten Querschnitt ausgenützt werden kann.

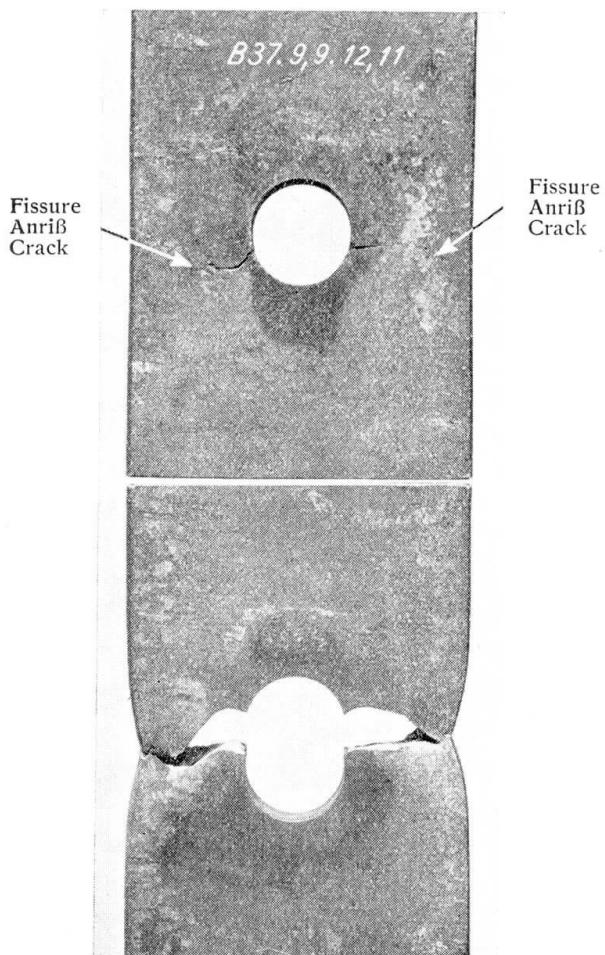


Fig. 43.

Barreau de 12 mm d'épaisseur provenant d'un assemblage rivé amorces de rupture à la fatigue inclinées par rapport à l'axe du barreau.

Flachstab (12 mm) aus einer Nietverbindung. Dauerbruchanriß geneigt zur Stabachse.

Flat (12 mm) out of a riveted joint. Cracks developing at fatigue failure inclined to longitudinal axis.

Die günstigsten Ergebnisse lieferte der Stumpfstoß gleich dicker Bleche (Fig. 57). Es ist deshalb beim schweißgerechten Konstruieren Wert darauf zu legen, daß möglichst gleich dicke Stäbe oder Bleche miteinander verschweißt werden. Beim Übergang von dünnen auf dicke Bleche entsprechend Fig. 58 entsteht durch die Ausmittigkeit der Kraftübertragung und den harten Querschnittsübergang eine Spannungsschwelle, die die Dauerfestigkeit der Verbindung ungünstig beeinflußt. Durch langes Ausschärfen des dickeren Bleches auf das dünnerne (Fig. 59) wird der Kraftfluß stetiger. Der mittige Anschluß ist jedoch immer vorzuziehen (Fig. 60). Durch breite und flach auslaufende Nähte läßt sich eine Steigerung der Leistungsfähigkeit dieser Verbindung erreichen.

Nach DIN 4100 für geschweißte Stahlbauten ist die Spannung (Zug) in der Stumpfnaht $\varrho_{zul} = \frac{P}{al} \leqslant 0,6 \sigma_{zul}$ nachzuweisen. Dies hat manche Konstrukteure dazu geführt, die Schweißnaht schräg zur Hauptkraftrichtung anzutragen, so daß sich eine Schweißnahtlänge $= 1,7 \times$ Blechbreite ergibt und

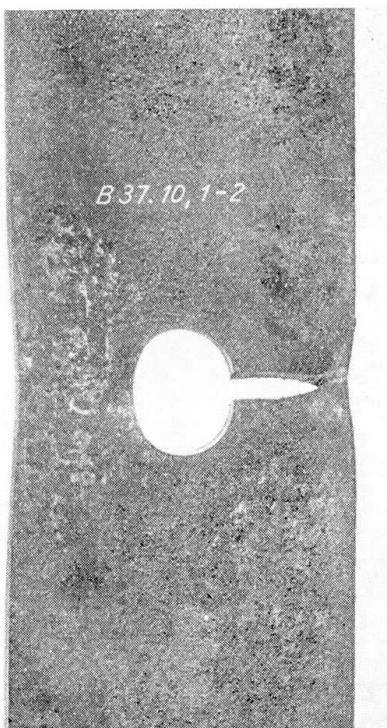


Fig. 44.

Barreau perforé de 12 mm d'épaisseur. Rupture après 500 000 alternances entre 0,5 et 22,5 kg/mm², s'amorçant sur le trou perpendiculairement à la direction principale de la traction.

Gebohrter Flachstab (12 mm), Bruch nach 500 000 Lastwechseln zw. 0,5 und 22,5 kg/mm². Einriß am Lochrand senkrecht zur Hauptzugrichtung.

Perforated flat (12 mm). Failure after 500 000 Load-reversal betw. 0,5 and 22,5 kg/mm². Crack at edge of hole, at right angles to direction of main tension.

damit der Stab voll ausgenützt werden darf. Die Schrägnaht leistet jedoch nicht mehr als die Quernaht, ist aber schwieriger herzustellen und teurer. Eine Erhöhung der zulässigen Spannung ϱ_{zul} auf $0,8 \sigma_{zul}$ für Zug und $0,9 \sigma_{zul}$ für Druck erscheint bei dem heutigen Stand der Schweißtechnik unbedenklich.

Bei Stäben mit veränderlichem Querschnitt und bei Querschnittsübergängen von schmalen auf breite Bleche (z. B. Stabanschlüsse an Knotenbleche) mit Stumpfnaht hat man es mit zweiachsigen Spannungszuständen zu tun. Harte Übergänge (Fig. 61) ergeben ein Kraftfeld mit Spannungsspitzen an den einspringenden Ecken. Die Dauerbrucherscheinung bei dem mit Stumpfnaht angeschlossenen Stab ist ähnlich wie bei dem aus dem Vollen herausgearbeiteten Stab gleicher Form und Abmessung (Fig. 62). Um die Spannungsverteilung günstiger zu gestalten und die Einschnürung des Kraftbündels an den Ecken zu vermeiden, empfehlen sich Anschlüsse mit stetigem Querschnittsübergang (Fig. 63).

Man hat versucht, den Stumpfstoß durch Laschen zu verstärken (Fig. 64) und gehofft, auf diese Weise den Ausnutzungsgrad des Werkstoffs steigern zu können. Die Maßnahme hatte jedoch nur bei mangelhaft hergestellten Stumpfnähten Erfolg. Bei guter Verschmelzung in der Stumpfnaht wurde eine wesentliche Erhöhung der Dauerfestigkeit durch Laschenüberdeckung, die den Mehraufwand an Werkstoff und Arbeit rechtfertigen würde, nicht erreicht. Der Dauerbruch tritt bei guter Verschweißung der Stumpfnaht am Anfang oder Ende der Lasche ein, und zwar bildet er sich im Mutterwerkstoff

unmittelbar vor der Stirnnaht aus. Ähnlich verhielten sich Stumpfstöße mit durchgesteckten und aufgesetzten Verstärkungsblechen (Fig. 65).

Bei den von genieteten Konstruktionen übernommenen Stabanschlüssen und Stößen mit Laschen, wobei die Verbindung durch Stirn- oder Flanken-

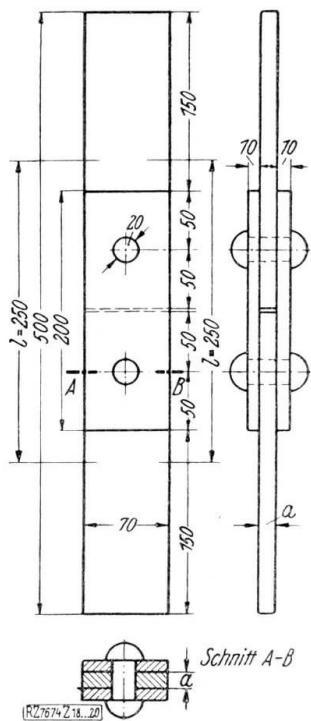


Fig. 45.

Dimensions de l'éprouvette pour la détermination de la résistance des rivets.

Abmessungen der Prüfkörper für die Bestimmung der Widerstandsfähigkeit der Niete. Stabdicke $a = 12, 14$ und 16 mm .

Dimensions of the test piece for the determination of the rivet-resistance.

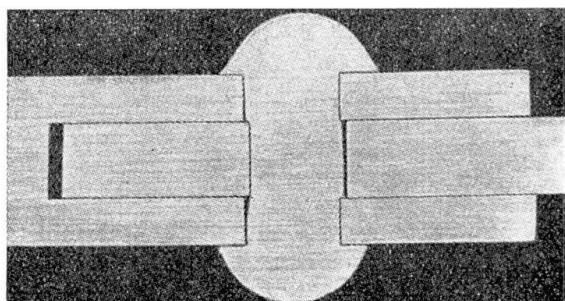


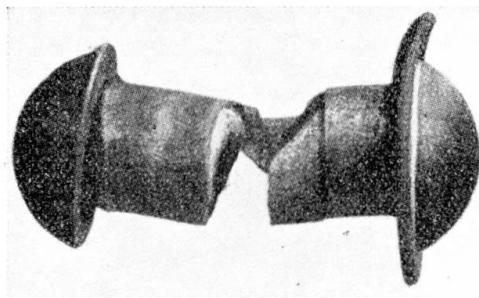
Fig. 46.

Assemblage rivé à un rang (tôles en acier St 37, rivets en acier St 34) après $1\frac{1}{2}$ million d'alternances entre $\sigma = 14,1$ et 21 kg/mm^2 et $\tau = 17,5$ à $26,2 \text{ kg/mm}^2$ coupe.
Einreihige Nietverbindung (Blech St 37, Niete St 34) nach $1\frac{1}{2}$ Millionen Lastwechseln zw. $\sigma = 14,1$ und 21 kg/mm^2 bzw. $\tau = 17,5$ bis $26,2 \text{ kg/mm}^2$, aufgeschnitten.
Single row riveted joint (flat of steel St 37, rivet St 34) after $1\frac{1}{2}$ million load-reversals betw. $\sigma = 14,1$ and 21 kg/mm^2 resp. $\tau = 17,5 - 26,2 \text{ kg/mm}^2$. In section.

kehlnähte oder durch beides zusammen geschieht, liegen räumliche Spannungszustände vor. Die Kraftübertragung aus der Stabebene in die Laschenebenen mit Stirn nähten (Fig. 66) bedingt scharfe Umbiegungen im Kraftfluß — Spannungsschwellen —, die sich hinsichtlich der Dauerfestigkeit der Verbindung ungünstig auswirken. Dazu kommt die durch den beiderseitigen Einbrand bedingte Kerbwirkung. Die Ursprungsfestigkeit σ_{Du} eines mit Laschen und Stirnnaht gestoßenen Stabes St 37 betrug 700 bis 800 kg/cm^2 ,

also nur rd. 35% von der des ungestoßenen Stabes. Der Kraftfluß durch die Stirnnaht ist durch Fig. 67 gekennzeichnet. Man erkennt ohne weiteres, daß die Hohlkehlförm (Fig. 70) unzweckmäßig ist und eine flach auslaufende, breite Naht (Fig. 71) den Kraftfluß günstig beeinflußt, wobei die Schweißnaht von den Kraftlinien unter schiefem Winkel geschnitten wird.

Bei der Kraftübertragung durch Stirnkehlnähte ist die Auswirkung des Einbrandes auf das gestoßene Blech von Stoßdeckungen oder das Knoten-



Rivet de 20 mm, prélevé sur un assemblage (barreaux de 16 mm, couvre joints de 10 mm d'épaisseur) après 100 000 alternances entre $\tau = 0,5$ et 20 kg/mm^2 .

Niet, 20 mm, aus einer Verbindung (Stab 16 mm, Laschen 10 mm dick) nach 100 000 Lastwechseln zw. $\tau = 0,5$ und 20 kg/mm^2 .

Rivet from a joint (flat 16 mm, straps 10 mm) after 100 000 load-reversals betw. $\tau = 0,5$ and 20 kg/mm^2 .

Fig. 47.

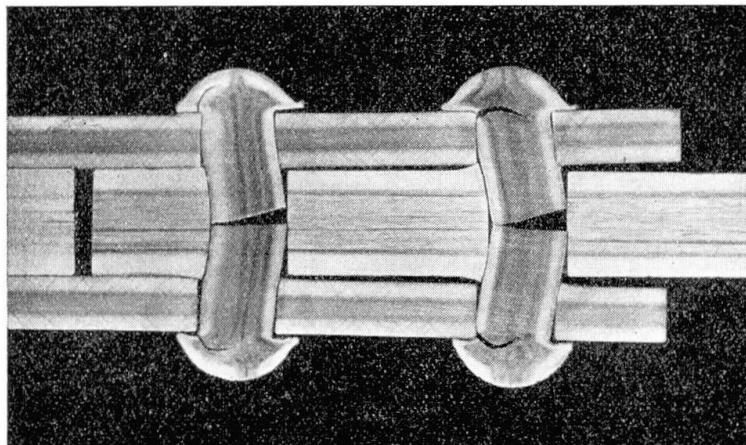


Fig. 48.

Coupe d'un assemblage avec rivure à deux rangs (tôles en acier St 37, rivets en acier St 34) après essai de fatigue. Rupture après 22 000 alternances entre $\tau = 0,2$ et 25 kg/mm^2 .

Schnitt durch eine zweireihige Nietverbindung (Bleche St 37, Niete St 34) nach dem Dauerversuch. Bruch nach 22 000 Lastwechseln zw. $\tau = 0,2$ und 25 kg/mm^2 .

Section through a double row joint (flats St 37, rivets St 34) after fatigue test. Failure after 22 000 load-reversals betw. $\tau = 0,2$ and 25 kg/mm^2 .

blech von Stabanschlüssen zu beachten. Die Querschnittsverschwächung des Blechs durch das Einbrennen der Schweiße (Fig. 72) ist bei verlaschten Breitstabstößen mit Stirnnähten am größten, weil der Einbrand sich beiderseitig auf die ganze Breite des Querschnitts erstreckt. Schmale und dicke Bleche müßten hiernach günstigere Dauerfestigkeiten ergeben als breite und dünne Bleche gleicher Querschnittsfläche. Da der Anbruch bei Laschenstößen mit Stirnnähten von der Blechoberfläche an Nahtrand ausgeht (Fig. 73), die Spannungsverhältnisse an dieser Stelle mit zunehmenden Blechdicken ungünstiger werden, so ist eher mit einer Abnahme der Dauerfestigkeiten zu rechnen.

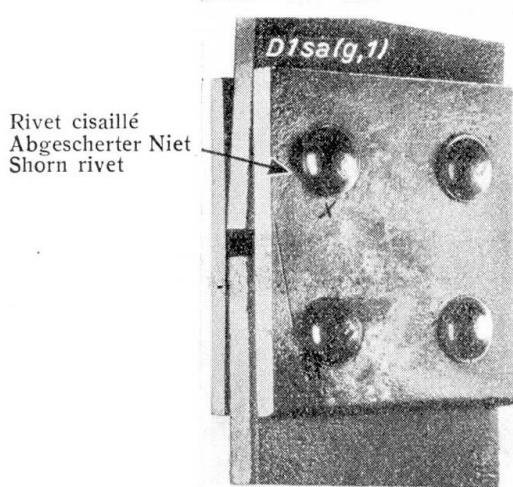


Fig. 49—51.

