

Über die Dauerfestigkeit von genieteten und geschweissten Verbindungen aus Baustahl St 52

Autor(en): **Schulz, E.H. / Buchholtz, H.**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **2 (1933-1934)**

PDF erstellt am: **11.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-3411>

Nutzungsbedingungen

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

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

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

Haftungsausschluss

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

UBER DIE DAUERFESTIGKEIT VON GENIETETEN UND GESCHWEISSTEN VERBINDUNGEN AUS BAU- STAHL ST 52.

LA DURABILITÉ DES ASSEMBLAGES RIVÉS ET SOUDÉS
EN ACIER ST. 52.

ON THE FATIGUE STRENGTH OF RIVETED AND WELDED JOINTS
MADE OF STEEL ST. 52.

Prof. Dr.-Ing. E. H. SCHULZ,
Direktor des Forschungsinstituts der Vereinigte Stahlwerke A.-G., Dortmund, und

Dr.-Ing. H. BUCHHOLTZ,
Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsinstitut der Vereinigte Stahlwerke A.-G.,
Dortmund.

Im ersten Bande wurde über die Dauerfestigkeit und die grundsätzlichen Erfahrungen beim Schweißen des hochwertigsten Baustahles St 52 berichtet. Als besonders wichtig für die Frage der Übertragbarkeit der im Laboratorium erzielten Ergebnisse auf die konstruktive Gestaltung wurde dabei bereits darauf hingewiesen, daß die wirklichen, in größeren Stahlbauwerken auftretenden Beanspruchungen noch durchaus ungenügend bekannt seien; für den Werkstoffprüfer ergäbe sich daher besonders die Aufgabe, die Dauerfestigkeit nicht nur bei vorwiegend schwingender, sondern auch bei zusammengesetzter — ruhender und wechselnder — Beanspruchung zu ermitteln. Gemäß dem damaligen Stand der experimentellen und praktischen Kenntnisse wurde zunächst der Einfluß der Walzhaut, von Bohrungen und Kerben auf die Dauerfestigkeit des Baustahles selbst geschildert und festgestellt, daß der hochwertige Baustahl St 52 in seinen verschiedenen Legierungstypen gegenüber härteren Kohlenstoffstählen und auch 3 % igem Nickelstahl ein durchaus günstiges Verhalten bei Dauerbeanspruchung aufweist. Die Kenntnis über die Dauerfestigkeit genieteteter bzw. geschweißter Verbindungen und ganzer Bauelemente war damals noch wenig vollkommen. Für die nach statischen Gesichtspunkten entworfenen geschweißten Laschenverbindungen lagen die ersten ungünstigen Ergebnisse von Dauerversuchen vor, die zu einer übertriebenen Unterbewertung der Schweißung gegenüber der Nietung führten. Inzwischen hat die Praxis jedoch bewiesen, daß wenigstens bei Vorliegen einer gewissen ruhenden Grundspannung irgendwelche Bedenken gegen die Anwendung der Schweißung auch bei zusätzlich dynamisch beanspruchten Konstruktionen nicht gerechtfertigt sind. Die praktischen Erfahrungen sind gleichzeitig durch umfangreiche Dauerversuche zahlreicher Prüfstellen¹⁾ im wesentlichen bestätigt und erweitert worden. In einigen Fällen konnten die sich aus den Laboratoriumsversuchen ergebenden Richtlinien für die Ausführung größerer geschweißter Brücken bereits praktisch verwertet werden.

¹⁾ Stahl u. Eisen 53 (1933), S. 545/53.

Wenn somit auf dem Gebiete der Werkstoffprüfung und ihrer Auswertung für die Konstruktion in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte zu verzeichnen sind, so muß immer wieder darauf hingewiesen werden, daß für eine wirklich brauchbare Beurteilung der Verhältnisse vor allem von den Konstrukteuren die tatsächlich in Bauwerken auftretenden Beanspruchungen genauer untersucht werden müssen, wobei außer dem Anteil der schwingenden und der statischen Beanspruchung besonders die Häufigkeit der größeren Lastwechselspiele in längeren Betriebszeiten festzustellen ist. Beobachtungen an älteren genieteten Eisenbahnbrücken haben gezeigt, daß unter ungünstigen Beanspruchungsverhältnissen — geringes Eigengewicht, hohe Zugfolge, eine nach schwingungstechnischen Grundsätzen nicht einwandfreie Gestaltung bzw. ungünstige Werkstattarbeit — im Verlaufe mehrerer Jahre in den Nietlöchern der Knotenbleche oder hochbeanspruchter Stäbe Dauerbrüche

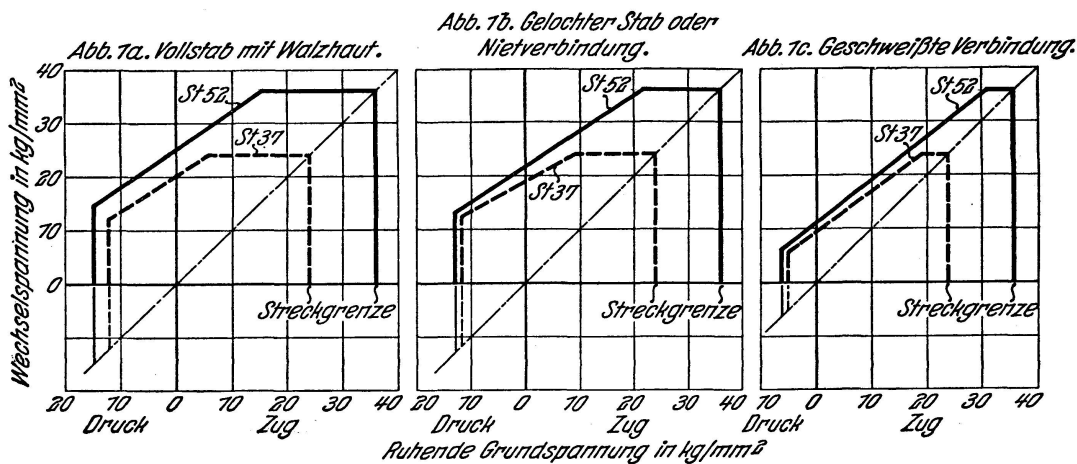


Fig. 1 a—c.

Dauerzugfestigkeit von St 37 und St 52 (nach K. Schaechterle).

Résistance à la fatigue par traction des aciers St 37 et St 52 (d'après K. Schaechterle).

Fatigue tensile strength of St 37 and St 52 (according to K. Schaechterle).

auftreten können. Für derartige Bauwerke wird es nicht zu umgehen sein, die Ergebnisse der Dauerversuche bei der Bemessung der Stäbe und Anschlüsse durch entsprechende Herabsetzung der zulässigen Spannungen zu berücksichtigen. Da jedoch die Zahl der gefährlichen Lastwechselspiele im Verlaufe der Betriebszeit verhältnismäßig gering ist, kann der Sicherheitsgrad gegenüber der Dauerfestigkeit (2-Millionengrenze) erheblich geringer gewählt werden als in dem Bereich der vorwiegend ruhenden Beanspruchung, da hier ein nur einmaliges Überschreiten der Streckgrenze schon zu unzulässigen Verformungen führen kann. Für alle größeren Brücken mit einem erheblichen Eigengewicht liegen die Verhältnisse durchweg günstiger, da mit dem Eigengewicht der ruhende Anteil an der Gesamtbeanspruchung und mit der ruhenden Vorlast bekanntlich auch die Dauerfestigkeit ziemlich schnell wächst.

Es muß weiter bei den Betrachtungen und der Auswertung der Laboratoriumsversuche stets daran gedacht werden, daß bei ihnen die ungünstigsten Belastungsverhältnisse zugrunde gelegt sind. Die Laboratoriumsversuche geben über die Schwingungsfestigkeit gewissermaßen nur Vergleichszahlen, beispielsweise für verschiedene Arten der Verbindungen usw.; die dabei ermittelten Zahlen können aber nicht ohne weiteres dem Konstrukteur unmittelbar als Werte dienen.

O. GRAF und K. SCHAECHTERLE²⁾ haben als erste planmäßige Feststellungen zur Bewertung der maßgebenden Konstruktionsunterlagen für genietete und geschweißte Verbindungen gemacht, wobei sie sich der Pulsatormaschine bedienten und vorzugsweise den ungünstigsten Fall der Ursprungsfestigkeit untersuchten. Nach ihren Dauerzugversuchen ist der sichere Bereich, in dem Vollstäbe mit Walzhaut aus St 37 und St 52 zwischen reiner Wechselbeanspruchung und reiner ruhender Beanspruchung belastet werden können, in Abb. 1 a dargestellt. Die Überlegenheit des härteren Baustahles St 52 nimmt in Übereinstimmung mit anderen Untersuchungen³⁾ mit wachsendem Anteil der ruhenden Spannung an der Gesamtbeanspruchung zu.

