

Die Dauerfestigkeit und das Schweissen von hochwertigem Baustahl St. 52

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

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **1 (1932)**

PDF erstellt am: **19.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-735>

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.

DIE DAUERFESTIGKEIT UND DAS SCHWEISSEN VON HOCHWERTIGEM BAUSTAHL ST. 52

DURABILITÉ ET SOUDURE DE L'ACIER À HAUTE RÉSISTANCE

FATIGUE-STRENGTH AND WELDING OF HIGH-GRADE
STRUCTURAL STEEL

Prof. Dr. Ing. E. H. SCHULZ,

Direktor des Forschungsinstitutes der Vereinigte Stahlwerke A.-G., Dortmund, und

Dr. Ing. H. BUCHHOLTZ,

Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsinstitut der Vereinigte Stahlwerke A.-G.,
Dortmund.

Die grundsätzliche Entwicklung der unter der Bezeichnung St. 52 zusammengefaßten hochwertigen Baustähle in Deutschland darf als bekannt vorausgesetzt werden. Erinnert sei daran, daß diese Stähle übereinstimmend bei einer Zugfestigkeit von 52—62 kg/mm² eine Streckgrenze von mindestens 36 kg/mm² und eine Dehnung von mindestens 20 % aufweisen müssen. Die Deutsche Reichsbahn schreibt ferner für alle diese Stähle zur Erzielung eines höheren Korrosionswiderstandes einen Kupferzusatz von mindestens 0,2 % und den Nachweis der Schweißbarkeit mit Hilfe der Lichtbogenschweißung vor. Die einzelnen deutschen Hüttenwerke haben verschiedene Wege gewählt, um diesen Anforderungen gerecht zu werden, grundsätzlich haben aber alle Vertreter der Stahlgruppe St. 52 einen Kohlenstoffgehalt unter 0,2 % bzw. 0,22 %, eine Maßnahme, die erforderlich erschien, um die Möglichkeit der Lichtbogenschweißung zu gewährleisten. Im übrigen haben die Stähle verschiedene Legierungszusätze bzw. sind einige an sich in jedem Kohlenstoffstahl vorhandene Beimengungen über das normale Maß hinaus erhöht.

Die Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft hatte bei der Einführung die zulässige Beanspruchung für den Baustahl St. 52 gegenüber dem bisher ausschließlich verwendeten St. 37 um das Maß der Streckgrenzensteigerung — also um 50 % — erhöht. Mit dieser Maßnahme wurde zum ersten Male die Streckgrenze als Berechnungsgrundlage anstelle der bisher üblichen Zugfestigkeit auch im Stahlbau praktisch eingeführt.

I. Über die Dauerfestigkeit des St. 52.

Bald nach Einführung des St. 52 wurden Bedenken erhoben gegen das Maß der Steigerung der zulässigen Beanspruchung um 50 %; es wurde darauf hingewiesen, daß einerseits mit Vergrößerung der Spannweite auch die Dauerfestigkeit des Stahles für die Haltbarkeit einer Brücke eine bedeutsame Rolle spiele, daß andererseits aber die Dauerfestigkeit des St. 52 unter den praktischen Verhältnissen nicht in gleichem Maße wie die Streckgrenze gegenüber dem St. 37 erhöht sei.