Assemblage par rivure à un rang $\sigma : \sigma_l : \tau = 1 : 2,5 : 1,25$. Aspect des rivets après essai normal de traction. Destruction des rivets par flexion au cours de l'essai de fatigue à la traction.

Einreihige Nietverbindung
 $\sigma : \sigma_l : \tau = 1 : 2,5 : 1,25$. Abscheren der Niete beim gewöhnlichen Zugversuch. Zerstörung der Niete durch Biegung beim Dauerzugversuch.

Single row riveted joint $\sigma : \sigma_l : \tau = 1 : 2,5 : 1,25$. Shearing of the rivet in the ordinary tension test (a). Failure of the rivet through bending in the fatigue tension test (b and c).

Fig. 49.

Essai normal de traction. — Gewöhnlicher Zugversuch. — Ordinary tension test.

Über die Wirkung von quer zur Kraftrichtung angeordneten Nähten geben folgende Vergleichszahlen Aufschluß:

Prüfkörper (Breitstab 70/21)	Ursprungsfestigkeit kg/mm ²	
	St 37	St 52
mit Walzhaut	22—24	24—36
mit Walzhaut und Bohrung ($\varnothing 17$)	18—20	20—22
mit einseitiger Querraupe	16	18
mit beiderseitiger Querraupe	12	12
Doppellaschenstoß mit Stirnkehlnähten (Bl. 12 mm, Laschen 10 mm)	8	8
mit Schrägnähten und Anfräseung	12	12
Blechstoß mit Stumpfnaht	16—18	16—18

Die Überlegenheit des Stumpfstoßes tritt klar hervor. Gegenüberliegende, auf ganze Blechbreite sich erstreckende Stirnkehlnähte sind zu vermeiden. Aus dem vollen Werkstoff herausgearbeitete, der Laschenverbindung mit Stirnnähten nachgebildete Prüfkörper (Fig. 74) ergaben rund 50 % der Spannungssamplituden des vollen Bleches. Man erkennt daraus wieder den nachteiligen Einfluß großer Querschnittsunterschiede und harter Übergänge. Laschenverbindungen mit versetzten Stirnähten und ungleich langen Laschen ergaben geringere Lastwechselzahlen als entsprechende Verbindungen mit gleich langen Laschen. Die ersten Anrisse beim Dauerbruch bildeten sich dabei an den Einbrandkratern der kurzen Laschen aus. Um die Querschnittsverschwächung durch Einbrand möglichst niedrig zu halten, empfiehlt es sich, statt der Versetzung die Stirnkehlnähte in der Breitenausdehnung zu beschränken.

Blechstöße mit Flankenkehlnähten haben den Vorzug geringerer Querschnittsverschwächung durch Einbrand, andererseits ist aber der Kraftfluß ungünstiger.

Der Spannungszustand ist bei Stabanschlüssen und Laschenstößen mit Flankenkehlnähten entspr. Fig. 75 noch verwickelter als bei Stirnkehlnähten. Zunächst werden die Hauptzugkraftlinien in der Ebene des Stabes seitlich

nach den Flankennähten abgelenkt, und zwar ist die Ablenkung umso größer, je kürzer die Naht und je breiter der Stab ist. An den inneren Nahtenden entstehen Spannungsspitzen, außerdem bilden sich Druckgewölbe aus, die sich gegen die Schweißnähte stemmen. In den Flankenkehlnähten selbst treten Schubspannungen auf, wobei die mittlere Schubspannung im umgekehrten Verhältnis zur Nahtlänge abnimmt, während gleichzeitig die Spannungsverteilung mit zunehmender Nahtlänge ungünstiger wird. Die Umlenkung der Kraft aus der Stabebene in die Laschenebenen bedingt schließlich Biegspannungen, die jedoch kleiner sind als bei Stirnnähten. Dem allmählichen Kraftabbau im Stabe steht ein entsprechender Anbau in den Laschen gegenüber. Das Kraftfeld ist durch Fig. 76 veranschaulicht.

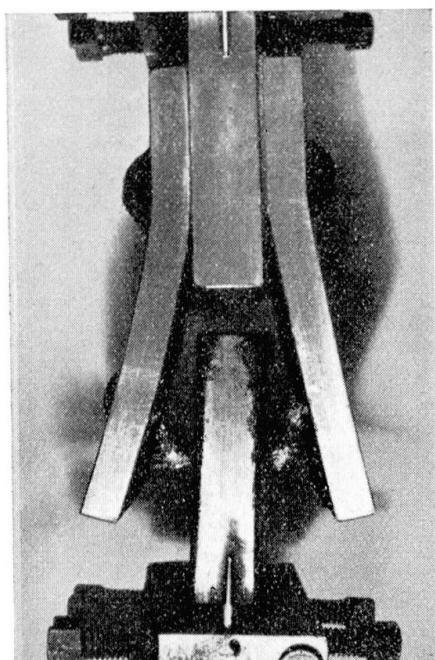


Fig. 50.

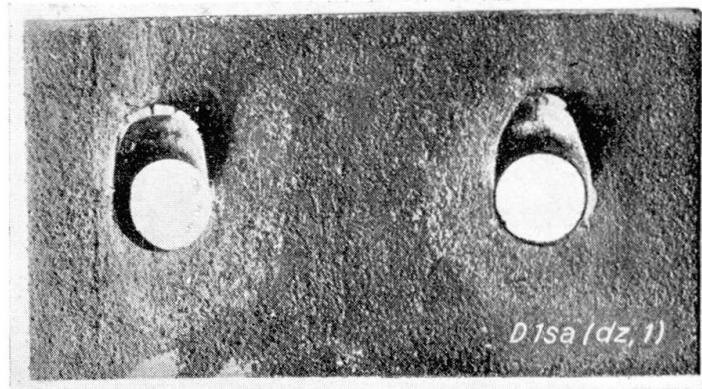


Fig. 51.

Essai de fatigue à la traction.
Dauerzugversuch.
Fatigue tension test.

Während bei Stirnnahtlaschenverbindungen mit einem Querschnittsverhältnis von Stab:Laschen = 3:2 \times 2 der Dauerbruch im Stab auftritt, sind bei Flankennaht-Laschenverbindungen die Laschen gefährdet. Die Anrisse gehen in der Regel von den inneren Enden der Flankennähte aus durch die Laschen. Der Spannungslinienverlauf in den Laschen ist in den Figuren 77 und 78 für verschiedene weite Stoßlücken dargestellt. Bei zusammengerückten Blechen werden die Kraftlinien schärfer umgelenkt als bei größerem Abstand der Endquerschnitte; die dadurch bedingte starke örtliche Spannungsanhäufung drückt die Dauerfestigkeit herab.

Wird die Flankennaht schräg zur Kraftrichtung angeordnet, so erreicht man einen stetigeren Querschnittsübergang und eine günstigere Spannungsverteilung auf die Nähte, indem die Spannungslinien weniger stark abgelenkt werden (Fig. 79). Auch bei den verjüngten Laschen geht der Dauerbruchanriß in den Laschen von den inneren Enden der Schrägnähte aus. Doch sind bei einzelnen Proben auch Anrisse im Stab an den äußeren Enden der Schrägnähte beobachtet worden (Fig. 80).

Bei Stabanschlüssen an dicke Bleche (Fig. 81) gehen die ersten Dauerbruchanrisse von der Einbrandstelle am Beginn der Flankennähte aus, der Bruchriß verläuft quer durch den angeschlossenen Teil. Die Ursprungsfestigkeit von Flankenkehlnahtanschlüssen (Verbindung für ein Verhältnis $\frac{\varrho}{\sigma} = 0,5$ oder $\frac{F_s}{F} = 2$ bemessen) bezogen auf den unverschwächten Stabquerschnitt wurde zwischen 700 und 1000 kg/cm² gefunden. Anschlüsse mit längeren Nähten ergaben etwas günstigere Werte (bis 1100 kg/cm²).

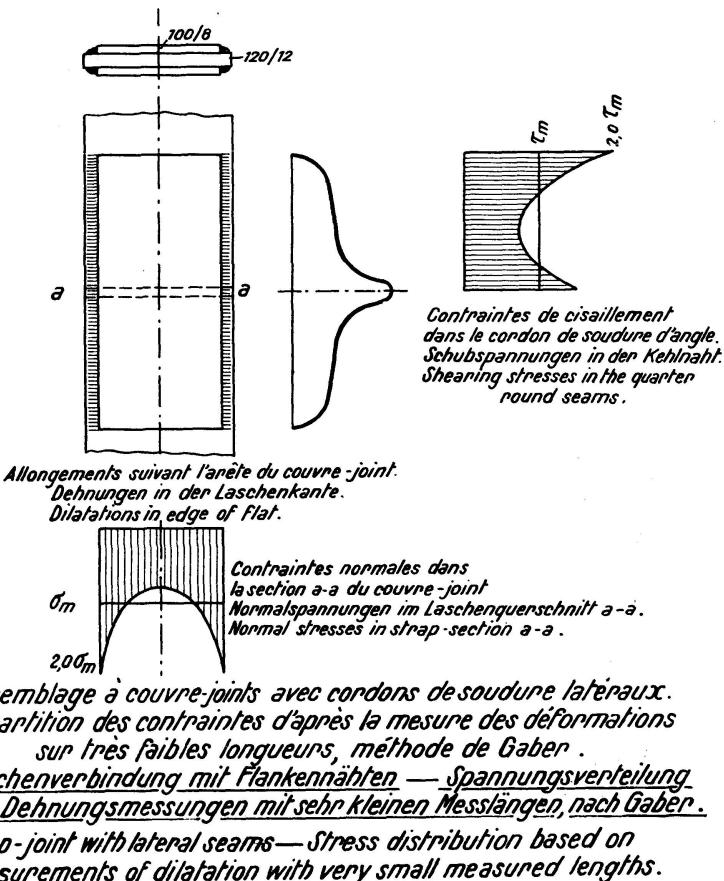


Fig. 52.

Durch flaches Ausfräsen der Nähte am Stoß (Fig. 82) hat BIERET²¹⁾ eine Steigerung der Tragfähigkeit bis zu 1400 kg/cm² erreicht. Man hat weiterhin versucht, durch Rückwärtsstraffelung der Schweißnähte (Fig. 83) die gefährdeten Stellen zu entlasten und den Übergang nachgiebiger zu machen, jedoch mit geringem Erfolg. Demgegenüber ist durch Abarbeitung der inneren Nahtenden und der Laschen mit flacher Ausrundung eine wesentliche Erhöhung der Dauerfestigkeit (1400—1600 kg/cm²) erzielt worden. Das günstige Ergebnis ist auf die Verbesserung des Spannungslinienverlaufs an den inneren Nahtenden der eingezogenen Laschen (Fig. 84) und auf die Ausschaltung des ungünstigen Einflusses der kleinen Schweißkrater am Nahtanfang zurückzuführen²²⁾.

²¹⁾ BIERETT, Zur Klärung der mechanischen Grundlagen des Dauerbruchs geschweißter Konstruktionen. Elektroschweißung 1933, Heft 2.

²²⁾ THUM und SCHICK, Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen bei verschiedener Formgebung. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 1933, Bd. 77, Nr. 19, S. 493ff.

Eine Verbesserung der Spannungsverhältnisse in den angeschlossenen Teilen ist auch durch Zusammenwirken von Stirn- und Flankenkehlnähten zu

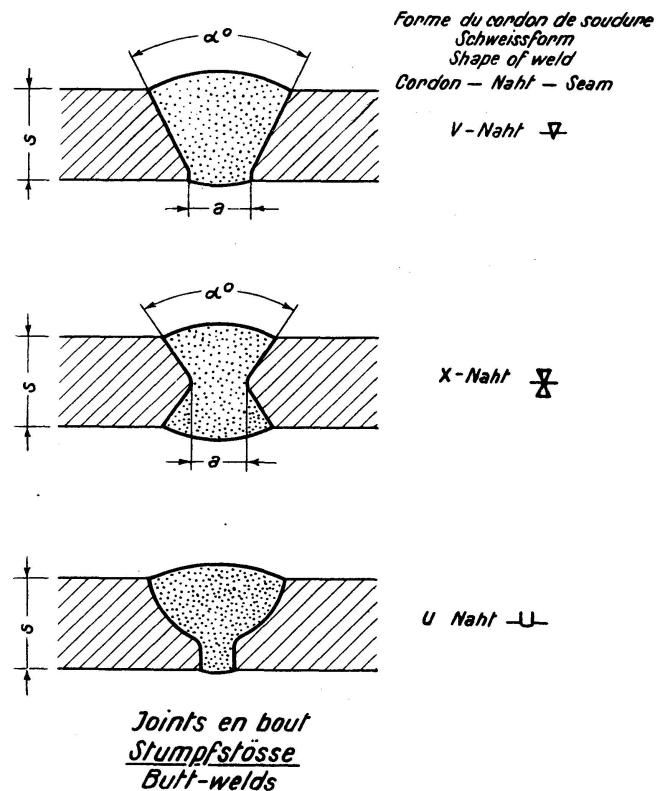


Fig. 53.

erreichen (Fig. 85). Die Stirnnaht wird zur Entlastung der Flankennähte herangezogen, der Anschluß kann dadurch verkürzt werden. Die Kraftver-

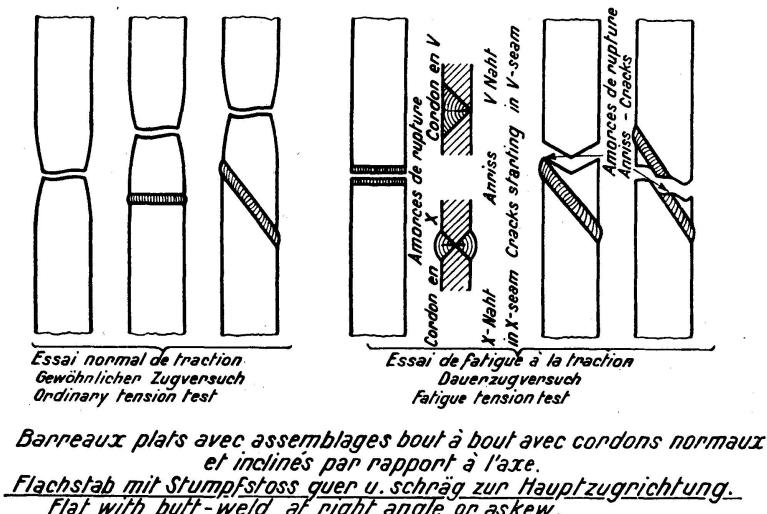


Fig. 54.

teilung auf die Stirn- und die Flankenkehlnähte (Fig. 89) ändert sich mit deren Längenverhältnis. Für $\frac{b}{l} = 2$ und $\frac{\varrho}{\sigma} = 0,33$ wurden Ursprungsfestigkeiten 1200 kg/cm^2 nachgewiesen. Breitstabanschlüsse mit Stirn- und Kehl-

nähten an dicke und in der Breite zunehmende Knotenbleche, wobei die Übergänge von Kehl- zur Stirnnaht durch Schrägen vermittelt (Fig. 86) und die Nahtanfänge angefräst wurden, haben Dauerfestigkeiten bis 1400 kg/cm^2 ergeben.