Für die Bewertung verschiedener Nietverbindungen wird zweckmäßig die Ursprungsfestigkeit des gelochten Stabes als Vergleichsmaßstab benutzt. Der Beanspruchungsbereich bei Prüfung gelochter Stäbe aus St 37 und St 52 ist in Abb. 1 b wiedergegeben. Für Nietverbindungen aus St 37 mit Nieten aus St 34 stellte GRAF beispielsweise Ursprungsfestigkeits-Werte fest, die gleich oder sogar höher waren als die des nicht künstlich verletzten Walzstabes. Bei Laschenverbindungen aus St 52 ist nach GRAF und SCHAECHTERLE bei Fortfall des Zwischenanstriches, guter Durchführung der Nietung, genügender Anzahl von Nieten und bei Verwendung eines geeigneten Nietenstahles ebenfalls mit einer befriedigenden Dauerfestigkeit zu rechnen. Auch hier liegt die Überlegenheit des St 52 vorzugsweise bei überwiegend ruhenden Beanspruchungen.

Für Schweißverbindungen, namentlich geschweißte Laschenverbindungen aus beiden Stählen ergaben sich bei vorzugsweise wechselnden Beanspruchungen wesentlich ungünstigere Verhältnisse. SCHAECHTERLE entwickelte daraufhin das in Abb. 1 c wiedergegebene Vorspannungsschaubild, nach dem für die zunächst bevorzugt verwendeten Verbindungsformen mit Flanken- und Stirnkehlnähten die — allerdings ungerechtfertigt hohe — Forderung einer 1,5fachen Sicherheit bei dynamischer Beanspruchung nicht restlos erfüllt ist. Besser waren die Ergebnisse bei stumpfgeschweißten Stößen. Bei St 37, der in Form des ungeschweißten Walzstabes eine Ursprungsfestigkeit von 20 bis 24 kg/mm² erreichte, ergaben sich bei der elektrischen Lichtbogenschweißung Werte zwischen 10 und 15 und bei der Gasschmelzschweißung solche von 10 bis 16 kg/mm². Die Feststellungen von G. BIERTT⁴⁾ dürften diese Ergebnisse im großen und ganzen bestätigen. Es wäre der Verwendung geschweißter Verbindungen im Stahlbau somit eine enge Grenze gesetzt, wenn die Befunde verallgemeinert werden könnten und insbesondere wenn keine Wege gefunden würden, um hier Verbesserungen zu erzielen.

Bei Betrachtung der bisherigen Ergebnisse von Dauerversuchen ist aber von vornherein auf den Widerspruch zwischen ihnen und den praktischen Erfahrungen hinzuweisen. Diese Erfahrungen mit geschweißten Stahlbauten sind selbst bei Vorliegen erheblicher Wechselbeanspruchungen durchweg günstiger, als auf Grund der Ergebnisse von Dauerversuchen auf der Pulsatormaschine zu erwarten ist. Solange daher nicht vergleichende Versuche an größeren Bauelementen mit entsprechenden Beanspruchungen wie in der

²⁾ Stahlbau 3 (1930), S. 277/81 u. 289/95; 4 (1931), S. 89/92; 5 (1932), S. 65/72; Z. V. D. I. 76 (1932), S. 438/42; Bautechn. 10 (1932), S. 590/93 u. 603/05.

³⁾ H. BUCHHOLTZ und E. H. SCHULZ: Mitt. Forsch.-Inst. Verein. Stahlw., Dortmund, 2 (1931), S. 97/112; Stahl u. Eisen 51 (1931), S. 957/61; Abh. d. Intern. Ver. f. Brückenbau u. Hochbau, Zürich 1932, Bd. 1, S. 447/66.

⁴⁾ Elektroschweißg. 4 (1933), S. 21/27.

Praxis durchgeführt sind, können die bisherigen Ergebnisse der Dauerver-
suche, wie bereits betont, lediglich als vergleichende Bewertung verschie-
dener Werkstoffe und Verbindungsformen, nie aber unmittelbar als Berech-
nungsgrundlage benutzt werden.

Ferner ist besonders auf den ebenfalls bereits gestreiften Gesichtspunkt
hinzuweisen, daß mit Zunahme des Anteils der statischen an der zusammen-
gesetzten Belastung die im statischen Versuch ermittelten Eigenschaften, vor
allem die Streckgrenze, wieder ausschlaggebender für die Beanspruchungs-
höhe werden.

Bei Auffassung der laboratoriumsmäßigen Untersuchungen über Dauer-
festigkeit als Vergleichsversuche ist bei Bewertung der Dauerfestigkeit von
Schweißungen auch das Verhalten der Nietung gegen die entsprechenden

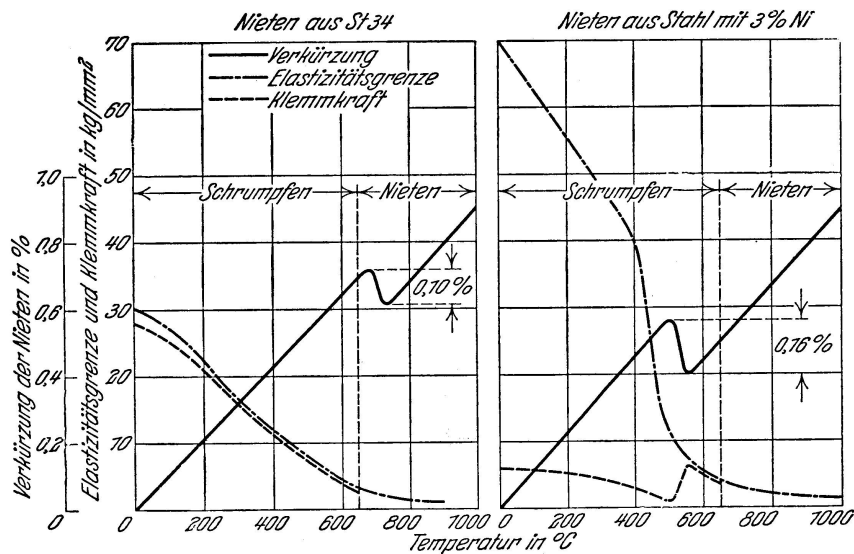


Fig. 2.

Schrumpfvorgang und Klemmkraft bei Nieten aus unlegiertem und legiertem Nietenstahl.

Retrait et serrage dans des rivetages en aciers non spéciaux et spéciaux pour rivets.

Shrinkage and clamping force with rivets of unalloyed and alloyed rivet-steel.

Wechselbeanspruchungen mit zu beachten. Für die Dauerfestigkeit einer
Nietverbindung ist außer der Art des Nietenstahles, der Güte der Werkstatt-
arbeit und der Nietung sehr maßgebend die Zahl der Nieten oder das Ver-
hältnis von Scher- und Zugspannung und die Höhe des Lochleibungsdruckes.
Entsprechende Versuche zeigten, daß die Dauerfestigkeit einer Nietverbin-
dung mit abnehmender Scherspannung in den Nieten und sinkendem Loch-
leibungsdruck steigt. Soll der Werkstoff entsprechend der Ursprungsfestig-
keit des gelochten Stabes möglichst voll ausgenutzt werden, so ist das Ver-
hältnis von Scherspannung zu Zugspannung bei Nietverbindungen aus St 37
kleiner als etwa 0,8, bei Nietverbindungen aus St 52 kleiner als 0,6 zu
wählen. Neben diesen baulichen Maßnahmen hat auf Grund neuerer Erkennt-
nisse — besonders von K. WELLINGER⁵⁾ — die Art des verwendeten Nieten-
stahles erheblichen Einfluß auf die Dauerfestigkeit einer Nietverbindung.
Die Nietverbindungen sollen die Kräfte in erster Linie durch Reibung über-
tragen. Erst nach Überschreiten des Reibungsschlusses werden die Niete

⁵⁾ Eigenspannung, Gefüge und Festigkeit warmgeschlagener Niete (Berlin: W. Ernst & Sohn, 1932).

auf Scherung und — je nach der Klemmlänge — auch auf Biegung beansprucht. Der Reibungsschluß ist unter sonst gleichen Bedingungen von der Klemmkraft der Niete abhängig. Zur Erhöhung des Reibungsschlusses einer Nietverbindung und damit ihrer Dauerfestigkeit ist vor allem die Klemmkraft der Niete zu steigern. Naturgemäß ist außer der Klemmkraft auch die Scherfestigkeit der Niete für die statische Tragfähigkeit der Verbindung maßgebend. Nach den in dieser Richtung im Forschungsinstitut der Vereinigte Stahlwerke A.-G. durchgeführten Arbeiten ist es nicht leicht, gute Klemmkraft mit hoher Scherfestigkeit zu vereinigen. Zum Verständnis der

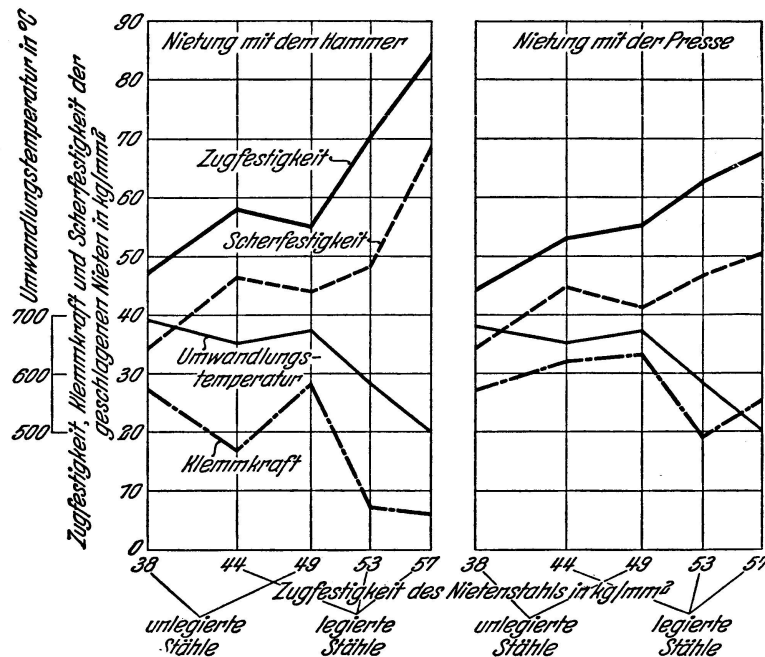


Fig. 3.