Bei der eingehenderen Bearbeitung dieser Fragen haben sich im wesentlichen zwei Aufgabenkreise getrennt entwickelt: Einmal die Frage der sogenannten Brückendynamik als Problem für den Konstrukteur, zum andern die eigentliche Ermittlung der Dauerfestigkeit als Werkstoffeigenschaft unter den verschiedensten Bedingungen als gemeinsame Aufgabe für Stahlhersteller und Verbraucher. H. KULKA¹⁾ hat neuerdings die außerordentlichen Schwierigkeiten bei der Bestimmung der dynamischen Beanspruchungen in Brücken geschildert und gleichzeitig gezeigt, wie wenig sichere Kenntnisse über die wahren Beanspruchungen in den einzelnen Teilen besonders größerer Brücken vorliegen. Festzustehen scheint, daß bei einer gegebenen Gesamtbeanspruchung die Brücke als Gesamtbauwerk eine wesentlich andere Schwingungscharakteristik besitzt als ihre verschiedenen Bauglieder. Während z. B. eine Brücke mit 100 m Spannweite als Ganzes etwa zwei freie Schwingungen in der Sekunde vollführt, sind in einzelnen Baugliedern Schwingungszahlen von mehr als 100 in der Sekunde ermittelt worden. Ähnliche Unterschiede, wie sie bei den Schwingungszahlen der Gesamtbrücke und einzelnen Baugliedern vorzuliegen scheinen, ergaben sich auch in den Durchbiegungen bzw. Spannungen bei bewegter Verkehrslast. Während bei Messungen der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft in den einzelnen Trägern einer kleinen Fachwerkbrücke infolge der dynamischen Kräfte Spannungserhöhungen auf fast den doppelten Betrag des statischen Wertes beobachtet wurden, ergaben bei den Schweizer Bundesbahnen Messungen der dynamischen Durchbiegung der gesamten Brücke lediglich Erhöhungen gegenüber den statischen Werten von weniger als 10 %. Die Brücke als Gesamtbauwerk scheint sich also gegenüber dynamischen Einwirkungen ganz anders zu verhalten als der einzelne Träger.

Die Kenntnisse über die wirklichen, in größeren Stahlbauwerken auftretenden Beanspruchungen — insbesondere die Anteile von statischen und dynamischen — sind also noch unvollkommen. W. SCHNEIDER²⁾ betont daher mit Recht die Wichtigkeit weiterer eingehender Messungen in dieser Richtung mit dem Ziel, einmal die Größe des Anteils der statischen und der schwingenden Beanspruchung, dann auch die Häufigkeit der Lastwechsel und einzelner Laststufen für die verschiedenen Teile von größeren Eisenbauwerken zu ermitteln. Für die ungefähre Größe des statischen und dynamischen Belastungsanteils dürfte das Verhältnis von Eigengewicht zur Nutzlast einen gewissen Maßstab geben, das bei größeren Brücken zu 4:1 bis 5:1 anzunehmen ist. Da dynamische Wirkungen durch entsprechende Stoßzuschläge berücksichtigt sind, wäre anzunehmen, daß die mittlere Belastung einer Brücke 20—25 % ihres Eigengewichtes nicht übersteigen dürfte. Das Eigengewicht ist mit größter Wahrscheinlichkeit als ruhend anzusehen, sodaß selbst in ungünstigen Fällen, wenn die Verkehrslast dynamisch aufgebracht würde, immer ein Überwiegen der ruhenden gegenüber der schwingenden Beanspruchung zu erwarten sein wird. Die Frage von Resonanzwirkungen und örtlichen Spannungserhöhungen in Einzelteilen ist natürlich bei diesen Überlegungen noch nicht berücksichtigt.

Die Hüttenwerke, die sich die Entwicklung von Stahllegierungen nach Art des St. 52 angelegen sein ließen, lenkten von vornherein auch bereits ihre Aufmerksamkeit auf die Frage der Dauerfestigkeit. Den Metallurgen interessiert in diesem Zusammenhang naturgemäß in erster Linie die Dauerfestig-

¹⁾ Stahlbau 3 (1930), S. 301/5.

²⁾ Stahl und Eisen 51 (1931), S. 285/92.

keit als eine reine Werkstoffeigenschaft. Zum Zeitpunkt der ersten Entwicklung der genannten Stähle war allgemein noch üblich die Bestimmung der Dauerfestigkeit lediglich an sorgfältig bearbeiteten, meist polierten Probestäben. Bei der Untersuchung der neuen Hochbaustähle nach dieser Richtung wurden allgemein befriedigende Ergebnisse erhalten. Beispielsweise weist der vom Forschungsinstitut der Vereinigte Stahlwerke A.-G. gemeinsam mit dem Werk Dortmunder Union entwickelte Union-Baustahl, der charakterisiert ist durch einen Zusatz von Kupfer und Chrom, am polierten Stab eine Schwingungsfestigkeit von 31—32 kg/mm² auf — die Werte wurden erzielt an umlaufenden Biegestäben auf der Maschine von SCHENCK³⁾. Da der weiche Baustahl St. 37, der zuvor das normale Material für den Stahlhochbau darstellte, unter gleichen Verhältnissen eine Schwingungsfestigkeit von 21—22 kg/mm² aufweist, so erschien die Überlegenheit des St. 52 auch hinsichtlich der Dauerfestigkeit gegenüber dem St. 37 so hoch, daß keinerlei Bedenken der Einführung und der Anwendung des St. 52 mit der um 50 % höheren zulässigen Beanspruchung gegenüber zu stehen schienen.