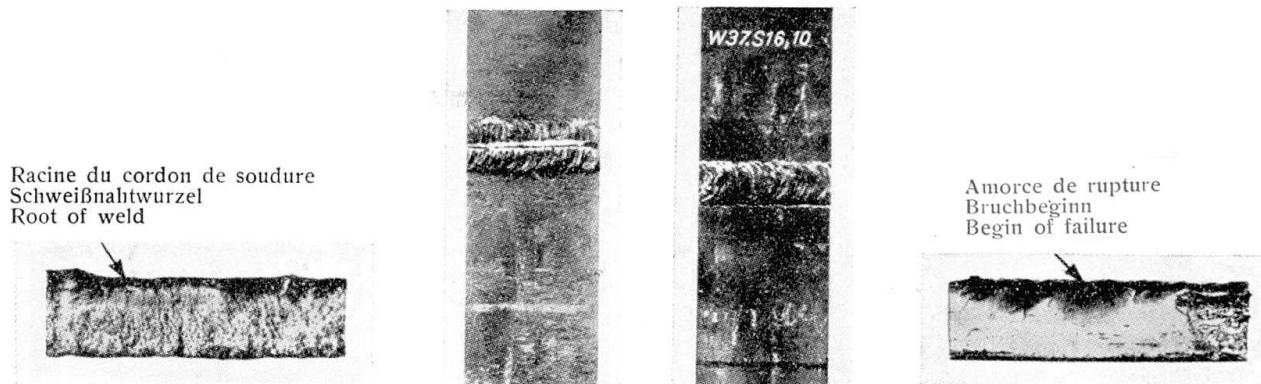


Fig. 55.

Soudre bout à bout avec cordon en V. — Stumpfstöß, V-Naht. — Butt weld, V-seam.

Zur Entlastung der Flankennähte kommen neben Stirnnähten noch Schlitzschweißungen in Betracht (Fig. 88), durch die die hohen Spannungsspitzen der Flankennähte herabgemindert werden sollen. Die Dauerbrüche gehen von den inneren Flankennahtanfängen oder auch von den Schlitznaht-

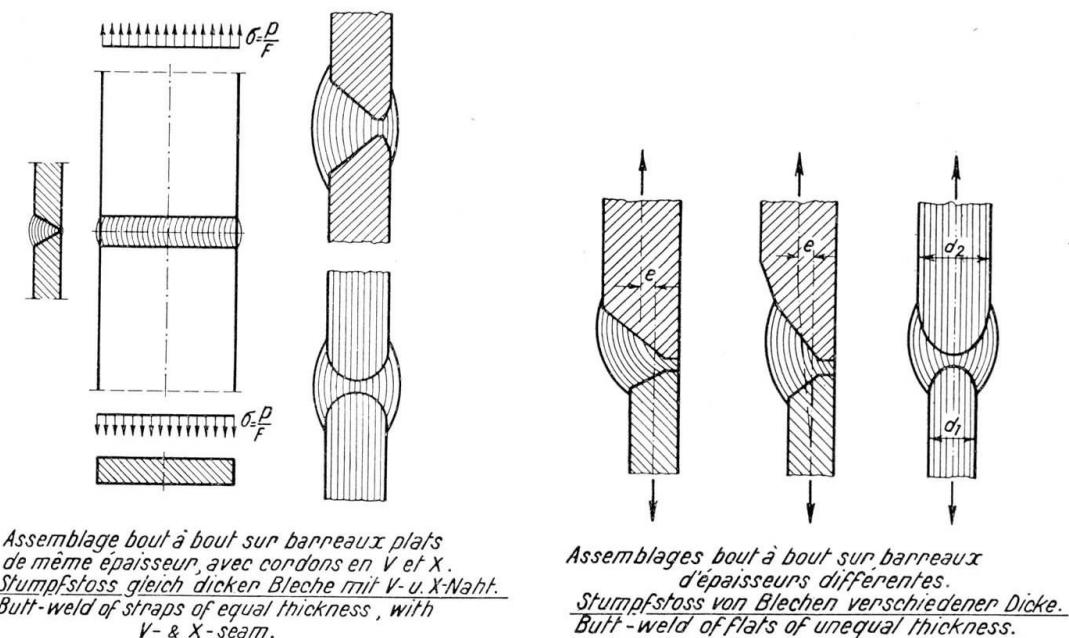
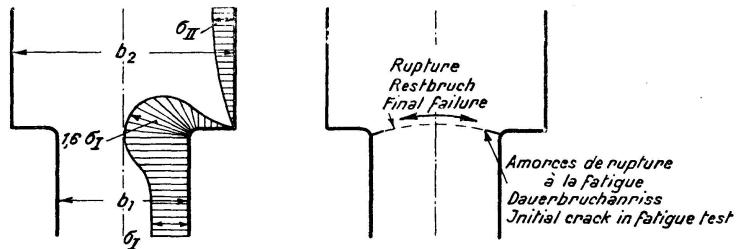


Fig. 57.

Fig. 58. Fig. 59. Fig. 60.

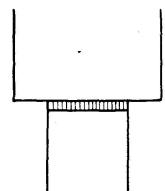
rändern aus und verlaufen in den Laschen. Die Widerstandsfähigkeit gegen oftmals wiederkehrende Zugbelastungen ist nur wenig höher als bei reinen Flankennahtverbindungen. In der Herstellung einfacher und hinsichtlich der Dauerfestigkeit günstiger sind Stabanschlüsse mit eingezogenen Stabenden oder Stabstöße mit eingezogenen Laschen und Schrägnähten, wo-

bei durch Anfräslungen am Übergang der nachteilige Einfluß der Schweißkrater auszuschalten ist. Mit Stoßanordnungen entspr. Fig. 90 — einge-



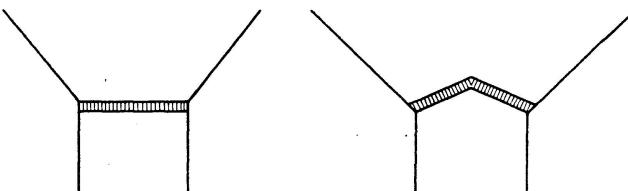
*Assemblage avec modification brusque de section
Unstetiger Querschnittsübergang.
Harsh transition of section.*

Fig. 62.



*Changement de section brusque.
Harsh Uebergang.
Rude transition.*

Fig. 61.



*Changement de section progressif.
Weicher Uebergang.
Smooth transition.*

Fig. 63.

zogene Laschen und Schrägnähte, wobei die inneren Nahtanfänge und die Laschen mit weichen Ausrundungen abgearbeitet und der Querschnittsüber-

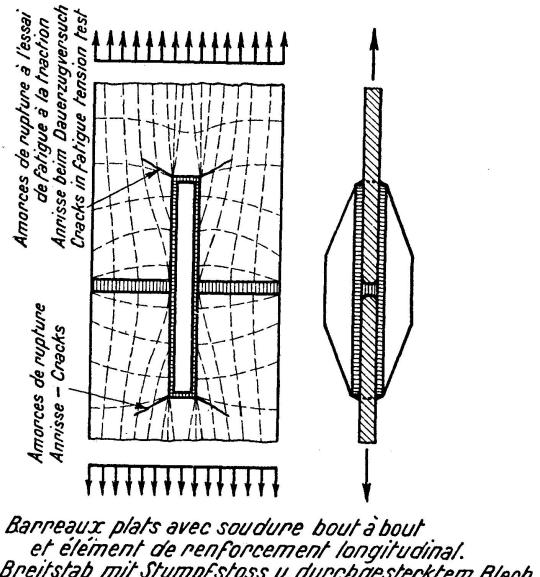


Fig. 64.

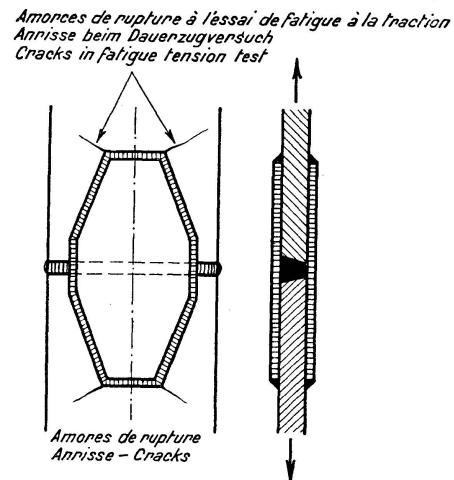
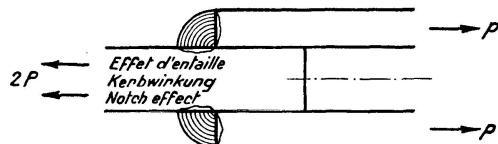


Fig. 65.

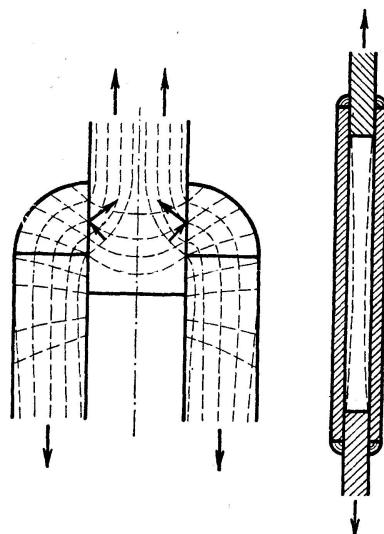
gang an den Laschenstirnen gemildert ist — lassen sich Dauerfestigkeiten erreichen, die denen von Nietverbindungen entsprechen und sogar einem guten Stumpfstoss mit V- oder X-Nähten gleichwertig sind.

Die bisherigen Untersuchungen an Konstruktionselementen zeigen die Bedeutung der Formgebung zur Erzielung eines gleichmäßigen, möglichst störungsfreien Kraftflusses für die Dauerfestigkeit der Schweißverbindungen. Die Konstruktionsform beeinflußt die dynamische Widerstandsfähigkeit von geschweißten Verbindungen viel weitgehender als das bei genieteten An-



*Assemblage de barreaux avec soudures frontales d'angle.
Stabanschluss mit Stirnkehlnähten.
Flat connection with frontal quarter round welds.*

Fig. 66.



*Lignes de force sur cordons d'angle frontaux.
Kraftfluss durch Stirnkehlnähte.
Stress-field in frontal quarter round welds.*

Fig. 67.

schlüssen der Fall ist, bei denen unbedenklich eine vom Nietbild unabhängige Berechnung angewendet werden darf.

Um die Frage der Berechnung und Bemessung von dynamisch beanspruchten, geschweißten Konstruktionen zu klären, sind noch Versuche zur

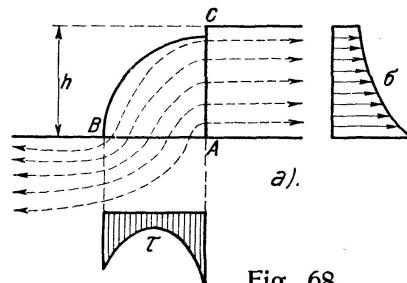


Fig. 68.

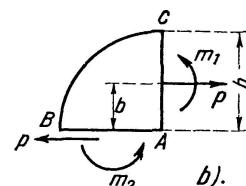


Fig. 69.

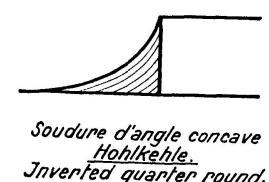
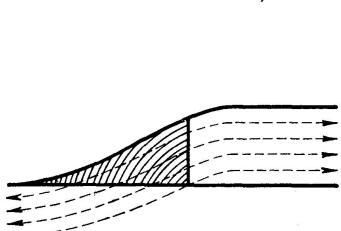


Fig. 70.

Ermittlung der Zugdruckwechselfestigkeiten durchzuführen. Diesbezügliche Versuche sind bei der Materialprüfungsanstalt in Stuttgart eingeleitet.

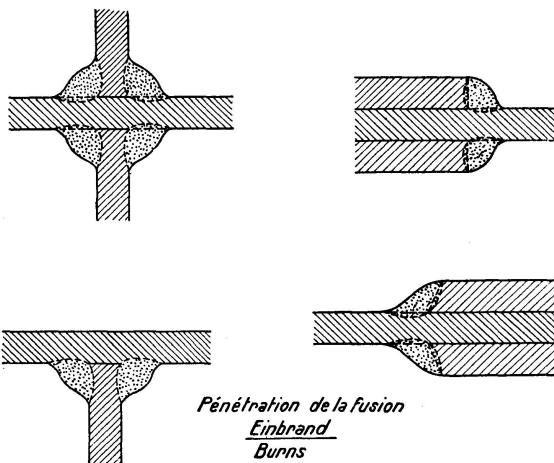
Da bei Ursprungsbeanspruchung an Stellen örtlichen Spannungsanstiegs nach der jeweiligen Entlastung entgegengesetzt gerichtete Nachspannungen auftreten, also Wechselbeanspruchung auf Zug und Druck vorliegt, so sind Überraschungen kaum zu erwarten. Die Widerstandsfähigkeit der Schweißverbindungen bei Druck ist ähnlich wie bei den Nietverbindungen günstiger als bei Zuganstrengung. Auf mittigen Druck (ohne Knickgefahr) beanspruchte Stumpfstöße dürfen nach den vorliegenden Erkenntnissen mit $\varrho_{zul} = 0,9 \sigma_{zul}$ berechnet und bemessen werden. Decklaschen erscheinen nicht erforderlich. Für die auf Abscheren beanspruchten Nähte darf $0,6 \sigma_{zul}$ als zulässige Spannung angenommen werden.

Was die werkstofflichen Fragen anlangt, so sind auf Grund der Dauerversuche folgende Anforderungen zu stellen: Festigkeit und Dehnung der Schweiße sollen möglichst die beim Mutterwerkstoff verlangten Mindestwerte erreichen. Blanke Elektroden ergeben zu geringe Dehnungen (3—5%). Mit ummantelten Schweißdrähten sind Dehnungen bis zu 20 % erreicht worden. Der Abbau von Spannungsspitzen ist von der Zähigkeit der Schweiße abhängig. Außerdem ist gleiche Zähigkeit der Schweiße und des Grundwerkstoffs erwünscht, um die Schrumpfspannungen, die aus der Veränderlichkeit



*Cordon d'angle frontal, sans arrondi, prolongé sur un côté.
Flach auslaufende Stirnkehlnaht.
Frontal quarter round seam with smooth transition.*

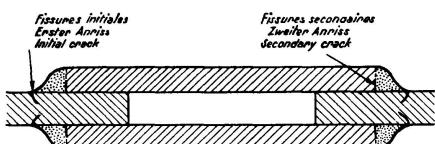
Fig. 71.



*Penetration de la fusion
Einbrand
Burns*

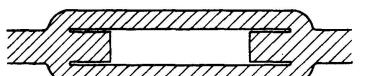
Fig. 72.

des Elastizitätsmaßes unter den während der Herstellung der Schweißnähte vorkommenden Wärmegraden erklärt werden können²³⁾), bei oftmals wiederkehrender Belastung rissefrei auszugleichen.



*Fissures initiales
Erster Anriß
Initial crack*
*Fissures secondaires
Zweiter Anriß
Secondary crack*
*Amorces de la rupture par fatigue dans un assemblage ouvert à
couvre-joints avec soudures d'angle frontales.
Ausgangsstellen des Dauerbruches bei einer Stirnnaht-Laschenverbindung.
Starting points of fatigue failure in a strapped frontal seam joint.*

Fig. 73.