Festigkeitseigenschaften und Klemmkraft von Niete aus verschiedenen Stählen (Durchmesser der Niete 19 mm, Klemmlänge 96 mm, Nietdruck rd. 120 kg/mm²).

Caracteristiques de résistance et de serrage de rivets en différents aciers (diamètre des rivets 19 mm, longueur sur laquelle s'exerce le serrage d'un rivet 96 mm, pression de rivetage env. 120 kg/mm²).

Strength properties and clamping force of rivets of different kinds of steel (Diameter of the rivets 19 mm, clamped length 96 mm, riveting pressure 120 kg/mm²).

Zusammenhänge muß kurz auf die Entstehung der Klemmkraft in den Niete eingegangen werden.

Abb. 2 zeigt schematisch den Verlauf des Schrumpfens und der Änderung der Klemmkraft nach Beendigung des Nietvorganges links für einen unlegierten Niete Stahl St 34, rechts für einen Stahl mit 0,1 % C und 3 % Ni. Die Schrumpfung des Niete bei sinkender Temperatur wird durch die mit einer Verlängerung verbundene γ - α -Umwandlung des Stahles unterbrochen. Diese tritt bei St 34 noch während des Nietvorganges bei etwa 700°, bei Nickelstahl dagegen stärker und — was wesentlich ist — erst nach Beendigung des Nietvorganges bei wesentlich geringerer Temperatur, etwa bei 550° auf. Niete aus St 34 schrumpfen nach Beendigung des Nietvorganges um 0,7 %, solche aus Nickelstahl dagegen nach Beendigung der Umwandlung nur um 0,5 %. Nach Abschluß des Nietvorganges preßt bei St 34 der schrumpfende Niet mit einer der jeweiligen Elastizitätsgrenze entsprechenden Kraft die Bleche aufeinander. Mit sinkender Temperatur wächst die Klemmkraft

entsprechend der steigenden Elastizitätsgrenze, bis der Schrumpfungsvorgang beendet ist. Nieten aus St 34 weisen z. B. bei einer Elastizitätsgrenze von 30 kg/mm^2 eine Klemmkraft von 27 kg/mm^2 auf. Bei Nieten aus dem Stahl mit $3\% \text{ Ni}$ steigt nach Beendigung des Nietvorganges zunächst auch die Klemmkraft bis an die Elastizitätsgrenze; bei etwa 550° setzt aber die γ - α -Umwandlung mit starker Verlängerung ein, dementsprechend sinkt die Klemmkraft wieder erheblich ab. Nach Beendigung der γ - α -Umwandlung ist dann aber die zur Verfügung stehende Temperaturdifferenz zu gering, um noch eine nennenswerte Klemmkraft zu erzeugen. Trotz der sehr hohen Elastizitätsgrenze von 70 kg/mm^2 wiesen daher Nieten aus Nickelstahl nur eine Klemmkraft von etwa 6 kg/mm^2 auf. Nieten aus St 34 geben mithin einer Nietverbindung einen wesentlich höheren Gleitwiderstand als Nieten aus Nickelstahl. Diese Tatsache hat seinerzeit auch beim Bau der amerikanischen Nickelstahlbrücken große Schwierigkeiten ergeben; es war kaum möglich, Nieten aus Nickelstahl mit guter Klemmkraft herzustellen.

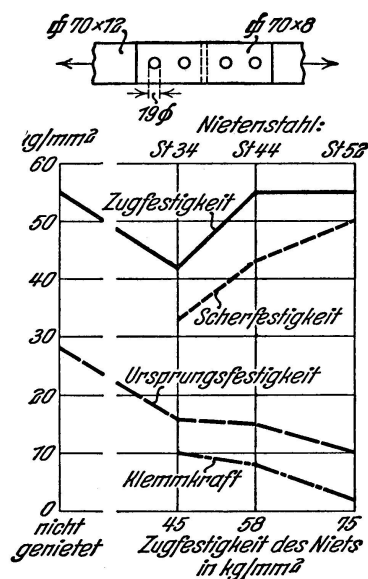


Fig. 4.

Dauerfestigkeit von Nietverbindungen aus St 52 (Hammernietung).

Résistance à la fatigue d'assemblages rivés en acier St 52 (au marteau).

Fatigue strength of riveted joints of St 52 (Hammer riveting).

Klemmkraftmessungen an verschiedenen Nietenstählen bei sonst gleichen Nietbedingungen zeigten entsprechende Ergebnisse. Abb. 3 gibt die Festigkeitseigenschaften, Klemmkraft⁶⁾ und Umwandlungstemperatur von zwei unlegierten und drei legierten Nietenstählen — geordnet nach steigender Zugfestigkeit — wieder, und zwar links bei Nietung mit dem Hammer, rechts mit der Presse. Zugfestigkeit und Scherfestigkeit im geschlagenen Niet steigen naturgemäß mit der Zugfestigkeit des Nietenstahles an, die Klemmkraft fällt dagegen bei den legierten Stählen entsprechend dem Sinken der Umwandlungsendtemperatur immer mehr ab. Nietung mit der Presse erhöht allgemein die Klemmkraft und gleicht die Unterschiede zwischen den einzelnen Stählen etwas aus, da bei Preßnietung der Schließdruck höher und gleichmäßiger ist als beim Hammer. Nietung mit der Presse ist daher

⁶⁾ Bestimmt nach C. BACH und R. BAUMANN: Z. VDI 56 (1912), S. 1890.

zur Erzielung einer hohen Klemmkraft vorzuziehen; jedoch läßt sich bei dieser Nietungsart im allgemeinen bei großen Klemmlängen das Nietloch weniger gut ausfüllen als durch Nietung mit dem Hammer.

Der Einfluß der Art des Nietenwerkstoffes oder der Klemmkräfte auf die Dauerzugfestigkeit von zweireihigen Nietverbindungen aus St 52 (Union-Baustahl) ist aus Abb. 4 zu erkennen. Die Verbindungen wurden hergestellt mit drei verschiedenen Nietenstählen: St 34, St 44 und St 52; die beiden letzten waren wie der Union-Baustahl mit Kupfer und Chrom legiert und hatten 46 bzw. 53 kg/mm² Zugfestigkeit. Die Zugfestigkeit der geschlagenen Nieten — aus der Brinellhärte errechnet — betrug 45, 58 und 75 kg/mm², ihre Scherfestigkeit stieg entsprechend der Ausgangsfestigkeit; die Dauerzugfestigkeit war jedoch bei den Verbindungen mit weicheren Nieten wesentlich größer als bei der mit den harten Nieten aus St 52. Parallel zur Kurve für die Dauerfestigkeit verläuft die der Klemmkraft. Bei hartem Nietenstahl ergibt sich also neben bzw. infolge der geringeren Klemmkraft eine verhältnismäßig geringe Dauerzugfestigkeit der Nietverbindung.

Die Frage der Dauerfestigkeit bei Nietverbindungen bedingt danach ganz besondere Überlegungen. Daß dies bei der noch neu entwickelten Schweißtechnik erhöht der Fall ist, kann nicht überraschen. Hier ist die Lage für den Konstrukteur im Großstahlbau, insbesondere im Brückenbau gekennzeichnet durch die Einführung eines verhältnismäßig neuen Baustahles sowie eines neuen Verbindungsverfahrens und durch die Forderung, nicht nur im alten Sinne „sicher und wirtschaftlich“, sondern auch „sicher gegen den Eintritt eines Dauerbruches“ zu konstruieren. Die Beanspruchungsverhältnisse liegen bei geschweißten Verbindungen grundsätzlich ähnlich wie bei Nietverbindungen. Während sich bei ruhender Beanspruchung in allen üblichen nach den Vorschriften geschweißten Verbindungsformen eine Zugfestigkeit praktisch gleich der des Grundwerkstoffes erreichen läßt, ist eine befriedigende Dauerfestigkeit nur zu erzielen, wenn einerseits bestimmte metallurgische Gesichtspunkte für den Werkstoff beachtet werden, andererseits aber der Konstrukteur sich von den bisher üblichen Verbindungsformen freimacht.

Versuche zur Erzielung einer hohen Dauerfestigkeit durch Abstimmung von Grundwerkstoff und Elektrode aufeinander sind im Forschungsinstitut der Vereinigte Stahlwerke A.-G. ausgeführt worden. Es wurden Schweißverbindungen aus unlegierten Stählen unter 50 kg/mm² Zugfestigkeit und niedriglegierten Chrom-Kupfer-, Mangan-Kupfer-, Silizium-Kupfer- und Silizium-Chrom-Kupfer-Stählen mit 0,11 bis 0,24 % C unter Verwendung verschiedener blanker und umhüllter Schweißdrähte untersucht. Die Schweißdrähte waren jeweils der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes angepaßt. Abb. 5 zeigt die Dauerbiegefestigkeit von stumpfgeschweißten Flachproben mit Walzhaut und Raupe in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes, links für reine Wechselbeanspruchung, rechts für pulsierende Beanspruchung zwischen 0 und einer oberen Grenzlast. Der Dauerbruch erfolgte dabei nahezu immer an der Grenzfläche von Schweiß und Übergangsgefüge (vgl. Abb. 6).