VON O. GRAF⁴⁾ und K. SCHAECHTERLE⁵⁾ wurde aber erstmalig darauf hingewiesen, daß die Verhältnisse in den Konstruktionen doch anders liegen. Beide gingen in ihren Betrachtungen von dem Gesichtspunkt aus, daß die Stähle im Stahlhochbau zur Verwendung kommen nicht mit sorgsam geglätteter Oberfläche, sondern mit Walzhaut, weiterhin, daß bei der Herstellung von Konstruktionen, Kerbungen, vor allem aber Bohrungen (für die Niete) unvermeidbar sind. Ferner wandten sie ihr Augenmerk auch auf die Dauerzugfestigkeit genieteteter Konstruktionen unter oftmals wiederholter Zugbeanspruchung. Vorweg sei darauf hingewiesen, daß bei vorwiegend ruhender Beanspruchung, wie sie z. B. im gewöhnlichen Zugversuch vorliegt, Streckgrenze und Zugfestigkeit durch die Ausbildung der Oberfläche (Walzhaut, Kerben oder Löcher) praktisch nicht beeinflußt werden. Die Tragfähigkeit vorwiegend statisch beanspruchter Konstruktionen wird also durch Kerben und Löcher nicht herabgesetzt. Wesentlich anders liegen jedoch die Verhältnisse, wenn die Belastung als Wechselbeanspruchung in weiten Grenzen schwingt. Auf Grund der von der Materialprüfungsanstalt an der Technischen Hochschule Stuttgart durchgeführten Dauerzugversuche und eigener Dauerbiegeversuche seien unsere Kenntnisse zur Frage der Dauerfestigkeit des hochwertigen Baustahls St. 52 kurz wiedergegeben.

1. Der Einfluß der Walzhaut auf die Dauerfestigkeit.

Die in gewissen Grenzen wechselnden Erzeugungsbedingungen im Walzwerk bringen es mit sich, daß die Walzhaut der Stähle nicht immer gleichmäßig ausgebildet ist. Dazu kommt, daß die Walzhaut durch die unvermeidbare Rostbildung vor dem Anstrich weitere Veränderungen erfährt, deren Auswirkung auf die Dauerfestigkeit nicht ohne weiteres vorauszusagen ist. Grundsätzlich wird nun die Dauerfestigkeit durch Oberflächenbeschädigungen mit wachsender Zugfestigkeit in steigendem Maße herabgesetzt. Es ist daher auch bei den härteren Stählen ein größerer Einfluß der Walzhaut zu erwarten als bei dem weichen St. 37. Aber auch innerhalb der gleichen Festigkeitsgruppe können, wie Untersuchungen verschiedener Stellen gezeigt haben, große Unterschiede in der Ausbildung der Walzhaut vorliegen. So

³⁾ Stahl und Eisen 48 (1928), S. 849/53.

⁴⁾ Bautechnik 8 (1930), S. 213.

⁵⁾ Stahlbau 2 (1929), S. 135/42.

fand O. GRAF⁶⁾ bei der Prüfung von gewalzten Flachstäben auf der Pulsatormaschine für zwei Stähle St. 52 bei sonst gleichen Festigkeitseigenschaften — auch gleicher Dauerfestigkeit, bei geschliffener Oberfläche — für Stahl A bei Prüfung mit Walzhaut eine Ursprungsfestigkeit von 23 kg/mm², für Stahl B jedoch nur eine solche von 15 kg/mm². Die mikroskopische Untersuchung der Walzhaut zeigte, wie Abb. 1 erkennen läßt, bei Stahl A eine glatte und vollständig kerbfreie Ausbildung, während die Walzhaut bei Stahl B (Abb. 2) sehr kerbreich ausgebildet war.