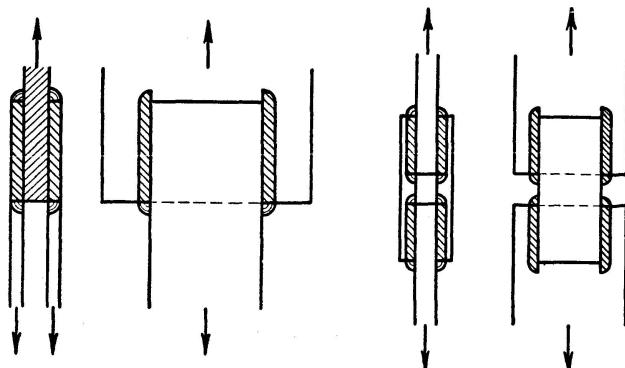
*Éprouvette usinée dans la masse, après assemblage par
couvre-joints avec soudures d'angle frontales.
Aus dem vollen Werkstoff herausgearbeiteter der Stirnnaht-
Laschenverbindung nachgebildeten Prüfkörper.
Test piece finished out of solid material, fashioned after
a strapped frontal seam joint.*

Fig. 74.

Bei Verwendung von hochwertigen umhüllten Schweißdrähten bestehen keine Bedenken, den Stumpfstoß ohne Laschenüberdeckung auch zur Übertragung von Biegungsmomenten zuzulassen (ausmittiger Kraftangriff und reine Biegung). Was die konstruktive Durchbildung von geschweißten Blechträgern anlangt, so sind Träger mit dicken, auf die ganze Länge durchgehenden Gurtplatten (Fig. 91) günstiger als solche, bei denen die Gurte aus mehreren Platten wie beim genieteten Blechträger zusammengesetzt sind (Fig. 92). Man spart dabei die langen Kehlnähte, die hohe Schrumpfspannungen und ein Aufwölben der Bleche zur Folge haben, und vermeidet plötzliche Querschnittsübergänge. Bei breiten Gurten müssen die mit Kehlnähten aufgeschweißten Lamellen außerdem durch Heftnieten gegen Ausbeulen im Druckgurt gesichert werden. In Fig. 93 sind verschiedene Querschnitts-

²³⁾ KRABBE. Elektroschweißung 1933.

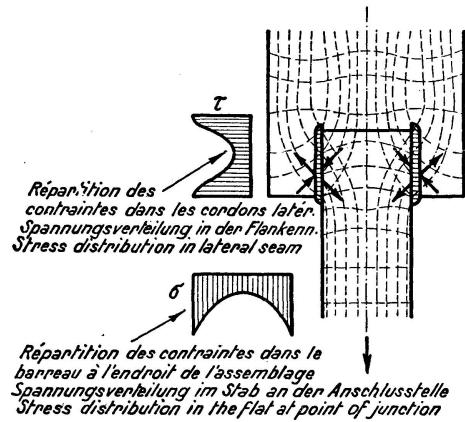
formen geschweißter Blechträger zusammengestellt²⁴⁾). Gegenüber den älteren Formen mit mehreren, entsprechend dem Momentenverlauf abgesetzten Gurtplatten und dicken bis zum Ende der Träger durchlaufenden und stumpfgestoßenen Gurtplatten werden neuerdings profilierte Platten verwendet. Die Dortmunder Union hat ein Flanschprofil mit nockenartigen Ansätzen, die eine Nut für das Einsetzen des Stegblechs bilden und den Zusammenbau erleichtern, herausgebracht (Fig. 94). Durch das Abrücken der Kehlnähte am Anschluß des Stegblechs von der Gurtplatte wird eine Schwächung der



Assemblage par recouvrement et assemblage „ouvert“ à couvre-joints avec soudures latérales.

*Stabschlüsse und verlaschte Stöße mit Flankenkehlnähten.
Connection of flats, and strapped splices with lateral quarter round seams.*

Fig. 75.



*Repartition des contraintes dans les condens latén.
Spannungsverteilung in der Flankenn.*

Stress distribution in lateral seam.

Repartition des contraintes dans le

barreau à l'endroit de l'assemblage.

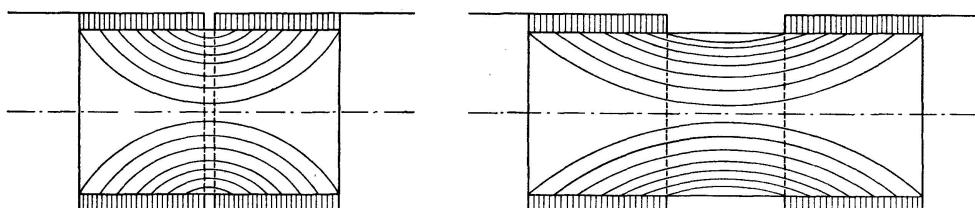
Spannungsverteilung im Stab an den Anschlussstelle.

Stress distribution in the flat at point of junction.

*Lignes de force.
Kraftfeld.
Stress - field.*

Fig. 76.

Gurtplatte durch Einbrand vermieden. Mit Nasenprofilen als Flanschen und Universaleisen als Stegblech hergestellte geschweißte Doppel-I-Träger sind hinsichtlich der Schwingungsfestigkeit gewalzten Breitflanschenträgern und genieteten Blechträgern vom selben Widerstandsmoment gleichwertig.



*Lignes de force dans des couvre-joints pour différentes ouvertures de l'assemblage.
Spannungslinienverlauf in den Laschen bei verschieden grossen Stosslücken.
Stress - field in straps of joints with varying gaps.*

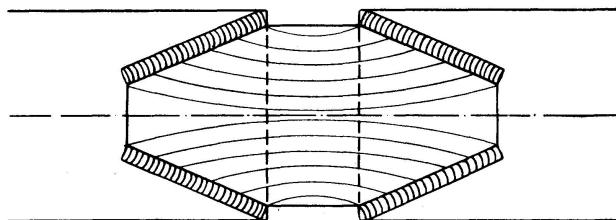
Fig. 77.

Fig. 78.

Ein gleich günstiges Ergebnis ist auch unter Verwendung eines T-förmigen Plattenprofils zu erzielen, wobei zur Verbindung zwischen Gurtplatten und Stegblech eine Stumpfnahrt dient (Fig. 95). Wird das Stegblech zwischen Halbprofilen stumpf eingeschweißt, so besteht außerdem die Möglichkeit, die Trägerhöhe dem Momentenverlauf anzupassen (Fig. 96). In der Krümmung sind dabei wegen der Abtriebkraft Aussteifungen aufzuschweißen. Allgemein sind die Aussteifungen an geschweißten Blechträgern versetzt anzutragen (Fig. 91), um eine Häufung der Schweißnähte am Stegblech zu vermeiden. Wo die Nähte zum Anschweißen der Aussteifung die Hauptnähte zwischen Stegblech und Gurten überdecken, sind Aussparungen

²⁴⁾ Nach Mitteilungen des Forschungsinstituts der Ver. Stahlw. A.-G. Dortmund. SCHULZ und BUCHHOLZ.

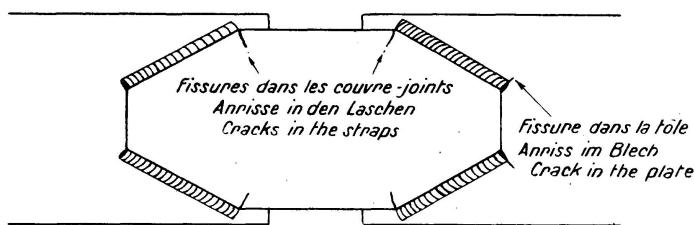
oder Ausklinkungen in den Aussteifungen angezeigt. Das Anschweißen der Aussteifungsbleche an die Druckgurte ist unbedenklich; dagegen sind Quernähte an den Zuggurten schädlich. Es empfiehlt sich deshalb, an den Zug-



*Lignes de force dans des cordons de soudure en biais.
Spannungslinienverlauf bei Schräglankennähten.
Stress field for skew seams.*

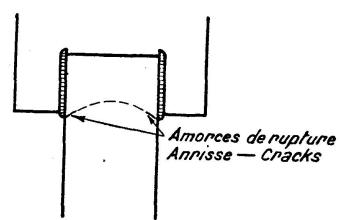
Fig. 79.

gurten kurze Paßstücke zur Erzielung eines spaltlosen Schlusses einzulegen und mit den Aussteifungen zu verschweißen (Fig. 94).



*Amorces de rupture à la fatigue dans des cordons de soudure en biais.
Dauerbruchanrisse bei Schrägnähten.
Fatigue cracks developed in skewed welds.*

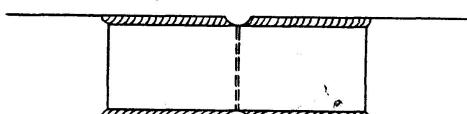
Fig. 80.



*Amorces de rupture à la fatigue
Dauerbruchanrisse
Initial cracks in fatigue test.*

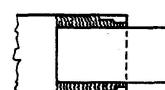
Fig. 81.

Man erkennt auch hieraus wieder, daß die Widerstandsfähigkeit geschweißter Konstruktionen durch geeignete bauliche Maßnahmen erheblich gesteigert werden kann.



*Cordons d'angle latéraux fraîsés à l'endroit du joint.
Flankenkehlnähte an der Stosstelle flach angefräst.
Lateral quarter round seams, notched at junction.*

Fig. 82.

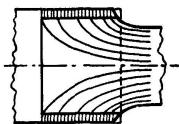


*Assemblage par soudures latérales avec cordons étagés.
Flankenkehlnahverbindung mit rückwärts gestaffelten Schweißnähten.
Lateral seam joint with stepped welds.*

Fig. 83.

Zusammenfassend ist das in Hinsicht auf die praktische Anwendung wesentliche Ergebnis der bisherigen Forschungsarbeiten: Stumpfnahverbindungen verdienen vor Laschenverbindungen mit Stirn- und Flankennähten den Vorzug. Dabei ist zu beachten, daß die Stumpfnähte in herstellungs-technischer Hinsicht empfindlicher sind als die Kehlnähte. Soweit Kehlnähte für Kraftanschlüsse nicht zu vermeiden sind, ist durch konstruktive Maß-

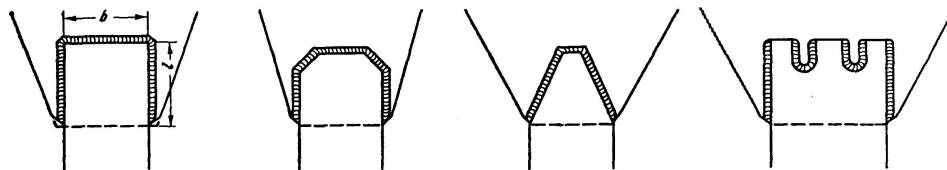
nahmen eine Abminderung der gefährlichen Spannungsspitzen anzustreben. Der Konstrukteur muß durch geeignete Formgebung einen klaren und möglichst ungestörten Spannungsverlauf anstreben. Bei der Ausführung der



*Lignes de force dans un assemblage par soudures latérales avec couvre-joint en retrait.
Spannungslinienverlauf bei Flanken nahtverbindungen mit eingezogenen Laschen.
Stress figure of lateral seam joints with recessed straps.*

Fig. 84.

Schweißnähte ist darauf zu achten, daß die unvermeidlichen Schrumpfspannungen möglichst niedrig gehalten werden. Durch Nacharbeiten an Stellen örtlicher Spannungsanhäufung können ungünstige Auswirkungen von Schweiß-



*Assemblages sur barreaux larges avec soudures latérales, frontales, obliques et à entailles.
Breitstabanschlüsse mit Flanken-, Stirn-, Schräg- und Schlitznähten.
Wide strap connections with lateral, head, skew and notched seams.*

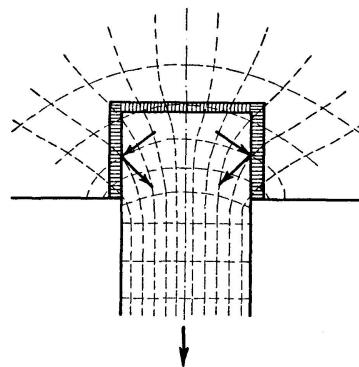
Fig. 85.

Fig. 86.

Fig. 87.

Fig. 88.

kratern herabgesetzt oder ganz ausgeschaltet werden. Die Grundformen geschweißter Tragwerke sind in engster Zusammenarbeit von Konstruktionspraxis und wissenschaftlicher Versuchsforschung zu entwickeln. Geschweißte

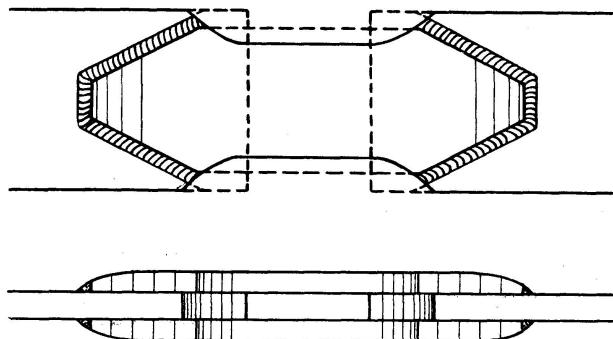


*Lignes de force dans les cordons d'angle latéraux et frontal.
Kräftefluss durch Stirn- & Flankenkehlnähte.
Stress-field through frontal and lateral quarter round seams.*

Fig. 89.

Konstruktionen bilden in viel höherem Maße einen einheitlichen Baukörper als vernietete Konstruktionen. Der Niet als Verbindungsmittel begünstigte die Auflösung der Konstruktion in viele Einzelheiten, die getrennt zu erfassen sind. Die geschweißte Konstruktion ist vielmehr als Ganzes zu betrachten.

Die Erfassung der inneren Zusammenhänge ist für das schweißgerechte Konstruieren von grundlegender Bedeutung. Für genietete Konstruktionen ist das aufgelöste Fachwerk charakteristisch, für geschweißte Konstruktionen der Blechträger und die Steifrahmen. Während bei der ersteren die Teile aus Profilstäben, Lamellen, Stegblechen und Bindeblechen in den verschiedensten Querschnittsformen zusammengesetzt, mit Heftnieten verbunden und mit Kraftnieten angeschlossen werden, sind die letzteren in der Hauptsache



Assemblages à couvre-joints avec cordons de soudure en biais longs et cordons de soudure frontaux courts retouchés pour obtenir une grande résistance à la fatigue.

Laschenverbindung mit langen Schräg- u. kurzen Stirnnähten zur Erzielung einer hohen Dauerfestigkeit nachgearbeitet.
Strap welded joints with long skew and short straight welds finished to obtain higher fatigue strength

Fig. 90.

aus Blechen, Platten und besonderen Flanschprofilen tunlichst mit Stumpfnähten zusammenzuschweißen. Als Beispiel einer nach neueren Grundsätzen durchkonstruierten Schweißkonstruktion ist in Fig. 97 der Entwurf einer Bahnbrücke wiedergegeben.