Die Dauerfestigkeit der nicht geschweißten Proben steigt mit der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes an. Die Wechselfestigkeit der geschweißten Proben zeigt keine eindeutige Abhängigkeit von der Zugfestigkeit, die Ursprungsfestigkeit hat sogar die Neigung, mit wachsender Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes zu fallen. Trotz der im allgemeinen größeren Dehnung der mit umhüllten Elektroden geschweißten Nähte war ein eindeutiger Unterschied in der Dauerfestigkeit der mit umhüllten oder blanken Elektroden

geschweißten Proben nicht festzustellen. Bei St 37 scheint die Dauerfestigkeit der umhüllt geschweißten Proben etwas höher, bei den härteren Stählen dagegen niedriger zu liegen als die der mit blanken Drähten geschweißten Proben. Diese Ergebnisse stimmen auch mit denen von GRAF überein.

Die Dauerfestigkeit der geschweißten Verbindungen wird aber sehr wesentlich durch die äußere Form der Schweißung, d. h. die Höhe des

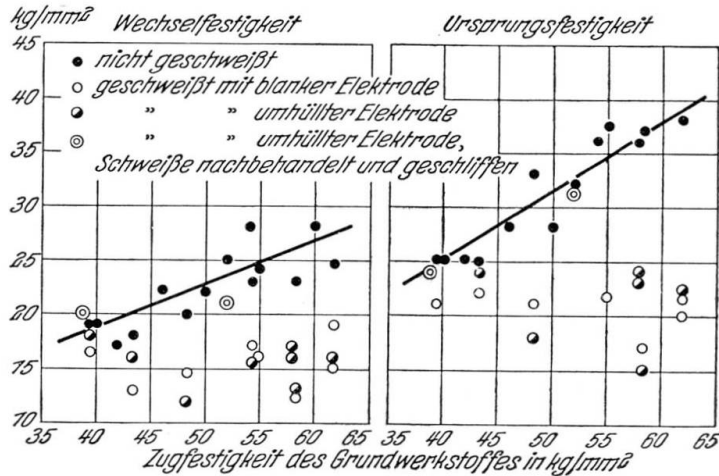


Fig. 5.

Dauerfestigkeit von Stumpfschweißungen (Proben mit Walzhaut und Schweißbraupe).
Résistance à la fatigue d'assemblages soudés en bout (échantillons ayant conservé la structure superficielle du laminage et dont les cordons n'ont pas été usinés).

Fatigue strength of butt welds (Tests with mill scale and weld bead).

Schweißwulstes und den Übergang zum Grundwerkstoff beeinflusst. Um diesen Einfluß von dem der Werkstoffeigenschaften des Übergangsgefüges zu trennen, wurde die Dauerfestigkeit an nichtgeschweißten Proben aus unlegiertem Stahl mit 48 kg/mm² Zugfestigkeit und St 52 ermittelt, die durch

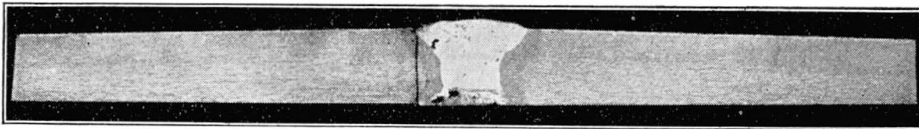


Fig. 6.

Beispiel für den Verlauf des Dauerbruches in den Schweißverbindungen.
Exemple d'évolution de la rupture par fatigue sur des assemblages soudés.
Example for the run of fatigue rupture in welded joints.

Herausarbeiten aus dem Vollen und nachträgliches Glühen einen der Schweißnaht entsprechenden Wulst und eine der Schweißnaht ähnliche Oberfläche erhalten hatten. Die Biege-wechselfestigkeit dieser Proben mit 2 mm hohem Wulst wurde bei dem unlegierten Stahl zu 15, bei St 52 zu 17 kg/mm² ermittelt. Die Ursprungsfestigkeit war bei den Proben aus St 52 28 kg/mm². Die Dauerfestigkeit des glatten Stabes wird also lediglich durch die Kerbwirkung des Wulstes um etwa 30 % herabgesetzt. Diese Werte stellen an sich die oberen Grenzwerte für die Dauerfestigkeit dar, die bei Schweißverbindungen — gleiche Oberflächenbeschaffenheit vorausgesetzt — überhaupt erreicht werden können.

Besteht die Möglichkeit, die Schweiße nachzubehandeln, d. h. sie — wie bei der Kesselschweißung — anschließend zu glühen oder sogar zu verschmieden und die Raupe abzuarbeiten, so lassen sich Werte für Wechselfestigkeit und Ursprungsfestigkeit erzielen, die denen des nichtgeschweißten Grundwerkstoffes — sowohl bei St 37 als auch St 52 — allerdings mit Walzhaut — entsprechen. Für den Brücken- und Hochbau kommt allerdings eine derartige Nachbehandlung der Schweißnaht nicht in Frage.

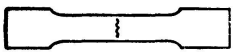
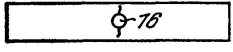

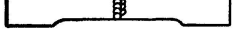
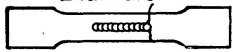





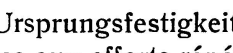
Großen Einfluß auf die Dauerfestigkeit der geschweißten Proben hat die Härbarkeit des Grundwerkstoffes, d. h. die chemische Zusammensetzung des Stahles, besonders sein Kohlenstoffgehalt. Schweißverbindungen aus unlegiertem Stahl mit 0,25 % C haben im allgemeinen eine geringere Dauerfestigkeit als solche mit 0,10 bis 0,15 % C. Ebenso sind Schweißverbindungen aus St 52 mit 0,24 % C solchen mit 0,16 % C, aber gleicher Festigkeit, um 20 bis 30 % unterlegen. Nach diesen Erfahrungen sollte in Anlehnung an die schon geltenden Richtlinien in dem für Schweißkonstruktionen vorgesehenen St 52 der Kohlenstoffgehalt möglichst unter 0,18 %, der Mangan-gehalt unter 1,2 % gehalten werden. Die weniger stark härtenden Elemente wie Silizium und Kupfer wirken dagegen nicht ungünstig.

Danach sind dem Metallurgen die Grenzen, innerhalb welcher er die Dauerfestigkeit geschweißter Verbindungen beeinflussen kann, verhältnismäßig eng gesetzt. Für den Konstrukteur ergibt sich daher die Aufgabe, durch eine schweißgerechte Gestaltung zu einer sicheren und doch wirtschaftlichen Ausnutzung des Grundwerkstoffes zu gelangen. Planmäßige Dauerprüfungen von verschieden geformten geschweißten Proben können hierfür Unterlagen geben.

Von möglichst einfachen Verhältnissen ausgehend, wurden zunächst eine Anzahl von Dauerzugversuchen durchgeführt, bei denen nicht eine Verbindungsschweißung vorgenommen, sondern nur eine Schweißraupe auf einen Flachstab aufgelegt wurde. Es handelte sich dabei um Grundformen, die wie der gelochte Stab in jeder Nietverbindung bei allen Schweißungen anzutreffen sind, ohne die Aufgabe eines Verbindungselementes zu erfüllen. Als Stahl wurde vorzugsweise St 52, und zwar Union-Baustahl, benutzt.

Querbohrungen, aufgelegte Schweißraupen oder Laschen stören mehr oder weniger den Kraftlinienfluß, verursachen örtliche Spannungshäufungen und schaffen damit Ausgangsstellen für den Dauerbruch. Wie die Ergebnisse in Zahlentafel 1 erkennen lassen, wirkte eine einseitig aufgelegte Querraupe ähnlich auf die Dauerfestigkeit des glatten Stabes wie eine Querbohrung — es wurden etwa 75 % der ursprünglichen Schwellfestigkeit ermittelt. Noch ungünstiger wirkte eine Längsraupe oder eine doppelseitig aufgelegte Querraupe. Die Ursprungsfestigkeit betrug mit 11 bis 12 kg/mm² nur etwa die Hälfte derjenigen des gelochten Stabes. Doppelseitig aufgelegte Querversteifungen oder einseitig aufgeschweißte Laschen setzten ebenfalls die Ursprungsfestigkeit des glatten Stabes auf 9 bis 10 kg/mm², d. h. auf etwa ein Drittel des ursprünglichen Wertes, herab. Diese erhebliche Wirkung ist im wesentlichen in der Spannungserhöhung durch die Unstetigkeit im Stabquerschnitt, weniger in den Schrumpfspannungen zu suchen. Aufgenietete Laschen wirken nicht im gleichen Maße als Unstetigkeit, da sie im Gegensatz zu aufgeschweißten Laschen mit dem Stab kein starres Ganzes bilden. Die Wirkungen der durch die Schweißung verursachten Querschnittsunstetigkeiten sind jedenfalls erheblich und müssen bei der Herstellung dynamisch hochbeanspruchter Bauteile unbedingt berücksichtigt werden. In Übereinstimmung mit den Erscheinungen an unterbrochen geschweißten, dynamisch bean-

spruchten Nähten geht der Bruch vom Endkrater der Schweißbraupe aus. Durch nachträgliches Abarbeiten des Endkraters oder des gefährlichen Einbrandgrabens läßt sich in den meisten Fällen eine Steigerung der Ursprungsfestigkeit auf etwa 15 kg/mm^2 erzielen. Die nachträgliche Bearbeitung wird wegen der entstehenden Kosten aber nur dort angewandt werden können, wo erhebliche Lastunterschiede in großer Zahl auftreten können.