Ähnliche Feststellungen wurden auch bei Dauerbiegeversuchen gemacht, wobei Flachstäbe mit und ohne Walzhaut teils unter rein schwingender, teils unter zusammengesetzter statischer und schwingender Beanspruchung geprüft wurden⁷⁾. In Abb. 3 sind Wechselfestigkeit und Ursprungsfestigkeit von geschliffenen Proben und solchen mit Walzhaut in Abhängigkeit von der

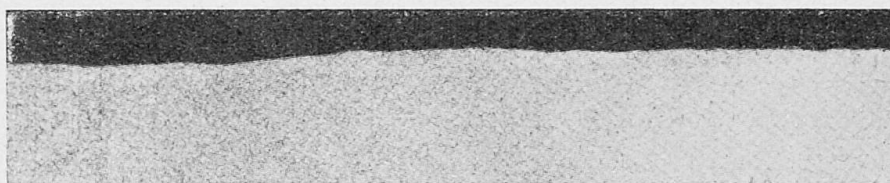


Fig. 1.

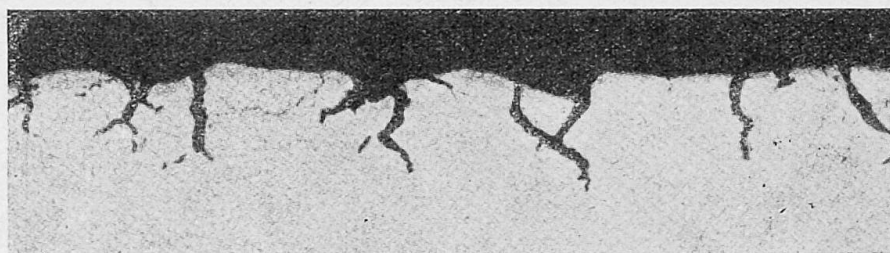


Fig. 2.

Fig. 1 und 2.

Ausbildung der Walzhaut von Baustählen. 100fache Vergrößerung.
Couche extérieure de laminage dans les aciers de construction, agrandie 100 fois.
Form of mill scale in structural steels. Enlargement 100.

Zugfestigkeit wiedergegeben, wobei die Stähle mit etwa 40 und mehr als 60 kg/mm² Zugfestigkeit Kohlenstoffstähle und die Stähle mit 50—60 kg/mm² Zugfestigkeit verschieden legierte Baustähle St. 52 sind. Die Ursprungsfestigkeit entspricht mit wenigen Ausnahmen der Streckgrenze. Wie auch GRAF feststellte, kann die Dauerfestigkeit des St. 52 bei Prüfung von Proben mit Walzhaut bei gleicher Zugfestigkeit sehr verschieden hoch sein — die Wechselfestigkeit lag z. B. zwischen 20 und 28 kg/mm² —, was durch die wechselnde Ausbildung der Walzhaut bedingt wird. Im Mittel wird die Wechselfestigkeit durch die Walzhaut bei Stählen mit rund 42 kg/mm² Zugfestigkeit um 21, bei 56 kg/mm² Zugfestigkeit um 27 und bei einer solchen von 62 kg/mm² um 29 %, mit steigender Zugfestigkeit also stärker herabgesetzt, während die Ursprungsfestigkeit durchweg nur unwesentlich beeinflußt wird. Bemerkenswert ist, daß der St. 52 mit Walzhaut bei Biegebean-

⁶⁾ Dauerfestigkeit von Stählen mit Walzhaut, ohne und mit Bohrung, von Niet- und Schweißverbindungen. V. D. I.-Verlag 1931.