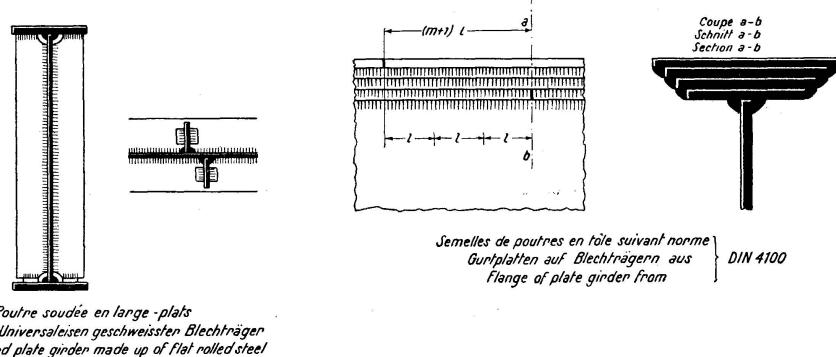


Fig. 91.

Fig. 92.

Die aus Dauerversuchen geschöpften Erkenntnisse werden sich auf die Gestaltung der Bauwerke auswirken. Die den genieteten Konstruktionen nachgeahmten Formen sind ebenso abzulehnen wie die auf rein theoretischem Wege abgeleiteten Berechnungsformeln. Restlos befriedigende Lösungen geschweißter Fachwerkbrücken sind bis jetzt noch nicht gefunden. Ehe man zur Schweißung von Großkonstruktionen des Brückenbaues übergehen kann, sind Erfahrungen an Probeausführungen kleiner und mittlerer Spannweiten im Betrieb abzuwarten.

VI.

Die Tatsache, daß durch die Dauerversuche wichtige Erkenntnisse über genietete und geschweißte Konstruktionen gewonnen worden sind, wird nicht bestritten. Dagegen sind die Auffassungen über die Auswertung der Versuche noch geteilt. Theoretiker und Praktiker haben Bedenken gegen die

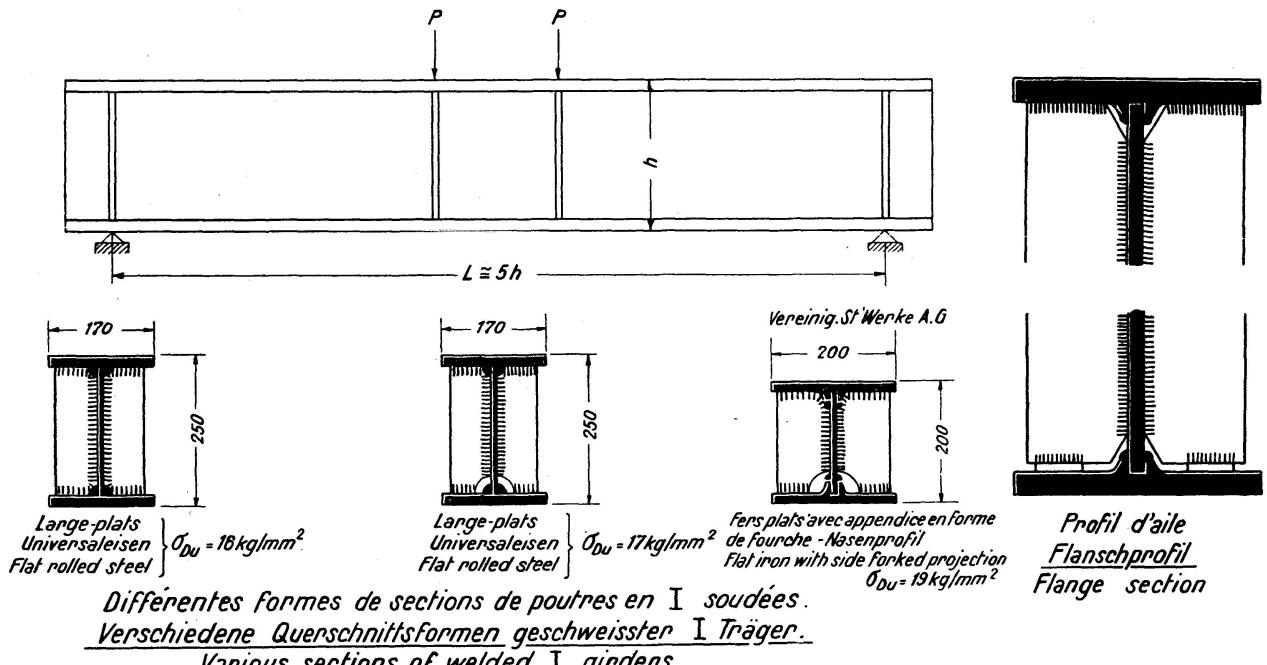


Fig. 93.

Fig. 94.

Versuchsmethoden geäußert. Sie bestreiten insbesondere, daß die Pulsatorversuche zur Feststellung der Dauerfestigkeit von genieteten und geschweißten Bauteilen wegen der raschen Lastwechsel ohne weiteres auf die Praxis übertragen und als maßgebend für dynamisch beanspruchte Bauwerke

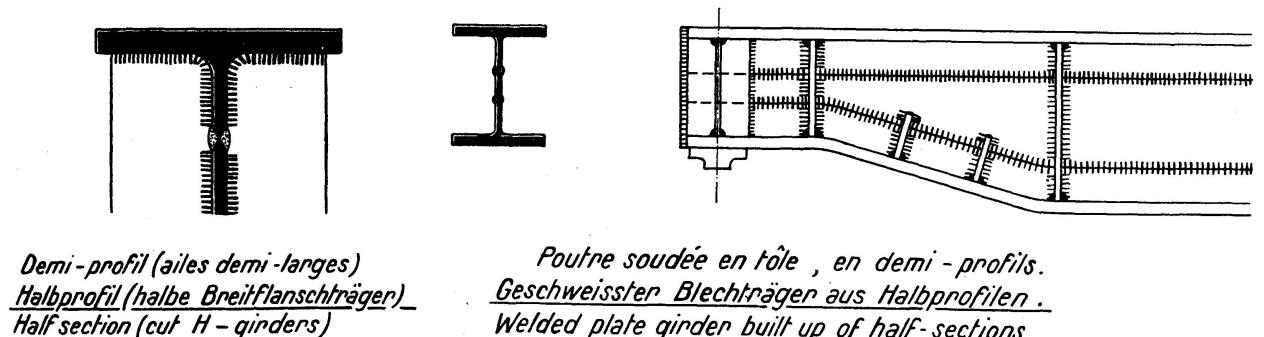


Fig. 95.

Fig. 96.

(Brücken) angesehen werden dürfen. Eine Beanspruchungsart mit 350 Lastwechseln je Minute komme im konstruktiven Ingenieurbau überhaupt nicht vor. Selbst bei den Fahrbahnteilen der Bahnbrücken sei höchstens mit zwei Lastwechseln je Minute zu rechnen. Außerdem gäbe es zwischen den einzelnen Lastspielen mehr oder weniger lange Pausen, in denen sich die Konstruktion erholen könnte. Die Wirklichkeit läge also zwischen dem statischen und dem Dauerversuch. Dazu ist zu sagen, daß die dynamischen Vorgänge

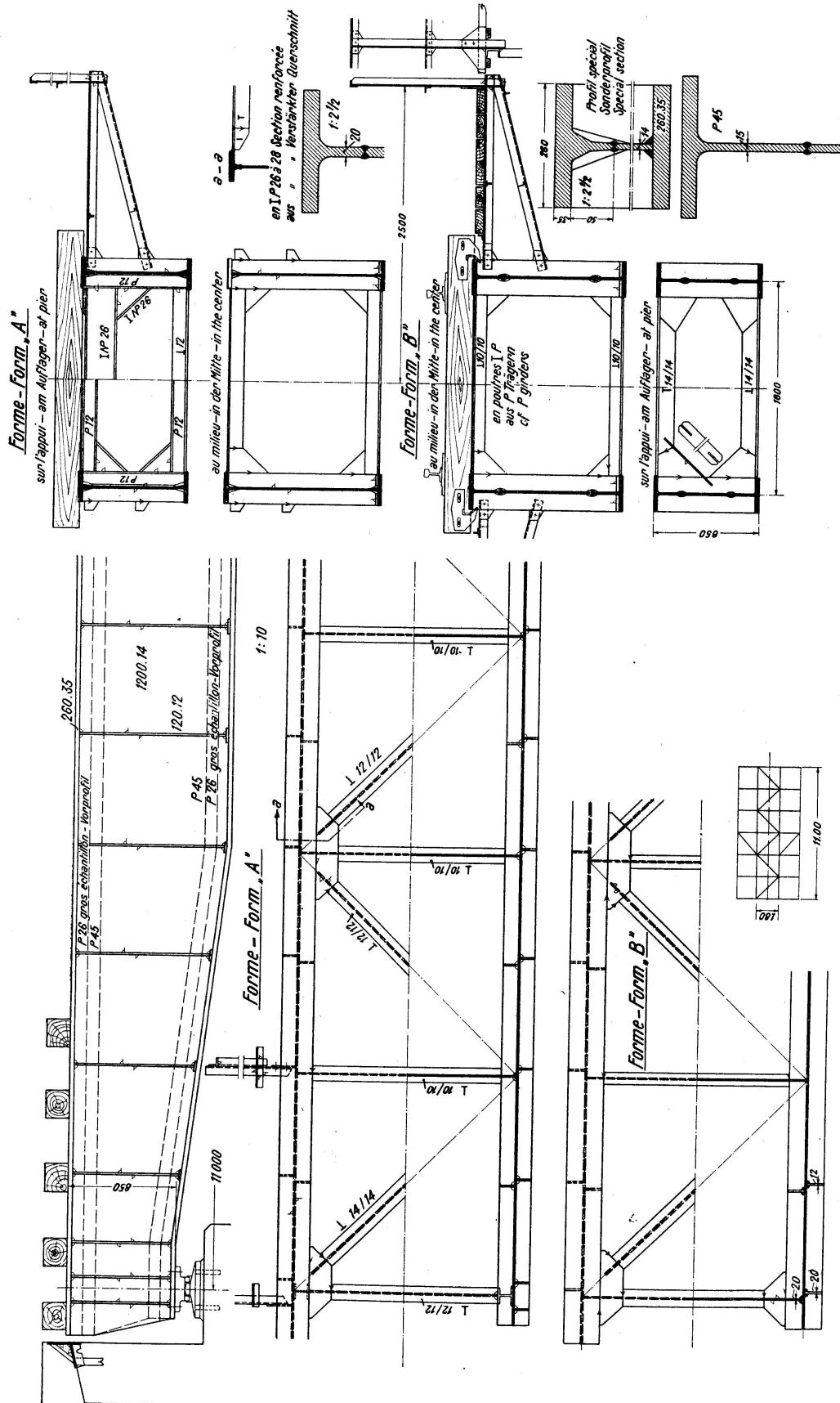


Fig. 97.

unter bewegten Lasten noch wenig erforscht, immerhin durch die brücken-dynamischen Untersuchungen von Dr. BERNHARD und Prof. KULKA höhere Schwingungszahlen nachgewiesen worden sind. Während beispielsweise

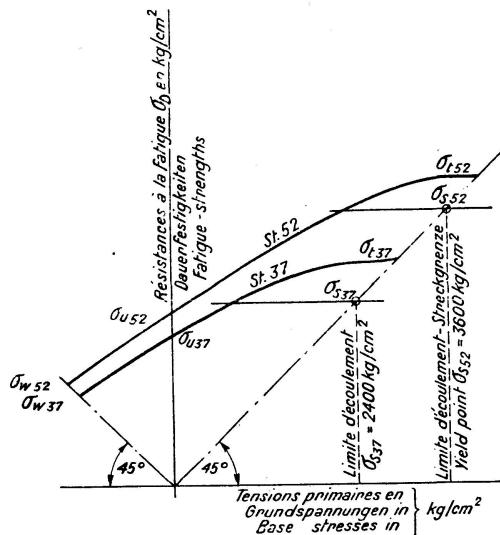


Fig. 98.

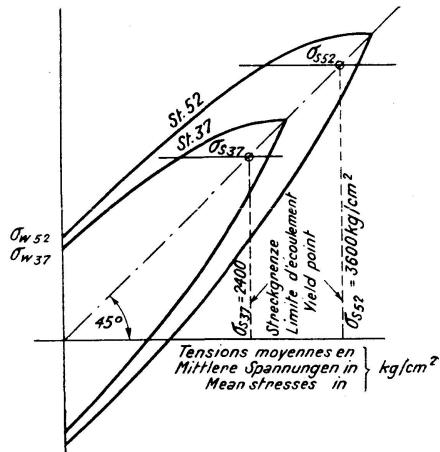


Fig. 99.

eine Brücke von 100 m Stützweite als Ganzes zwei freie Schwingungen je Sekunde anzeigte, wurden in einzelnen Baugliedern 100 Schwingungen in der Sekunde festgestellt. Von den Werkstoffprüfern wird der Einfluß der Frequenz auf die Dauerfestigkeit als geringfügig bezeichnet. Prof. GRAF hat

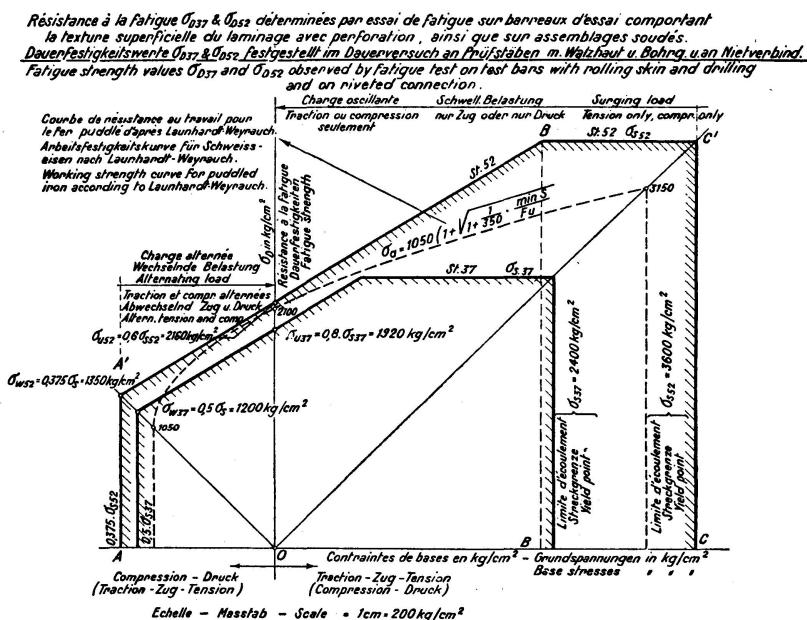


Fig. 100.

durch Versuche nachgewiesen, daß die Dauerfestigkeit der Werkstoffe nahezu unabhängig von der Zahl der Lastwechsel je Minute ist, daß auch bei gelochten Stäben, bei Niet- und Schweißverbindungen die Dauerfestigkeitswerte durch die Zahl der Lastwechsel je Minute unter praktischen Verhältnissen kaum nennenswert beeinflußt werden.