Nr.	Stabformen	Ursprungsfestigkeit	
		kg/mm ²	%
1		glatter Stab	28 100
2		gelochter Stab	22 78
3		„ „ mit Niet	18 64
4		Stab mit Querraupe, einseitig	21 75
5		„ „ „ doppelseitig	11 39
6		Stab mit Längsraupe, einseitig	12 43
7		„ „ „ doppelseitig	11 39
8		Querversteifung, einseitig	18 64
9		„ doppelseitig	10 36
10		Stab mit einseitig aufgeschweißter Lasche	9—10 34
11		„ „ „ „ „	~ 9 32

— Lage des Bruches.

Zahlentafel 1.

Ursprungsfestigkeit verschieden geformter Proben aus St 52 mit Walzhaut.

Résistance aux efforts répétés s'annulant, mais non alternés pour différentes formes d'éprouvettes en acier St 52 ayant conservé la structure superficielle du laminage.







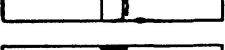
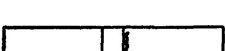


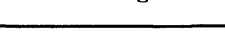
Original strength of variously shaped test pieces of St 52 with mill scale.

Muß die Kehlnaht außerdem noch die Aufgabe der Kraftübertragung übernehmen, so werden die Spannungsverhältnisse außerordentlich verwickelt⁷⁾. Zahlentafel 2 zeigt die Ergebnisse von Dauerzugversuchen an einer Reihe verschiedener Verbindungsformen. Eine doppelreihige Nietverbindung, die zum Vergleich mit herangezogen wurde, ergab im Mittel eine Ursprungsfestigkeit von 15 kg/mm^2 . Die in Anlehnung an die genietete Verbindung geschaffene Laschenschweißung, von der im Stahlbau häufig Gebrauch gemacht wird, wies bei verschiedener Gestaltung ohne Unterschied nur etwa 7 kg/mm^2 Ursprungsfestigkeit, d. h. nur 25 % der des glatten Stabes auf.

Das Verhältnis von Spannung in der Schweißnaht zu derjenigen in der Lasche wurde teils entsprechend den deutschen Industrienormen (Din 4100) zu 0,5, teils höher zu etwa 0,8 gewählt. Obgleich in diesen Fällen die

⁷⁾ R. G. OLSSON: Bauing. 13 (1932), S. 294/97; S. C. HOLLISTER und A. S. GELMAN: J. Amer. Weld. Soc. 11 (1932), Nr. 10, S. 24/31.

Schweißnaht gegenüber ruhender Beanspruchung zu gering bemessen war, brachen die Verbindungen im Dauerversuch in keinem Fall durch Abscheren der Schweißnaht, sondern immer im gefährlichen Querschnitt der Lasche oder aber auch gleichzeitig an der Stirnnaht. Die Ursachen für die geringe Dauerfestigkeit von Laschenverbindungen sind weniger in der durchgreifenden Änderung des Grundwerkstoffes durch den Schweißvorgang, als in der ungünstigen räumlichen Spannungsverteilung zu suchen. Während bei der

Nr.	Stabverbindungsformen	Ursprungsfestigkeit			
		kg/mm ²	%		
1		Doppellaschenverbindungen	13—17 15	100	
2			~ 7	47	
3			~ 7	47	
4			~ 7	47	
5			~ 7	47	
6		Kreuz-Prob	6	40	
7		Stumpfverbindungen	X-Naht, blank	12	80
8			„ umhüllt	14	93
9			V-Naht, blank	14	93
10			„ umhüllt	13	87
11			„ 45°, blank	15	100

— Lage des Bruches.

Zahlentafel 2.

Ursprungsfestigkeit verschiedener Verbindungen aus St 52 mit Walzhaut.

Résistance aux efforts répétés s'annulant, mais non alternés pour différents assemblages en acier St 52 ayant conservé la structure superficielle du laminage.

Original strength of various joints of St 52 with mill scale.

genieteten Laschenverbindung die Kräfte infolge der Klemmkraft der Niete — jedenfalls zunächst — durch Reibung ziemlich gleichmäßig aus dem gezogenen zum gestoßenen Stab übertragen werden, erfolgt der Spannungsfluß bei einer geschweißten Laschenverbindung unter mehrmaligem Richtungswechsel und gleichzeitiger starker Verengung des Durchgangsquerschnitts. Hierdurch nimmt die wirkliche Spannung im gefährlichen Querschnitt, und zwar an den durch die Schweißung veränderten Kanten, etwa den dreifachen Wert der rechnerischen Durchschnittsspannung an. Bei statischer Beanspruchung gleichen sich derartige Spannungsspitzen durch kleine örtliche Formänderungen aus, ohne den Bruch der gesamten Verbindung herbeizuführen. Bei schwingender Beanspruchung wirkt jedoch der erste durch Überbeanspruchung herbeigeführte Haarriß als Kerb, der den endgültigen

tigen Dauerbruch herbeiführt; die statisch durchaus vollwertige geschweißte Laschenverbindung versagt also bei schwingender Beanspruchung. Durch noch weitere Anpassung der Form an den Spannungsverlauf lassen sich keine wesentlichen Verbesserungen erzielen. So zeigten z. B. Laschenverbindungen durch nachträgliches Abarbeiten des Nahtbeginns oder durch Kehlen der Lasche eine Erhöhung der Ursprungsfestigkeit bis auf etwa 10 kg/mm², die Ursprungsfestigkeit einer Nietverbindung wird aber in keinem Fall erreicht. Auch die als Nr. 6 aufgeführte Kreuzprobe läßt sich nach Versuchen von O. GRAF durch Anschärfen der Zugstäbe bzw. des Stehbleches und Verringern des Wurzelpaltes erheblich verbessern.

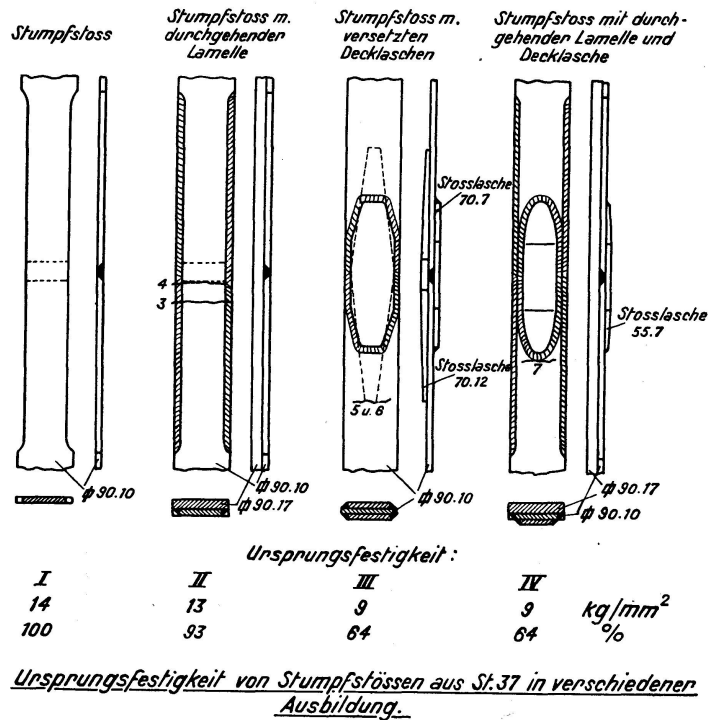


Fig. 7.

Ursprungsfestigkeit von Stumpfstoßen aus St 37 in verschiedener Ausbildung.

Résistance aux efforts répétés s'annulant, mais non alternés, dans des assemblages soudés en bout en acier St 37 de différentes formes.

Original strength of various designs of butt joints of St 37.

Die axial beanspruchten Stumpfschweißverbindungen (Nr. 7 bis 11 der Zahlentafel 2) zeigten die doppelte Ursprungsfestigkeit wie die Laschenverbindungen und damit etwa 50 % der Ursprungsfestigkeit des glatten Stabes. Ihre Werte reichen praktisch an die einer zweireihigen Nietverbindung heran. Inzwischen sind auch bei Stumpfverbindungen noch höhere Werte der Ursprungsfestigkeit erzielt worden. Bei normalen Werkstattschweißungen wurden z. B. für den Stumpfstoß mit V-Naht bei Verwendung einer umhüllten Elektrode regelmäßig 17 bis 18 kg/mm² ermittelt; damit erreicht die Stumpfverbindung eine höhere Dauerfestigkeit als die zweireihige Nietverbindung.