⁷⁾ Einzelheiten s. H. BUCHHOLTZ und E. H. SCHULZ: „Zur Frage der Dauerfestigkeit des hochwertigen Baustahls St. 52“, Mitt. a. d. Forsch.-Inst. d. Ver. Stahlw. A.-G., Bd. II (1931), Lfg. 6, S. 104.

spruchung im Mittel nicht nur eine höhere Wechselfestigkeit und Ursprungsfestigkeit als der St. 37 besitzt, sondern auch dem härteren Kohlenstoffstahl St. 60 überlegen ist. Der St. 52 nimmt danach in der Reihe der Stähle mit steigender Festigkeit eine durchaus günstige Stellung ein.

2. Einfluß von Querbohrungen.

Nach Modell-Versuchen, spannungs-optischen Messungen und elastizitäts-theoretischen Berechnungen wird bekanntlich die rechnerische Spannung durch Kerben, Übergänge, Bohrungen u. s. w. am Kerbgrund ganz erheblich gesteigert. Während die meisten Werkstoffe unter vorwiegend ruhender Beanspruchung diese Spannungsspitzen durch kleine bleibende Formänderungen ausgleichen können, ohne daß vorzeitig Bruch eintritt, wird die

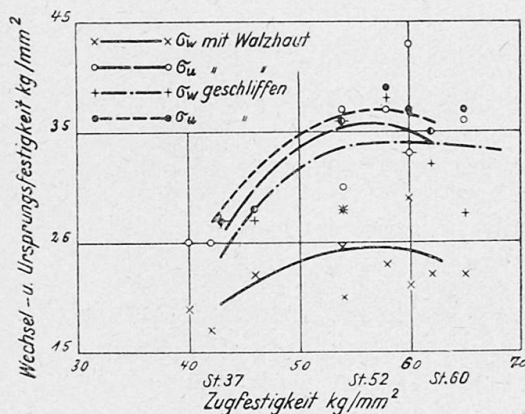


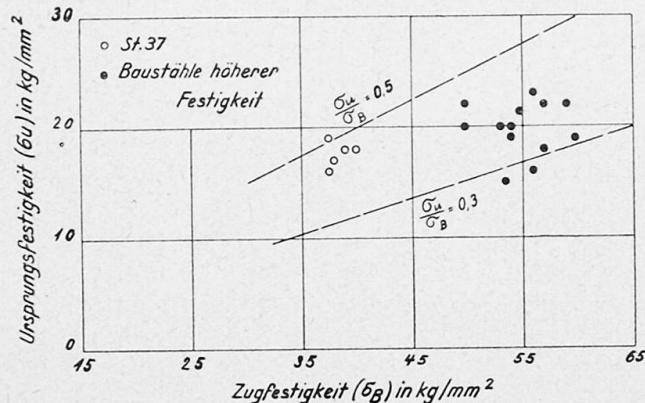
Fig. 3.
Dauerbiegefestigkeit von Proben mit und ohne Walzhaut, in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit.

Résistance à la flexion alternée, sur des éprouvettes avec et sans couche extérieure de laminage, en fonction de la résistance à la traction.

Fatigue bending strength of test pieces with and without mill scale, as a function of the tensile strength.