Durch genaue Untersuchungen an ältern und unter den regelmäßig verkehrenden Betriebslasten überbeanspruchten Eisenbahnbrücken ($\sigma = \frac{\max S}{F_n} \geq 1800 \text{ kg/cm}^2$) sind zahlreiche Dauerbruchanrisse nachgewiesen worden, z. B. an einer in Rottweil ausgewechselten Fachwerkbrücke 30 Dauerbruchanrisse an den Anschlüssen der Längs- und Querträger und der Querverbände. Dabei handelte es sich um typische Anrisse, wie solche später bei den Dauerversuchen mit Nietverbindungen festgestellt worden sind. Allgemeiner bekannt sind die Niet-Lockerungerscheinungen bei den Anschlüssen von Wechselstäben. Die Beobachtungen an ausgeführten Bauwerken und die Betriebs erfahrungen haben den Verfasser veranlaßt, die inneren Vorgänge durch

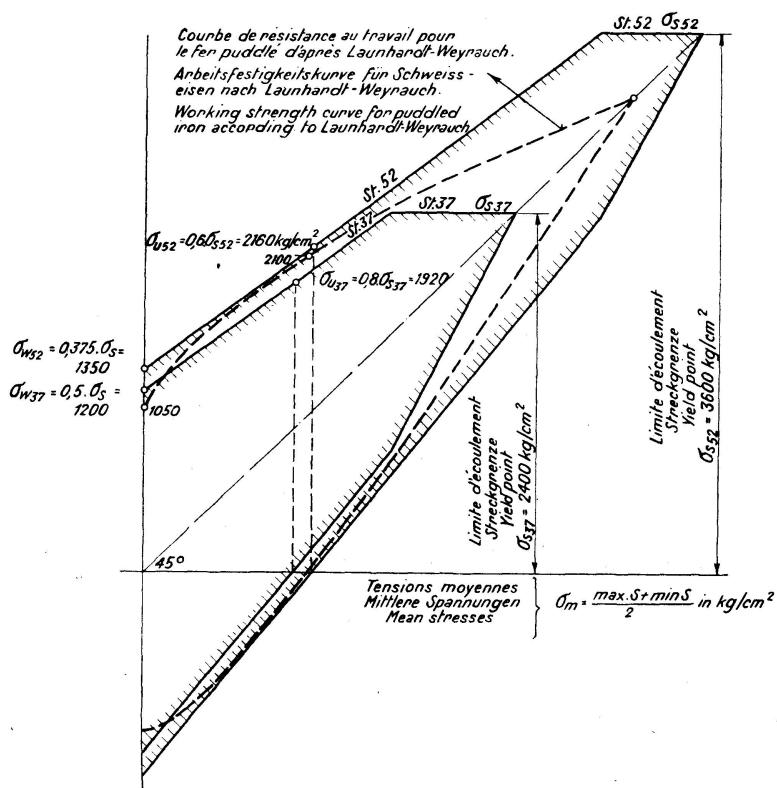


Fig. 101.

Dauerversuche nachzuprüfen und zu klären (siehe SCHAECHTERLE, Die Nietverbindungen bei Brücken aus hochwertigen Stählen. Bautechnik, 6. Jahrgang (1928), Heft 7, Seite 82 u. ff.).

Die Ergebnisse der Dauerversuche mit Niet- und Schweißverbindungen sind für die Weiterentwicklung des Stahlbaus von grundlegender Bedeutung, nicht nur in wissenschaftlicher und baulicher Hinsicht, sondern auch wirtschaftlich. Im Wettbewerb der verschiedenen Bauweisen spielt die Wirtschaftlichkeit eine ausschlaggebende Rolle. Die wirtschaftliche Überlegenheit ist in letzter Linie entscheidend für den praktischen Erfolg einer neuen Bauweise. Voraussetzung eines gesunden, wirtschaftlichen Vergleichs ist technische Gleichwertigkeit und unbedingte Betriebssicherheit. Die genieteten Stahlkonstruktionen haben in langjähriger und stetiger Aufwärtsentwicklung eine hohe Stufe technischer Vollkommenheit erreicht. Demgegenüber ist auf dem Gebiete der Schweißtechnik alles im Fluß. Trotz der unbestreitbaren großen Fortschritte ist es heute noch nicht möglich, die geschweißten Kon-

struktionen mit derselben Sicherheit zu berechnen und zu bemessen wie die genieteten Konstruktionen. Die derzeitigen Vorschriften für die Berechnung und Bemessung von geschweißten Stahlbauten weisen noch Mängel und Lücken auf, sie werden bis zur endgültigen Fassung noch mancherlei Änderungen, Ergänzungen und Verbesserungen erfahren.

Die Berechnungsgrundsätze müssen sich auf Versuche stützen. Eine rege Versuchstätigkeit hat eingesetzt. Die Auswertung und Sichtung der Versuchsergebnisse wird zur Klärung noch umstrittener Fragen der Berechnung, Bemessung und baulichen Durchbildung geschweißter Stahlkonstruktionen beitragen. Ein abschließendes Urteil lässt sich aber erst unter Heranziehung von

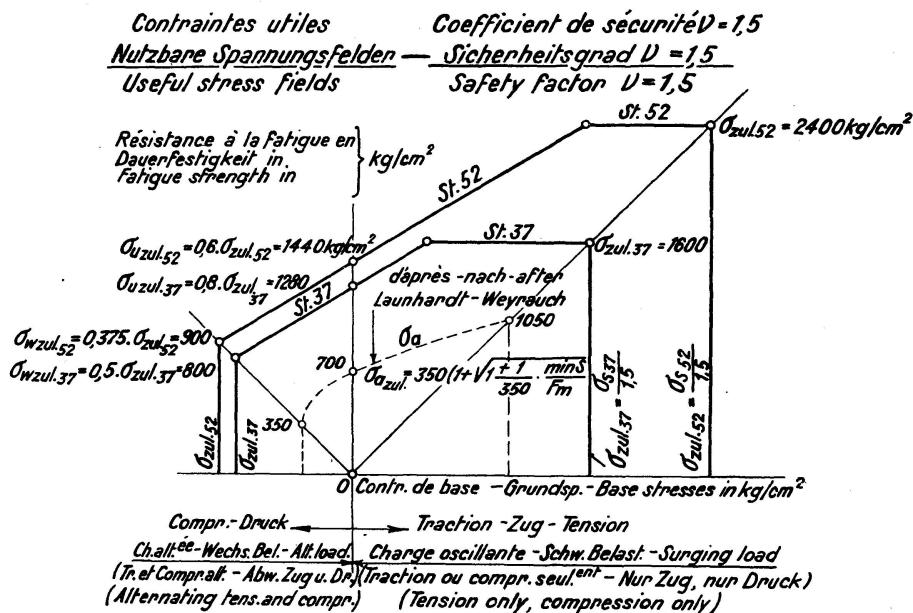


Fig. 102.

Beobachtungen und Erfahrungen in der Praxis gewinnen. Gelingt es auf diesem Wege Gesetzmäßigkeiten zu finden, denen sich viele Erfahrungen unterordnen, so ist damit eine sichere Grundlage gewonnen, um mit dem mathematischen Rüstzeug an die Lösung der Aufgaben der Praxis herangehen zu können. Die Übereinstimmung zwischen Theorie und Wirklichkeit, die Bestätigung der Versuchsergebnisse durch die praktische Erfahrung, die Bewährung der Bauwerke im Betrieb ist der schlüssige Beweis für die Brauchbarkeit und Zuverlässigkeit der so entwickelten Bemessungsverfahren.

VII. Die Bemessung von dynamisch beanspruchten Konstruktionsteilen.

a) Bemessungsverfahren.

Ausgehend von den für die Festigkeitsrechnung maßgebenden und auf Grund von Dauerversuchen festzustellenden Spannungsfeldern, wie solche beispielsweise für genietete Konstruktionsteile aus St 37 und St 52 in den Fig. 98 und 99 dargestellt sind, soll im folgenden ein allgemein verwendbares Bemessungsverfahren entwickelt werden.

In Fig. 98 sind die an Prüfstäben mit Walzhaut und Bohrung aus gewöhnlichem Baustahl St 37 und hochwertigem Baustahl St 52 im Dauerver-

such (2 Millionen Lastspiele) festgestellten Dauer- oder Arbeitsfestigkeiten σ_D für Anstrengungen, die in den Grenzen $\frac{\min S}{F_n}$ und $\frac{\max S}{F_n}$ schwingen, bezogen auf die Grundspannungen $\frac{\min S}{F_m}$ aufgetragen, in Fig. 99 bezogen auf die mittleren Spannungen $\frac{\min S + \max S}{2 F_n}$, um die die überlagernden Spannungen $\frac{\min S}{F_n}$ und $\frac{\max S}{F_n}$ pendeln. Wegen den mit dem Überschreiten der Fließgrenze verbundenen plastischen Verformungen scheidet der über die Streckgrenze hinaus sich erstreckende Teil der Diagramme für die praktische Ausnutzung aus. Weiterhin darf die Dauerfestigkeitskurve in dem verbleibenden Bereich näherungsweise durch eine Gerade ersetzt werden (Fig. 100 und 101). Der durch Schraffur gekennzeichnete, sog. „sichere Bereich“ umschließt alle Beanspruchungen, bei denen weder Brüche noch größere plastische Verformungen zu erwarten sind. Durch Division der σ_D -Werte mit

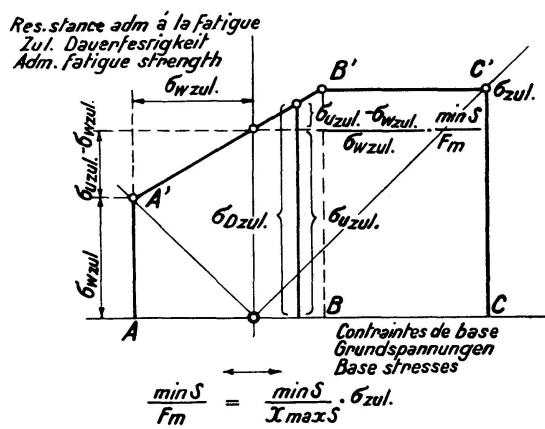


Fig. 103.

der Sicherheitszahl ν erhält man die zulässigen Spannungen für oftmals wiederholte Anstrengung $\sigma_{Dzul} = \frac{\sigma_D}{\nu}$ und damit die in Fig. 102 dargestellten nutzbaren Spannungsfelder. Für Stäbe, die in den Grenzen $\max S$ und $\min S$ auf Zug (+) oder Druck (—) beansprucht werden, wobei $(\max S)$ die zahlenmäßig (größte) Stabkraft bedeutet, ist in der Festigkeitsrechnung nachzuweisen

$$\frac{\max S}{F_m} \leq \sigma_{Dzul} \quad (1)$$

Als „maßgebende“ Querschnittsfläche F_m ist hierin, wenn $\max S$ eine Zugkraft, $\min S$ eine Zug- oder Druckkraft ist, der nutzbare Querschnitt F_n (mit Nietabzug), wenn $\max S$ und $\min S$ Druckkräfte sind, der volle Querschnitt F einzusetzen.

Unter der Voraussetzung, daß die Arbeitsfestigkeitskurve näherungsweise geradlinig bis zur Streckgrenze verläuft, läßt sich für eine beliebige Grundspannung $\frac{\min S}{F_m}$ unmittelbar aus Fig. 103 ablesen:

$$\sigma_{Dzul} = \sigma_{uzul} + \frac{\sigma_{uzul} - \sigma_{wzul}}{\sigma_{wzul}} \cdot \frac{\min S}{F_m} \quad (2)$$

Die Elimination von F_m mit Hilfe der Gleichung (1) liefert:

$$\sigma_{D \text{ zul}} = \sigma_{u \text{ zul}} + \frac{\sigma_{u \text{ zul}} - \sigma_{w \text{ zul}}}{\sigma_{w \text{ zul}}} \cdot \frac{\min S}{\max S} \cdot \sigma_{D \text{ zul}},$$

woraus folgt:

$$\sigma_{D \text{ zul}} = \frac{\sigma_{u \text{ zul}}}{1 - \frac{\sigma_{u \text{ zul}} - \sigma_{w \text{ zul}}}{\sigma_{w \text{ zul}}} \cdot \frac{\min S}{\max S}} \quad (3)$$

oder

$$\sigma_{D \text{ zul}} = \frac{1}{\nu} \cdot \frac{\sigma_u}{1 - \frac{\sigma_u - \sigma_w}{\sigma_w} \cdot \frac{\min S}{\max S}} \quad (3a)$$

Die $\sigma_{D \text{ zul}}$ -Linie bezogen auf $\frac{\min S}{\max S}$ stellt somit eine Hyperbel dar.

Wird im Sinne der BE und DIN 1073 bei einem Stab, der oftmals wiederholten Anstrengungen in den Grenzen $\max S$ und $\min S$ unterworfen ist, ein Beiwert x eingeführt, mit dem die numerisch größte Stabkraft $\max S$ zu multiplizieren ist, damit der Stab wie ein gewöhnlicher Zugstab unter einmaliger (ruhender) Belastung behandelt werden kann, so ist in Gleichung (2)

$$F_m = \frac{x \max S}{\sigma_{zul}} \quad (4)$$

einzusetzen, also

$$\sigma_{D \text{ zul}} = \sigma_{u \text{ zul}} + \frac{\sigma_{u \text{ zul}} - \sigma_{w \text{ zul}}}{\sigma_{w \text{ zul}}} \cdot \frac{\min S}{x \cdot \max S} \cdot \sigma_{zul}.$$

Mit $\sigma_{D \text{ zul}} = \frac{\sigma_{zul}}{x}$ erhält man

$$\frac{\sigma_{zul}}{x} = \sigma_{u \text{ zul}} + \frac{\sigma_{u \text{ zul}} - \sigma_{w \text{ zul}}}{\sigma_{w \text{ zul}}} \cdot \frac{\min S}{x \cdot \max S} \cdot \sigma_{zul}$$

und hieraus die Zahl x

$$x = \frac{\sigma_{zul}}{\sigma_{u \text{ zul}}} - \frac{(\sigma_{u \text{ zul}} - \sigma_{w \text{ zul}}) \sigma_{zul}}{\sigma_{u \text{ zul}} \cdot \sigma_{w \text{ zul}}} \cdot \frac{\min S}{\max S}$$

oder

$$x = \frac{\sigma_s}{\sigma_u} - \frac{(\sigma_u - \sigma_w) \sigma_s}{\sigma_u \cdot \sigma_w} \cdot \frac{\min S}{\max S} \quad (5)$$

Die x -Linie, bezogen auf $\frac{\min S}{\max S}$, stellt somit eine Gerade dar.