Es besteht oft die Notwendigkeit, Stumpfnähte durch aufgelegte Decklaschen zu sichern oder Stumpfnähte mit durchgehenden Lamellen zu vereinigen. Dauerzugversuche an Stumpfverbindungen aus St 37 zeigen, daß die Ursprungsfestigkeit durch kurze ausgeschärfte Decklaschen (Abb. 7,

Form III und IV) auf etwa 64 % des Ausgangswertes, also erheblich herabgesetzt wird. Die Stirnnaht bildet eine gefährliche Störungsstelle im Kraftlinienfluß. Durchgehend mit Längs-Kehlnähten angeschlossene Lamellen gemäß Ausbildungsform II in Abb. 7 ermöglichen dagegen praktisch die volle Ausnutzung des glatten Stumpfstoßes.

Nach dem eingangs Ausgeführten mußten diese Untersuchungen ergänzt werden durch solche mit höheren ruhenden Grundspannungen. Tritt eine solche zu der wechselnden Zugbeanspruchung hinzu, so nimmt bei Schweißungen die Schwingungsweite, innerhalb der sie gefahrlos beansprucht werden können, mit wachsender Grundspannung nur unwesentlich ab, die obere Grenzspannung dagegen erheblich zu. Abb. 8 zeigt die obere Grenze der Tragfähigkeit verschiedener Verbindungen aus St 52 in Abhängigkeit von der unteren Grenzspannung. Bei der Grenzspannung 0 kann z. B. der un-

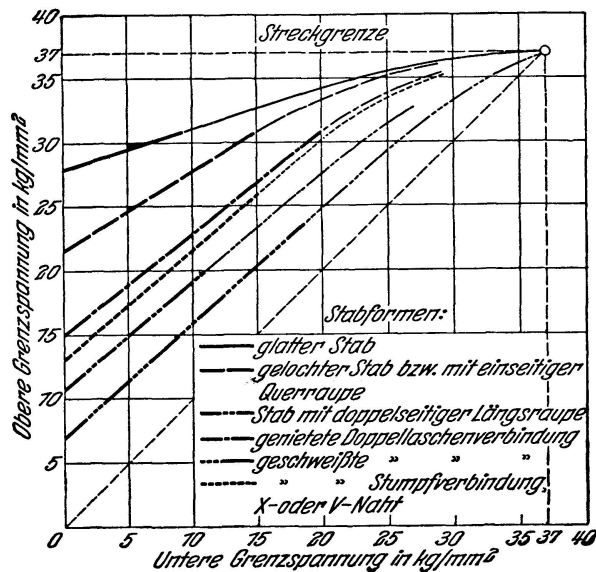


Fig. 8.

Dauerzugfestigkeit von St 52.

Résistance à la fatigue par traction de l'acier St 52.

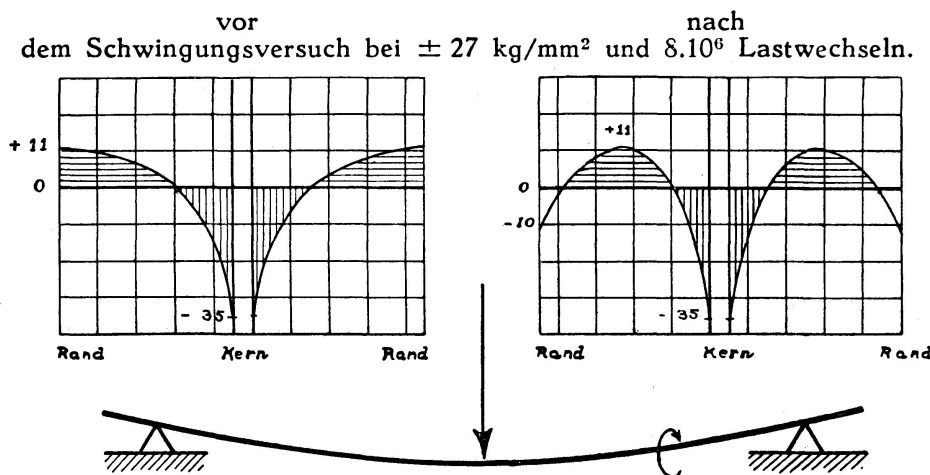
Fatigue tensile strength of St 52.

verletzte Walzstab zwischen 0 und 28 kg/mm² bis zu zwei Millionen Mal belastet werden, ohne daß ein Bruch eintritt. Bei einer unteren Grenzspannung von 10 kg/mm² tritt ein Dauerbruch erst ein, wenn die obere Spannung 32 kg/mm² überschreitet. Mit wachsender ruhender Vorspannung wird also die Dauerzugfestigkeit ganz erheblich erhöht, sodaß Verbindungsformen, die bei geringerer Vorspannung eine wenig befriedigende Dauerfestigkeit besitzen, bei höherer Vorspannung eine durchaus genügende Tragfähigkeit aufweisen. Für die geschweißte Laschenverbindung wird z. B. die Dauerfestigkeit bei Änderung der unteren Grenzspannung von 0 auf 15 kg/mm² von 7 auf 20 kg/mm² erhöht. Das gilt auch für die übrigen Stähle und Verbindungsformen.

Es sei an dieser Stelle noch auf die Frage des Einflusses der Schrumpfspannungen in Schweißverbindungen eingegangen. Wichtig für den Konstrukteur sollte weniger die Frage nach ihrer absoluten Größe als nach ihrer Bedeutung für die Tragfähigkeit des Bauwerkes sein. Nachdem durch vergleichende Spannungsmessungen von DOERNEN⁸⁾ der Nachweis geliefert wurde, daß in ge-

⁸⁾ „Der Stahlbau“, Beilage zur Zeitschrift „Die Bautechnik“ 6 (1933), S. 22/24.

schweißten I-Trägern die Spannungen wesentlich niedriger liegen können als in gewalzten Trägern, sollte es berechtigt sein, von einer Berücksichtigung der Schweißspannungen bei der konstruktiven Bemessung abzusehen. Darüber hinaus geben die Ergebnisse der Dauerversuche bei höherer ruhender Grundspannung mittelbar Antwort auf die Frage, ob und wie weit sich die in jeder Verbindung vorhandenen inneren Spannungen auf die Tragfähigkeit ungünstig auswirken. Der verhältnismäßig geringe Einfluß der ruhenden, durch die Maschine ausgeübten Grundspannung auf die ertragbare Schwingungswerte ist, wie aus Abb. 9 hervorgeht, mittelbar als Beweis dafür anzusehen, daß innere Spannungen die Dauerfestigkeit praktisch nicht bedeutsam beeinflussen. Sofern ein zäher Werkstoff vorliegt, werden offenbar innere Spannungen durch die Dauerbeanspruchung abgebaut, ohne daß vorzeitig



Abbau von Eigenspannungen durch Biegeschwingsbeanspruchung.

Fig. 9.

Abbau von Eigenspannungen durch Biegeschwingsbeanspruchung.

Réduction des contraintes internes sous l'influence des contraintes répétées de flexion.

Reduction of initial stressing by bending oscillating stressing.

Risse auftreten. Versuche, die unmittelbar auf diese Frage Antwort geben können, sind eingeleitet. Daß tatsächlich bei Schwingungsbeanspruchung ein Abbau der Spannungsspitzen ohne Schädigung der Schwingungsfestigkeit möglich ist, geht aus den Ergebnissen von Spannungsmessungen an 27 mm dicken Wellen aus einem Kohlenstoffstahl mit 0,34 % C und etwa 65 kg/mm² Zugfestigkeit hervor. Die Wellen wiesen durch Abschreckung der Innenbohrung erzeugte Eigenspannungen von 11 kg/mm² Zug in den Randzonen und 35 kg/mm² Druck an der Bohrung auf. Die Wellen wurden in diesem Eigenspannungszustand mit einer Wechselbiegebeanspruchung von $\pm 27 \text{ kg/mm}^2$ 8 Millionen mal beansprucht und anschließend der Spannungsmessung unterworfen. Die in den Randzonen vorhandenen Zugspannungen waren durch die Wechselbiegebeanspruchung nicht nur vollständig beseitigt, sondern es waren sogar günstig wirkende Druckspannungen in Höhe von 10 kg/mm² entstanden; der Werkstoff hatte sich also gewissermaßen selbst geholfen, ohne daß eine Schädigung der bei 27 kg/mm² liegenden Schwingungsfestigkeit eingetreten war. Wie im einzelnen der Spannungsabbau in Schweißverbindungen bei Dauerbeanspruchung vor sich geht, wird z. Zt. untersucht.

Nach Durchführung dieser Versuche an Grundformen wurden im Forschungsinstitut in Anlehnung an Untersuchungen von R. HOCHHEIM⁹⁾ zahlreiche größere genietete und geschweißte I-Blechträger aus St 37 und St 52 nach Abb. 10 auf der Pulsatormaschine untersucht. Mit Rücksicht auf die Knickgefahr des Steges wurden die Träger durch Versteifungsbleche ausgesteift. Wie die Ergebnisse in Zahlentafel 3 erkennen lassen, wirkt sich bei genieteten I-Trägern der Einfluß der höheren Schwingungszahl ungünstig auf die Ursprungsfestigkeit aus. Unter den gewählten Versuchsbedingungen kann für den genieteten Träger aus St 52 eine Ursprungsfestigkeit von etwa 14 bis 16 kg/mm² angenommen werden, während nach neueren Versuchen

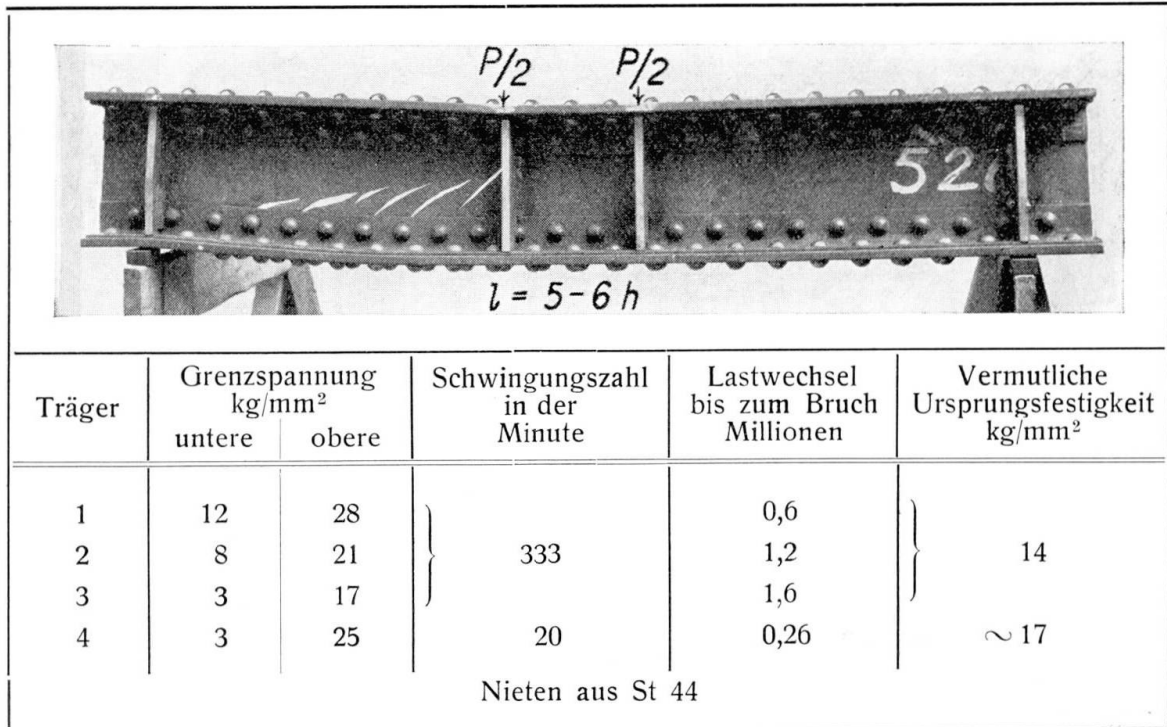


Fig. 10 und Zahlentafel 3.

Dauerfestigkeit genieteter Blechträger aus Union-Baustahl.

Résistance à la fatigue de poutres en tôle en acier de construction Union.

Fatigue strength of plate girders of Union structural steel.

genietete Träger aus St 37 mit Nieten aus St 34 nur eine Ursprungsfestigkeit von etwa 12 kg/mm² aufweisen.

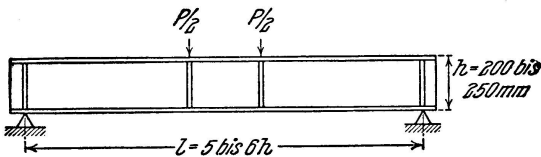


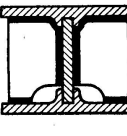
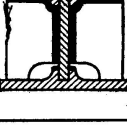
Die geschweißten Träger gemäß Ausbildungsform 2 und 3 in Zahlentafel 4 wurden aus Universaleisen hergestellt, während bei Trägerform 4 und 5 ein gewalztes Nasenprofil¹⁰⁾ zur Verwendung kam. Bei Trägerform 3 bis 5 wurde zur Vermeidung der Häufung von Schweißnähten das Stehblech am Zuggurt ausgespart, bei den Trägern nach 5 außerdem auf die Quernähte an den mittleren Aussteifungsblechen des Zuggurtes verzichtet. Als Schweißdraht dienten umhüllte Elektroden. Ermittelt wurden im Dauerversuch auf der Pulsatormaschine bei 333 oder 500 Lastwechseln je Min. und einer Gesamtlastwechselzahl bis zum Bruch oder von etwa zwei Millionen die Ursprungsfestigkeit sowie die Dauerfestigkeit bei höherer Vorspannung.

⁹⁾ Mitt. Forsch.-Anst. Gutehoffnungshütte Konzern 1 (1932), S. 225/27.

¹⁰⁾ Ausführung durch D. R. P. geschützt.

Die Spannung wurde aus der statischen Biegegleichung für den höchstbeanspruchten Teil des Zuggurtes errechnet.

Die Dauerbrüche nahmen bei den Trägern nach Form 2 und 3 teils von der Häufungsstelle der Schweißnähte an der Aussteifung des Zuggurtes, teils etwa 150 mm von den mittleren Aussteifungsblechen entfernt von der Längsnaht im Steg ihren Ausgang, was darauf hinweist, daß abgesehen von Störungen im Spannungsfluß durch die Aussteifungen die Schubspannung

Träger	Ausbildung	Ursprungsfestigkeit kg/mm ²	Dauerfestigkeit bei höherer Vorspannung		
			untere Grenzlast	kg/mm ² obere Grenzlast	Spannungsbereich
1		~ 16	8	21	13
2		~ 16	6	21	15
3		~ 17	7	22	15
4		19—20	11	27	16
5		23—24	18	35	17

Zahlentafel 4.

gen im Steg maßgebend am Zerrüttungsvorgang beteiligt waren. Die Nasenprofilträger mit der Aussteifungsform 4 gingen von den Quernähten der mittleren Aussteifungsbleche am Zuggurt aus zu Bruch, während die Träger nach Form 5, also ohne die gefährliche Quernaht, infolge Zusammenwirkens von Normal- und Schubspannungen vom Steg aus brachen. Die für die Ursprungsfestigkeit in Zahlentafel 4 mitgeteilten Werte von etwa 17 kg/mm² für Trägerform 3 und 19 bis 20 kg/mm² für Trägerform 4 sind mit Rücksicht auf die Ergebnisse an geschweißten Blechträgern aus St 37 als günstig zu bezeichnen. Der Nasenprofilträger mit der Aussteifungsform 4 ist einem

genieteten Träger aus St 52 gleicher statischer Beanspruchungsfähigkeit nach den bisherigen Feststellungen mindestens gleichwertig. Werden wie bei Trägerform 5 die Quernähte am Zuggurt vermieden, so wird eine Ursprungsfestigkeit von 23 bis 24 kg/mm² erzielt. Bei höherer Vorspannung ergaben sich bei Nasenprofilträgern Werte für die obere Grenzspannung von 27 bzw. 35 kg/mm². Die Dauerfestigkeit der Nasenprofilträger liegt also bei Beanspruchungen, wie sie beispielsweise in Straßenbrücken vorliegen dürften, weit oberhalb der statisch zulässigen Spannung und gibt damit ein genügendes Maß an zusätzlicher Sicherheit. Gegenüber dem genieteten Träger wiesen die geschweißten I-Träger bei Verwendung des Nasenprofils eine um rund 40 % höhere Dauerfestigkeit auf und stellen danach auch bei Schwingungsbeanspruchungen ein vollwertiges und sogar ein hochwertiges Bauelement dar.

Für die Übertragung dieser Ergebnisse auf die praktischen Verhältnisse ist außerdem zu berücksichtigen, daß das benutzte Verhältnis von Trägerhöhe zu Auflageabstand von 1:5 bis 6 einen ungewöhnlich ungünstigen Fall darstellt; bei größerer Auflageentfernung sind allgemein höhere Werte für die Dauerfestigkeit zu erwarten.

Wenn auch die hohe Dauerfestigkeit des glatten durchlaufenden geschweißten Nasenprofilträgers durch Anschlüsse z. B. am Querträger oder aufgelegte Gurtlamellen herabgesetzt wird, so ist doch festzustellen, daß auch heute schon für alle normalen Beanspruchungen im Großstahlbau die geschweißte Konstruktion die gleiche Sicherheit besitzt wie die genietete Verbindung. Bei dynamisch hoch beanspruchten Bauwerken könnte man zunächst zu einer kombinierten Bauweise übergehen, bei der alle durchlaufenden Vollwandkonstruktionen durch Schweißung, dagegen hochbeanspruchte Stabanschlüsse sowie auf der Baustelle herzustellende Anschlüsse durch Nietung hergestellt werden.

Die Ergebnisse der bisher durchgeführten Dauerversuche lassen weiter mit Bestimmtheit erwarten, daß es der planmäßigen Zusammenarbeit von Metallurgen, Konstrukteuren und Werkstoffprüfern gelingen wird, wirtschaftliche Konstruktionsformen in geschweißter Ausführung mit genügender Dauerfestigkeit auch für den Fall überwiegender Schwingungsbeanspruchung zu entwickeln.