Für Wechsel gleich großer Zug- und Druckkräfte ist

$$\frac{\min S}{\max S} = -1$$

somit

$$x_w = \frac{\sigma_{zul}}{\sigma_{u \text{ zul}}} + \frac{(\sigma_{u \text{ zul}} - \sigma_{w \text{ zul}}) \sigma_{zul}}{\sigma_{u \text{ zul}} \cdot \sigma_{w \text{ zul}}}$$

oder

$$x_w = \frac{\sigma_s}{\sigma_u} + \frac{(\sigma_u - \sigma_w) \sigma_s}{\sigma_u \cdot \sigma_w} = \frac{\sigma_s}{\sigma_w} \quad (6)$$

Für schwelende Belastung zwischen einer unteren Grenze Null und einer oberen Grenze $\max S$ ist

$$\frac{\min S}{\max S} = 0,$$

also

$$x_u = \frac{\sigma_{zul}}{\sigma_u zul}$$

oder

$$x_u = \frac{\sigma_s}{\sigma_u} \quad (7)$$

Der aus der Streckgrenze hergeleitete Wert σ_{zul} wird erreicht für

$$\sigma_{D zul} = \frac{\sigma_{zul}}{x} = \sigma_{zul}$$

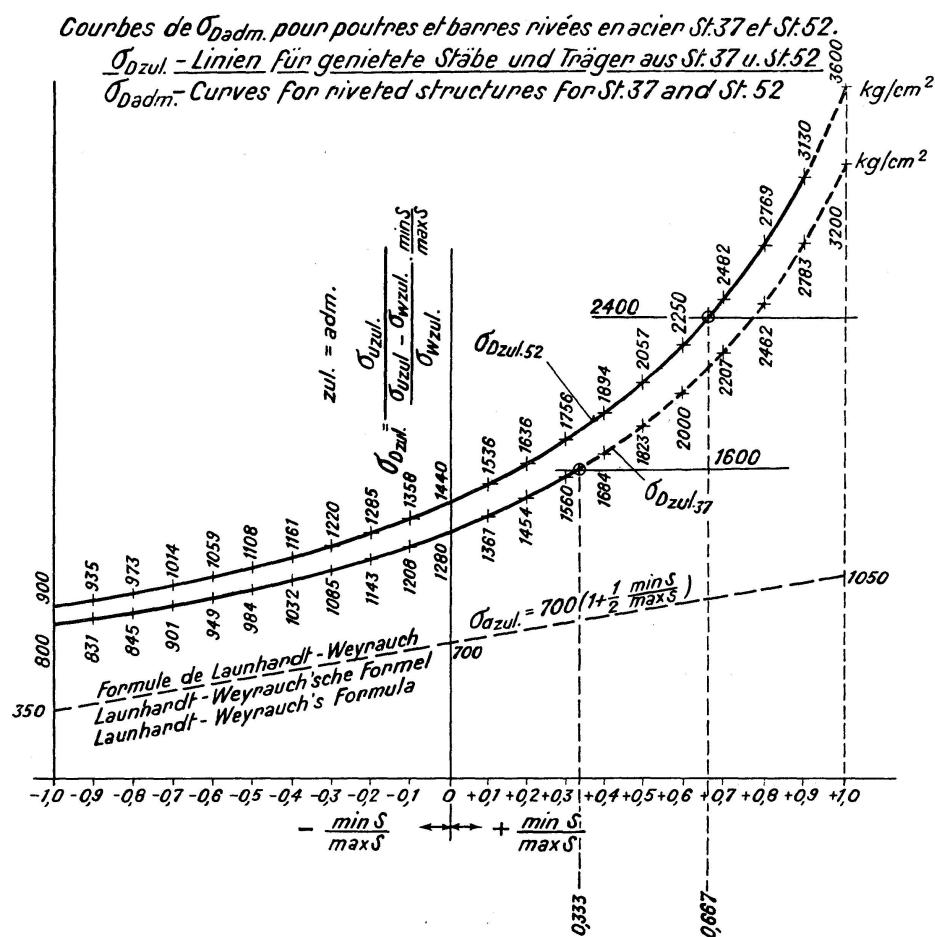
woraus folgt $x = 1$ und $\sigma_D = \frac{\max S}{F_m} = \sigma_s$.

Fig. 104.

Für $x = 1$ liefert Gleichung (5)

$$\frac{\min S}{\max S} = \frac{\sigma_{zul} - \sigma_{u zul}}{\sigma_{u zul} - \sigma_{w zul}} \cdot \frac{\sigma_{w zul}}{\sigma_{zul}} \quad (8)$$

$$\frac{\min S}{\max S} = \frac{\sigma_s - \sigma_u}{\sigma_u - \sigma_w} \cdot \frac{\sigma_w}{\sigma_s}$$

oder

Nach den Stuttgarter Versuchen darf gesetzt werden:

St. 37

$$\begin{aligned}\sigma_{s_{37}} &= 2400 \text{ kg/cm}^2 \\ \sigma_{u_{37}} &= 1920 \quad " \\ \sigma_{w_{37}} &= 1200 \quad "\end{aligned}$$

St. 52

$$\begin{aligned}\sigma_{s_{52}} &= 3600 \text{ kg/cm}^2 \\ \sigma_{u_{52}} &= 2160 \quad " \\ \sigma_{w_{52}} &= 1350 \quad "\end{aligned}$$

Wird beispielsweise für die auf Dauerversuchen gegründeten Beanspruchungsgrenzen bei dynamisch beanspruchten Konstruktionsteilen aus St 37 und St 52 die Sicherheitszahl $\nu = 1,5$ angenommen, so folgt:

$$\begin{aligned}\sigma_{zul_{37}} &= 1600 \text{ kg/cm}^2 \\ \sigma_{u\ zul_{37}} &= 1280 \quad " \\ \sigma_{w\ zul_{37}} &= 800 \quad "\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{zul_{52}} &= 2400 \text{ kg/cm}^2 \\ \sigma_{u\ zul_{52}} &= 1440 \quad " \\ \sigma_{w\ zul_{52}} &= 900 \quad "\end{aligned}$$

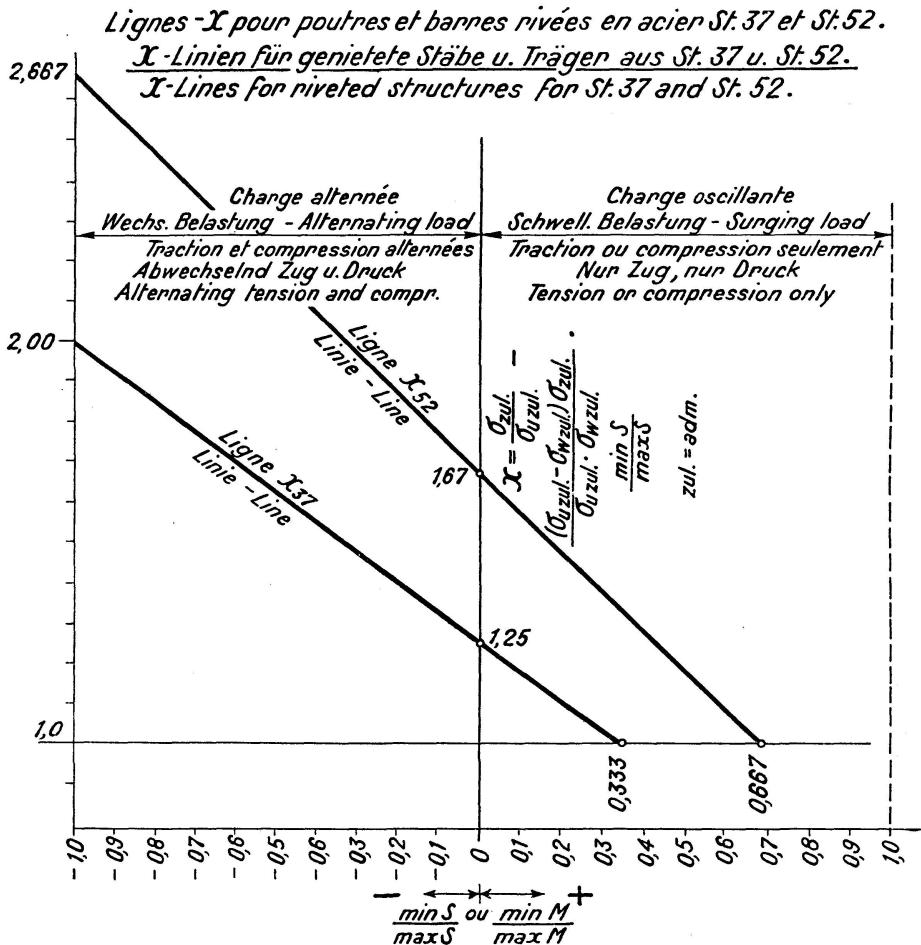


Fig. 105.

Damit ergibt sich:

$$\left. \begin{aligned}\sigma_{D\ zul_{37}} &= \frac{1280}{1 - 0,6 \frac{\min S}{\max S}} \\ \sigma_{D\ zul_{52}} &= \frac{1440}{1 - 0,6 \frac{\min S}{\max S}}\end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} x_{37} &= 1,25 - 0,75 \frac{\min S}{\max S} \\ x_{52} &= 1,67 - 1,0 \frac{\min S}{\max S} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Die σ_{Dzul} -Kurven und die x -Linien, bezogen auf $\frac{\min S}{\max S}$, sind in den Fig. 104 und 105 dargestellt.

b) Praktische Anwendung des Bemessungsverfahrens.

Mit den aus der Festigkeitsrechnung entnommenen $\max S$ und $\min S$ wird aus der Fig. 108 oder einer Zahlentafel die für das Verhältnis $\frac{\min S}{\max S}$ maßgebende Zahl x entnommen und dann die aus

$$\frac{x \cdot \max S}{F_m}$$

errechnete Spannung der zulässigen Spannung σ_{zul} gegenübergestellt, wobei

$$\frac{x \cdot \max S}{F_m} \leq \sigma_{zul}$$

sein muß.

Druckstäbe sind außerdem nach dem ω -Verfahren (BE und DIN 1073) für die größte Druckkraft

$$\frac{\omega(-\max S)}{F}$$

zu untersuchen.

Für oftmals wiederholte Wechsel- und Schwellbeanspruchung von Trägern gilt sinngemäß:

$$\frac{x \cdot \max M}{W_m} \leq \sigma_{zul}$$

c) Die Launhardt-Weyrauch'sche Formel.

Das vorstehend hergeleitete Bemessungsverfahren stellt eine Weiterentwicklung der bekannten LAUNHARDT-WEYRAUCH'schen Formel dar, die ihrerseits auf den bahnbrechenden Arbeiten WÖHLERS und BAUSCHINGERS fußt.

Auf Grund der Versuche von WÖHLER und BAUSCHINGER hat LAUNHARDT die Formel

$$a = u \left(1 + \frac{t-u}{u} \cdot \frac{\min B}{\max B} \right)$$

für die Arbeitsfestigkeit eines mittig auf Zug in den Grenzen $\min B$ und $\max B$ beanspruchten Stabes aufgestellt. Die LAUNHARDT'sche Formel wurde dann von WEYRAUCH für Wechsel von Zug und Druck ergänzt durch

$$a = u \left(1 - \frac{u-s}{u} \cdot \frac{\min B}{\max B} \right)$$

Mit den durch Versuche festgestellten Verhältniszahlen, Schwingungsfestigkeit (s): Ursprungsfestigkeit (u): Zerreißfestigkeit (t) = 1:2:3 ergab sich

$$\frac{t-u}{u} = \frac{u-s}{u} = \frac{1}{2}$$

und unter der Annahme einer dreifachen Sicherheit für den damaligen Bau-Stahl (Schweißeisen)

$$\sigma_{azul} = 700 \left(1 \pm \frac{1}{2} \frac{\min S}{\max S} \right),$$

worin $\min S$ die numerisch kleinste, $\max S$ die numerisch größte Stabkraft bedeutet und bei $\left\{ \begin{array}{l} \text{entgegengesetzten} \\ \text{gleichen} \end{array} \right\}$ Vorzeichen der Grenzwerte das $\left\{ \begin{array}{l} \text{untere} \\ \text{obere} \end{array} \right\}$ Vorzeichen im Klammerausdruck maßgebend ist.

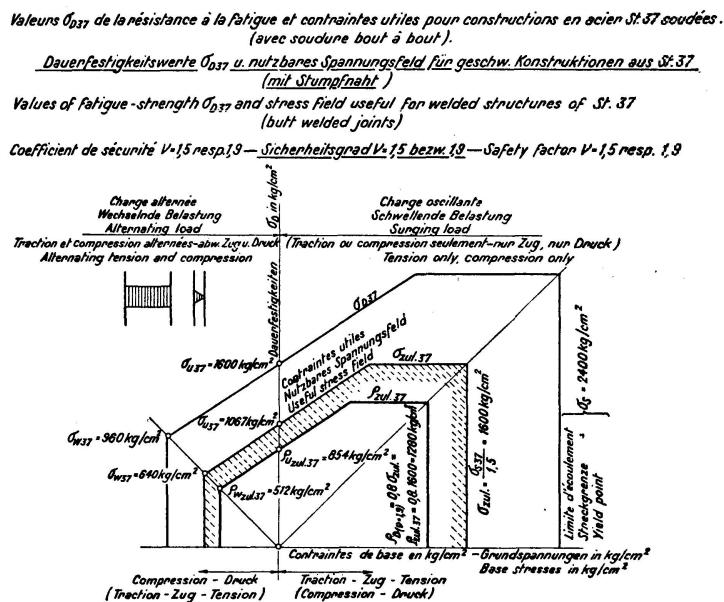


Fig. 106.

Die $\sigma_{a \text{ zul}}$ -Linie nach LAUNHARDT-WEYRAUCH, bezogen auf $\frac{\min S}{\max S}$, stellt somit eine Gerade dar, bezogen auf $\frac{\min S}{F_m}$ eine Kurve

$$\sigma_{a\ zul} = \frac{u}{2} + \sqrt{\frac{u^2}{4} - (u-s)} \frac{\min S}{F_m}$$

für den Zweig zwischen s und u und

$$\sigma_{a\ zul} = \frac{u}{2} + \sqrt{\frac{u^2}{4} + (t-u) \frac{\min S}{F_m}}$$

für den Zweig zwischen u und t .

Für $s:u:t = 1:2:3$ und dreifache Sicherheit folgt:

$$\sigma_{a\ zul} = 350 \left[1 + \sqrt{1 \pm \frac{1}{350} \cdot \frac{\min S}{F_m}} \right]$$

und

$$\sigma_a = 1050 \left[1 + \sqrt{1 \pm \frac{1}{350} \cdot \frac{\min S}{F_m}} \right]$$

Für die Grundspannung $\frac{\min S}{F_m} = 0$ wird

$$\sigma_{u\,zul} = 700 \text{ kg/cm}^2, \quad \sigma_u = 2100 \text{ kg/cm}^2.$$

Für Wechsel gleich großer Zug- und Druckbeanspruchungen $\left(\frac{\min S}{F_m} = \sigma_{w\ zul}\right)$ folgt

$$\sigma_{w\ zul} = 350 \text{ kg/cm}^2, \quad \sigma_w = 1050 \text{ kg/cm}^2.$$

Der Grenzwert bei ruhender Belastung

$$\left(\frac{\min S}{F_m} = \frac{\max S}{F_m} = \sigma_{zul}\right) \text{ wird erreicht mit}$$

$$\sigma_{t\ zul} = 1050 \text{ kg/cm}^2, \quad \sigma_t = 3150 \text{ kg/cm}^2.$$

Die der LAUNHARDT-WEYRAUCH'schen Formel entsprechenden $\sigma_{a\ zul}$ und $\sigma_{a\ -}$ -Linien sind zum Vergleich in den Fig. 100, 101 und 102 gestrichelt eingetragen.

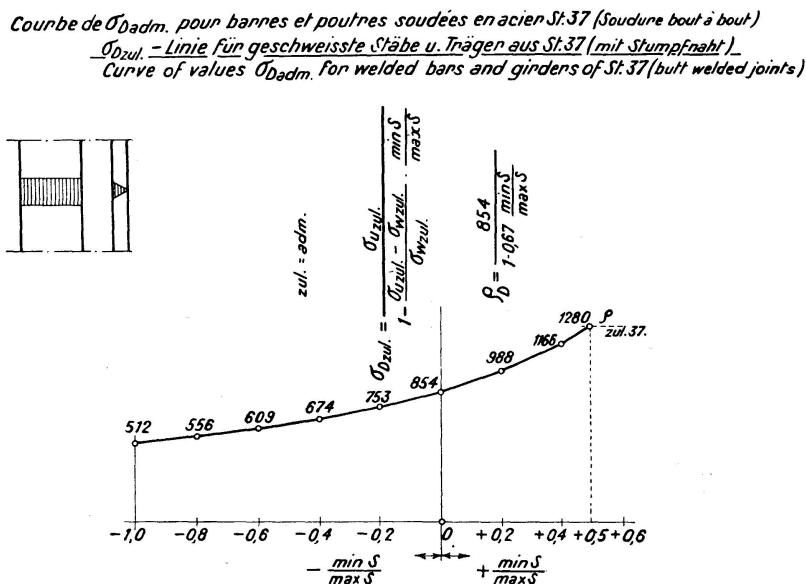


Fig. 107.

Courbe de σ_{Dadm} pour barres et poutres soudées en acier St 37 (soudure bout à bout).

σ_{Dzul} -Linie für geschweißte Stäbe und Träger aus St 37 (mit Stumpfnaht).

Curve of values σ_{Dadm} for welded bars and girders of St 37 (butt welded joints).

d) Die amerikanische Formel.

Die Bemessung der Wechselstäbe für mittige Zugdruckbelastung in den Grenzen $\max S$ und $\min S$ auf Grund der Formel

$$F_{erf} = \frac{\max S + \min S}{\sigma_{zul}}$$

geht auf WÖHLER zurück. Dabei ist vorausgesetzt, daß die Schwingungsweite (Unterschied der Spannungen, welche die Schwingungen eingrenzen) im Wechselbereich konstant ist.

Die amerikanische Formel ergibt sich als Sonderfall der vorstehenden Ableitung. Die Gleichung (3):

$$\sigma_{Dzul} = \frac{\sigma_{uzul}}{1 - \frac{\sigma_{uzul} - \sigma_{wzul}}{\sigma_{wzul}} \cdot \frac{\min S}{\max S}} = \frac{\max S}{F_{erf}}$$

liefert

$$F_{erf} = \frac{\max S - \frac{\sigma_{uzul} - \sigma_{wzul}}{\sigma_{wzul}} \cdot \min S}{\frac{\sigma_{wzul}}{\sigma_{uzul}}}$$

und mit $\sigma_u = 2 \sigma_w$

$$F_{erf} = \frac{\max S - \min S}{\sigma_{uzul}},$$

also bei Beschränkung auf Wechselbelastung und ohne Berücksichtigung des Vorzeichens die amerikanische Formel.

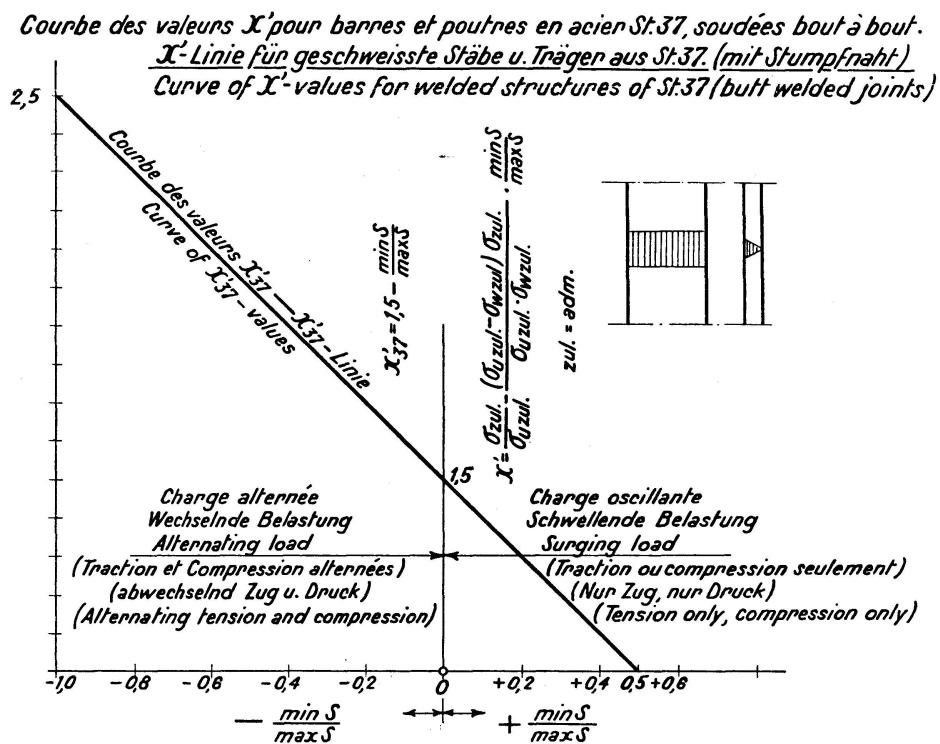


Fig. 108.

Für die praktische Anwendung empfiehlt es sich, den erforderlichen Querschnitt durch Einführung einer ideellen Stabkraft S auf die Grundspannung σ_{zul} zu beziehen.

Aus

$$F_{erf} = \frac{S}{\sigma_{zul}} = \frac{\max S - \frac{\sigma_{uzul} - \sigma_{wzul}}{\sigma_{wzul}} \cdot \min S}{\frac{\sigma_{wzul}}{\sigma_{uzul}}}$$

folgt:

$$\begin{aligned} S &= \frac{\sigma_{zul}}{\sigma_{uzul}} \cdot \max S - \frac{(\sigma_{uzul} - \sigma_{wzul})}{\sigma_{wzul} \cdot \sigma_{uzul}} \min S \\ &= a \cdot \max S - b \cdot \min S \\ &= x \max S. \end{aligned}$$

e) Schweißverbindungen St 37 (Fig. 106).

Das nutzbare Spannungsfeld ist für Stumpfnahtverbindungen nach den Versuchen von Prof. GRAF durch

$\sigma_{s_{37}} = 2400 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{u_{37}} = \frac{2}{3} \sigma_s = 1600 \text{ kg/cm}^2$ und $\sigma_{w_{37}} = 960 \text{ kg/cm}^2$ festgelegt. Für $\nu = 1,5$ und $\varrho_{zul} = \sigma_{zul}$ wird

$\varrho_{zul_{37}} = 1600 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{uzul_{37}} = 1067 \text{ kg/cm}^2$ und $\sigma_{wzul_{37}} = 640 \text{ kg/cm}^2$, für $\varrho_{zul} = 0,8$ σ_{zul} ($\nu = 1,9$) folgt:

$\varrho_{zul_{37}} = 1280 \text{ kg/cm}^2$, $\varrho_{uzul_{37}} = 854 \text{ kg/cm}^2$ und $\varrho_{wzul_{37}} = 512 \text{ kg/cm}^2$.

Damit ergibt sich

$$\varrho_{Dzul_{37}} = \frac{854}{1 - 0,67 \frac{\min S}{\max S}}$$

$$x'_{37} = 1,5 - \frac{\min S}{\max S}$$

Die erhöhte, gedachte Stabkraft, die der Bemessung zu Grunde zu legen ist, folgt aus

$$S = x'_{37} \cdot \max S \\ = 1,5 \max S - \min S.$$

Die $\varrho_{Dzul_{37}}$ -Kurve und die x'_{37} -Linie ist in Fig. 107 und 108 dargestellt.

Bei den Verbindungen mit Stirn- und Flankenkehlnähten ist zu unterscheiden zwischen den zulässigen Beanspruchungen der Nähte und denen der verbundenen Teile, z. B. Stäbe und Knotenbleche. Die notwendigen Abminderungen gegenüber den Stumpfnahtverbindungen oder den genieteten Stabverbindungen können erst nach Abschluß der eingeleiteten Versuche festgesetzt werden.

Zusammenfassung.

Die Widerstandsfähigkeit von Stählen bei schwingender Beanspruchung ist erstmals von WÖHLER durch Versuche festgestellt worden. BAUSCHINGER führte die Forschungsarbeiten WÖHLERS weiter. Auf den Ergebnissen dieser Versuche fußend, hat LANNHARDT eine Formel für die Arbeitsfestigkeit eines mittig auf Zug oder Druck in den Grenzen $\max S$ und $\min S$ beanspruchten Stabes entwickelt, die von WEYRAUCH für Wechsel von Zug- und Druckanstrengungen ergänzt wurde. Durch den Ausbau der Dauerfestigkeitsprüfung und die Ermittlung der Dauerfestigkeitswerte bei schwingender, schwellender und zusammengesetzter Beanspruchung von Werkstoffen und Konstruktionselementen (Verbindungen) ist es gelungen, zuverlässige Unterlagen für die Festigkeitsberechnungen der Konstrukteure und die Beurteilung der Sicherheitsgrade von dynamisch beanspruchten Konstruktionen zu schaffen. Die Dauerfestigkeitswerte der Stähle werden durch Oberflächenzustände und Bearbeitungsgrade, insbesondere durch Bohrungen und Kerben weitgehend beeinflußt. Die Konstruktionsform und die Art der Kraftübertragung ist für die Leistungsfähigkeit einer Verbindung von entscheidender Bedeutung. Die im Auftrage der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft und des Deutschen Stahlbauverbandes an der Materialprüfungsanstalt der Technischen Hochschule Stuttgart von Prof. O. GRAF durchgeführten Versuche zur Erkundung der Dauerfestigkeiten von Stählen mit Walzhaut und mit Bohrung und von Niet- und Schweißverbindungen haben neue und wertvolle Erkenntnisse vermittelt. Weiche (zähe) Stähle sind weniger kerbempfindlich als harte Stähle und

haben die wertvolle Eigenschaft, Spannungsschwellen und -Spitzen weitgehender auszugleichen und zu verarbeiten. Der Ausnützungsgrad der Dauerfestigkeit der Stähle ist bei Nietverbindungen abhängig vom Verhältnis $\sigma: \sigma_t: \tau$, bei Schweißverbindungen von der Art der Kraftübertragung durch Stumpfnähte, Stirn- oder Flankenkehlnähte. Die Bedeutung der Formgebung zur Erzielung eines möglichst störungsfreien Kraftflusses für die Dauerfestigkeit tritt bei Schweißverbindungen besonders deutlich in Erscheinung. Die Konstruktionsform beeinflußt die dynamische Widerstandsfähigkeit geschweißter Kraftanschlüsse viel mehr, als das bei genieteten Anschlüssen der Fall ist, bei denen unbedenklich eine vom Nietbild unabhängige Berechnung angewendet werden darf. Die Auffassungen über die Auswertung der Dauerversuche und die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Praxis sind noch geteilt. Ein abschließendes Urteil läßt sich erst unter Heranziehung von Beobachtungen und Erfahrungen der Baupraxis bilden. An hochbeanspruchten Bahnbrücken festgestellte Dauerbruchanrisse stehen in Einklang mit den Ergebnissen der Dauerversuche.

Résumé.

Les possibilités de résistance des aciers aux efforts répétés ont été établies pour la première fois par WÖHLER. BAUSCHINGER a poursuivi les travaux de recherches de WÖHLER. S'appuyant sur les résultats de ces travaux, LANNHARDT a établi une formule permettant d'exprimer la résistance à la fatigue d'une barre soumise à des efforts de traction ou de compression entre les limites de max S et min S ; cette formule a été complétée par WEYRAUCH dans le cas des efforts alternés de traction et de compression. Grâce à la mise au point de méthodes d'essai de résistance à la fatigue et de détermination de la valeur de cette résistance, dans les différents cas des contraintes alternées et répétées non alternées, ainsi que des contraintes composées auxquelles sont soumis les matériaux de construction et les éléments des ouvrages (assemblages), on a réussi à établir des bases effectives permettant aux constructeurs d'effectuer leurs calculs de résistance et de déterminer les coefficients de sécurité des ouvrages soumis à des efforts de nature dynamique. Les valeurs de la résistance à la fatigue des aciers sont soumises à l'influence de l'état de leurs surfaces et des conditions d'usinage, tout particulièrement lorsqu'il s'agit de perçages et de fraisages. La disposition des éléments des ouvrages et la manière dont s'effectue la transmission des efforts sont d'importance capitale pour les possibilités de résistance des assemblages. Les essais effectués par le Professeur O. GRAF à la Station d'Essai des Matériaux de l'Ecole Technique Supérieure de Stuttgart, pour le compte de la Société des Chemins de Fer Allemands, sur la détermination de la résistance à la fatigue des aciers comportant une structure superficielle de laminage et des perçages, ainsi que sur les assemblages rivés et soudés, ont abouti à des résultats nouveaux et extrêmement intéressants. Les aciers doux (ductiles) sont moins sensibles à l'influence des fraisages que les aciers durs et possèdent la précieuse propriété de permettre une compensation des variations et des „pointes“ des efforts. Le degré de mise en oeuvre de la résistance à la fatigue des aciers, dans les assemblages, rivés, dépend du rapport: $\sigma: \sigma_t: \tau$; dans les assemblages soudés, il dépend de la manière dont se transmettent les efforts dans les différents cas des cordons de soudure en bout ou d'angle, frontaux ou latéraux. Dans les assemblages soudés, l'influence de la forme s'exerce d'une manière par-

ticulièrem ent nette vis-à-vis des possibilités, qu'offre la résistance à la fatigue, d'éviter les perturbations. La forme donnée aux éléments des assemblages soudés soumis à des efforts intervient ici d'une manière beaucoup plus nette que lorsqu'il s'agit des assemblages rivés, dans lesquels il est possible de conduire les calculs sans tenir compte de la disposition de la rivure. L'interprétation de ces essais de fatigue et la mise en œuvre des résultats obtenus dans le cadre de la pratique, font encore l'objet de conceptions différentes. On ne pourra aboutir à des notions définitives et uniques que par l'expérience pratique. Les fissurations d'amorçage des ruptures par fatigue qui ont été observées sur des ponts de chemins de fer soumis à des efforts considérables sont en accord avec les résultats des essais de fatigue.

Summary.

The resistibility of different kinds of steel subjected to oscillating stresses was first of all determined by tests by WÖHLER. BAUSCHINGER carried WÖHLER's researches further. Based on the results of these tests, LANNHARDT developed a formula for the working strength of a rod subjected in the middle to tensile or compression stresses within the limits S_{max} and S_{min} . This formula has been extended by WEYRAUCH for alternating tensile and compression stresses. Through the development of fatigue strength testing, and through the determination of fatigue strength values for oscillating intermittent and combined stressing of materials and structural elements (joints), one has succeeded in obtaining reliable data for calculating strength and for giving an idea of the degree of safety of structures subjected to dynamic stressing. The fatigue strength of steel is affected by surface conditions and the degree of finish; it is particularly affected by drilled holes and by notches. The designed shape and the method of transmission of the forces are of decisive importance for the strength of a joint. Tests have been made by Prof. O. GRAF in the material testing laboratory of Stuttgart Polytechnic, at the request of the German Railways Company and the German Structural Steel Makers Association, to determine the fatigue strength of steels in the state as rolled, and with drilled hole, and of riveted and welded joints. The results have given new and valuable information. Soft '(tough) steels are less sensitive when notched than hard steels, and possess the valuable property of compensating for and absorbing intermittent and alternating stresses. The degree to which the fatigue strength of a steel may be utilised depends in riveted joints on the ratio $\sigma : \alpha_u : \tau$, and in welded joints on the way the forces are transmitted through butt joints and fillet welds with normal or parallel shear. The proper choice of shape to give the most suitable path for the forces becomes particularly important in the case of welded joints. The designed shape affects the resistibility to dynamic stresses in welded joints much more than in riveted joints; for the latter a calculation independent of the type of riveting may be adopted without hesitation. Opinions are still divided as to how the results of the fatigue tests are to be judged and how they may be applied in practice. A decisive judgment can only be formed with the help of observations and experience made in actual practice. Cracks observed in highly stressed railway bridges are in conformity with the results of the fatigue tests.