Die in dieser Richtung bereits vorliegenden Erfahrungen des Kran- und Baggerbaues bestätigen die Ergebnisse der Dauerbiegeversuche an geschweißten Trägern in überzeugender Weise. An zahlreichen Stellen, an denen bisher genietete Konstruktionen infolge von Lockerwerden der Niete versagten, haben sich geschweißte Ausführungen trotz erheblicher Stoß- und Schwingungsbeanspruchungen seit 3 Jahren hervorragend bewährt. Überzeugend sind auch die günstigen Erfahrungen mit einer ganzen Reihe geschweißter Brücken und Hochbauten aus Union-Baustahl.

Zusammenfassung.

Wenn auch an hochbeanspruchten Eisenbahnbrücken unter bestimmten ungünstigen Verhältnissen Schwingungsbeanspruchungen zum Dauerbruch führen können, so ist andererseits doch festzustellen, daß die laboratoriums-mäßigen Schwingungsversuche lediglich eine Bewertung verschiedener Werkstoffe und Verbindungsformen ermöglichen, nicht aber unmittelbar als Berechnungsgrundlage benutzt werden können. In der Praxis werden die Beanspruchungen sowohl hinsichtlich des Lastunterschiedes wie der Häufigkeit

der gefährlichen Spannungswechsel im allgemeinen milder sein als bei der Durchführung der Dauerversuche im Laboratorium.

Untersuchungen an Nietverbindungen ließen erkennen, daß die Dauerfestigkeit u. a. von der Klemmkraft abhängig ist und daß bei Nietverbindungen aus St 52 sowohl Klemmkraft als auch Dauerfestigkeit durch die Verwendung weicherer Nietenstähle günstig beeinflußt werden, während höherlegierte Nietenstähle, besonders solche mit höherem Nickel- oder Mangengehalt, geringe Klemmkraft und niedrige Dauerfestigkeit der Verbindung ergeben.

Bei geschweißten Verbindungen tritt der Einfluß von Grundwerkstoff und Elektrode hinter der Wirkung des durch die Form der Verbindung bedingten Spannungsverlaufs zurück. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen an St 37 zeigten sich auch bei St 52 stumpfgeschweißte Stöße den Laschenverbindungen mit Flanken- oder Stirnkehlnaht weit überlegen; danach sind geschweißte Stumpfstöße zweireihigen Nietverbindungen auch bei hohen Wechselbeanspruchungen als praktisch gleichwertig anzusehen. Auf die große Bedeutung der neben der Wechselbeanspruchung vorhandenen ruhenden Beanspruchung und die unter solchen Bedingungen sich ergebenden günstigen Verhältnisse bei St 52 wird hingewiesen. Dauerversuche an größeren geschweißten I-Blechträgern aus St 52 zeigen deutlich, wie durch entsprechende Gestaltung solcher Träger ihre Dauerfestigkeit weitgehend gesteigert werden kann, so daß sie auch bei Schwingungsbeanspruchung ein hochwertiges Bauelement darstellen. Aus den Dauerversuchen kann ferner der mittelbare Schluß gezogen werden, daß auch die Schrumpfspannungen in geschweißten Konstruktionen keinen Anlaß zu Befürchtungen bei Dauerbeanspruchung geben.

Als Gesamtergebnis ist der Schluß zu ziehen, daß die Anwendung der Schweißung auch in Bauwerken aus St 52 bei nicht allzu hoch gesteigerter dynamischer Beanspruchung durchaus verantwortet werden kann. Für Konstruktionen mit ungünstigem Kraftlinienfluß und hoher schwingender Beanspruchung hat sich ein etwas weicherer Stahl St 45 mit besonders günstigen Schweißigenschaften als geeignet erwiesen. Weiter ist mit Sicherheit zu erwarten, daß es der engen Zusammenarbeit von Metallurgen, Konstrukteur und Werkstoffprüfer gelingen wird, auch für dynamisch hochbeanspruchte Anschlüsse sichere und wirtschaftliche Lösungen zu finden.

Résumé.

Dans des conditions défavorables déterminées, les efforts de nature oscillatoire auxquels se trouvent soumis les ponts de chemin de fer travaillant à des taux de contrainte élevées peuvent conduire à des ruptures par fatigue. Par contre, on a constaté que les essais d'oscillation effectués dans des conditions analogues à celles du laboratoire ne pouvaient pas servir directement de base au calcul des ouvrages, mais qu'il fallait se contenter d'y voir un moyen d'étudier la valeur des différents matériaux et dispositions d'assemblage. Dans la pratique, les contraintes sont en général moins sévères qu'au cours des essais de fatigue de laboratoire tant en ce qui concerne les écarts entre les charges que la fréquence des répétitions dangereuses des efforts.

Les essais qui ont été effectués sur des assemblages rivés ont montré que la résistance à la fatigue dépend en particulier du serrage des rivets et que dans les assemblages rivés en acier St 52, ce serrage, de même que la résistance à la fatigue, sont favorablement influencés par l'emploi, pour

la constitution des rivets, d'aciers plus doux; les aciers spéciaux, en particulier les aciers à rivets à haute teneur en nickel ou en manganèse conduisent, pour les assemblages, à un serrage plus faible et à une résistance à la fatigue inférieure.

Dans les assemblages soudés, l'influence exercée par le métal de base et celui de l'électrode est en quelque sorte masquée par celle qu'exerce la forme de l'assemblage sur la répartition des contraintes. En concordance avec les résultats obtenus avec l'acier St 37, on a constaté que même avec l'acier St 52, les joints soudés en bout sont largement supérieurs aux assemblages à recouvrement avec cordons de soudure latéraux ou frontaux; on peut par suite considérer les assemblages soudés en bout comme pratiquement équivalents aux assemblages rivés à deux rangs même lorsqu'ils sont soumis à des contraintes alternées élevées. Mention particulière est faite de la grande importance que présentent les contraintes permanentes, auxquelles se superposent les contraintes dues aux charges répétées, ainsi que des conditions favorables qui résultent de l'emploi de l'acier St 52 en pareil cas. Des essais de fatigue effectués sur des poutres en tôle en I soudées de grandes dimensions, en acier St 52, ont montré très nettement dans quelle large mesure il est possible d'augmenter la résistance de ces pièces à la fatigue en leur donnant des formes appropriées et comment on peut arriver à obtenir ainsi des éléments de construction de grande valeur, même du point de vue des efforts répétés. Ces essais ont en outre conduit à la conclusion indirecte que les contraintes de retrait ne doivent nullement donner matière à des craintes en ce qui concerne les contraintes de fatigue dans les ouvrages soudés.

La conclusion générale est que l'on peut parfaitement recourir à l'emploi de la soudure, même dans les ouvrages en acier St 52, lorsqu'ils ne doivent pas être soumis à des efforts d'ordre dynamiques par trop considérables. Dans les ouvrages dans lesquels les lignes de force accusent une allure défavorable ou qui sont soumis à des efforts de nature oscillatoire très accusés, on a constaté qu'il était préférable de recourir à un acier un peu plus doux, tel que l'acier St 45 qui donne à la soudure des résultats meilleurs. Il faut enfin faire confiance aux Métallurgistes, aux Constructeurs et à ceux qui se chargent des Essais des Matériaux; leur collaboration étroite ne sera pas sans aboutir à des solutions sûres et économiques, même pour les assemblages qui doivent être soumis à des contraintes dynamiques élevées.

Summary.

Even if oscillating stressing may lead to breakdown in highly stressed railway bridges under certain unfavourable conditions, it must also be noted that oscillating tests carried out on a laboratory scale allow only a certain relative valuation of the different materials and forms of joints being determined; the results cannot be used directly as the basis of calculations. In practice the stresses, as regards both the variation in the loading and the frequency with which the dangerous oscillating stresses recur, are in general less severe than in fatigue tests carried out in a laboratory.

Investigations on riveted joints have shown that the fatigue strength depends also on the clamping force, and that in riveted joints of St 52 the clamping force and also the fatigue strength are very favourably influenced by the adoption of softer kinds of rivet-steel, whilst less clamping force

and a lower fatigue strength are given by high-grade alloy rivet-steels, especially those with high nickel and manganese content.

In welded joints, the influence of the original material and of the electrode material is of less importance than the effect of the conditions of stressing as determined by the form of the joint. In agreement with the results obtained with St 37, it was found that butt welded joints were far superior to butt strap riveted joints with fillet welds in parallel or normal shear; accordingly, welded butt joints are to be regarded as practically of the same value as double riveted joints, even when subjected to high oscillating stressing. Reference is made to the great importance of the permanent stressing by the dead load occurring in addition to the oscillating stressing, and to the favourable behaviour of St 52 under such conditions. Fatigue tests on large welded I-plate girders of St 52 showed clearly how their fatigue strength can be greatly increased by designing them of appropriate shape, so that they constitute a highly valuable structural element even with oscillating stressing. Further, from the results of the fatigue tests the conclusion may be drawn indirectly that there is also no reason to be afraid of the effect of the shrinkage stresses in welded constructions subject to fatigue stressing.

Finally it may be concluded that the adoption of welding is perfectly justifiable, even in structures of St 52, if the dynamic stressing is not far too excessive. In constructions with unfavourable run of the lines of force and with high oscillating stressing, a somewhat softer steel — St 45 — with particularly good welding properties has proved to be suitable. Further it may certainly be expected that the close collaboration of metallurgists, designers, and testers of material will result in finding safe and economical solutions, also for joints subject to high dynamic stressing.