Widerstandsfähigkeit bei vorwiegend schwingender Beanspruchung durch derartige Querschnittsänderungen zum Teil erheblich herabgesetzt. Man spricht von der sogenannten Kerbempfindlichkeit, ohne sich allerdings immer der Tatsache bewußt zu sein, daß das Maß des Rückganges der Dauerfestigkeit infolge von Kerbwirkung bei den meisten Stählen wesentlich kleiner ist, als auf Grund der elastostatischen Spannungserhöhung zu erwarten ist, daß also manche Werkstoffe — vorzugsweise die Stähle — die Fähigkeit einer allerdings verschieden großen gewissen Selbsthilfe gegenüber der Kerbwirkung besitzen. Bekanntlich nimmt das Vermögen der Selbsthilfe mit steigender Zugfestigkeit ab. Schon auf Grund dieser Tatsache ist also zu erwarten, daß auch der St. 52 gegenüber dem St. 37 schon infolge seiner höheren Zugfestigkeit eine größere Kerbempfindlichkeit besitzt. Aber auch bei gleicher Zugfestigkeit liegen nach GRAF erhebliche Unterschiede in der Ursprungsfestigkeit gelochter Stäbe mit Walzhaut vor, wobei sich allerdings der Einfluß der verschieden ausgebildeten Walzhaut der Wirkung der Bohrung überlagert. Abb. 4 zeigt die Ursprungsfestigkeit gebohrter Flachstäbe mit Walzhaut bei Zugbeanspruchung in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit, Abb. 5 die Ursprungsfestigkeit in Abhängigkeit von der oberen Streckgrenze. Beiden Abbildungen ist zu entnehmen, daß die Ursprungsfestigkeit bei praktisch gleichen Festigkeitseigenschaften im Zugversuch in weiten Grenzen schwankt. Das Verhältnis von Ursprungsfestigkeit zur Zugfestigkeit liegt etwa zwischen 0,3 und 0,5. Weiter zeigen die Abbildungen, daß die Ursprungsfestigkeit gebohrter Flachstäbe mit Walzhaut bei Stählen mit hoher Festigkeit nicht immer größer ist als die Ursprungsfestigkeit des Stahles St. 37. Außerdem ist der Einfluß der Beschaffenheit der Bohrung

nicht zu vernachlässigen. So wird nach BARNER⁸⁾ und eigenen Versuchen die Dauerfestigkeit durch das Aufreiben der Bohrung und leichtes Abgraten der Kanten um 15—20 % erhöht.



Baustähle höherer Festigkeit — Aciers de construction à haute résistance — High-grade structural steel.

Fig. 4.

Ursprungsfestigkeit (σ_u) gebohrter Flachstäbe mit Walzhaut, in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit (σ_B).

Résistance initiale σ_u de barreaux plats percés, avec couche extérieure de laminage, en fonction de la résistance à la traction, σ_B .

Original strength σ_u of drilled flat bars with mill scale, as a function of the tensile strength σ_B .

Bei Dauerbiegebeanspruchung ist die ungünstige Wirkung der Bohrung nicht ganz so groß wie bei Zugbeanspruchung, da bei der vom Rande zur neutralen Faser abnehmenden Beanspruchung leichter als bei Zugbeanspruchung durch kleine bleibende Verformungen am Lochrand eine Entlastung der höchstbeanspruchten Randfaser eintreten kann. Besonders ausgeprägt

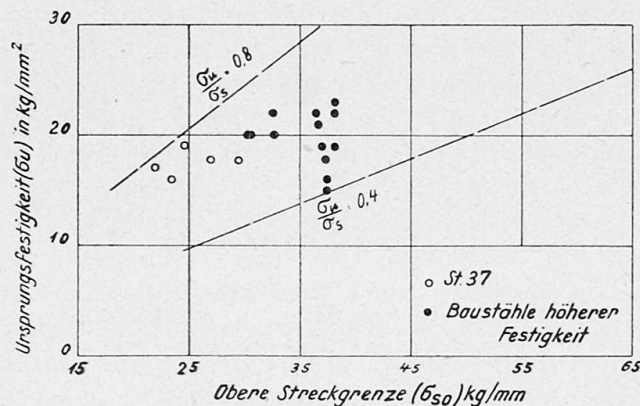


Fig. 5.

Ursprungsfestigkeit (σ_u) gebohrter Flachstäbe mit Walzhaut in Abhängigkeit von der oberen Streckgrenze (σ_{s0}).

Résistance initiale σ_u de barreaux plats percés, avec couche extérieure de laminage, en fonction de la limite supérieure d'écoulement, σ_{s0} .

Original strength σ_u of drilled flat bars with mill scale, as a function of the upper yield point, σ_{s0} .

ist dies Vermögen der Selbsthilfe bei weichen Stählen, sodaß die Ursprungsfestigkeit gelochter Stäbe bei Biegebeanspruchung auch oberhalb der Streckgrenze gefunden werden kann.

Abb. 6 zeigt zunächst den Einfluß von Querbohrungen auf die Wechselfestigkeit und Ursprungsfestigkeit von Stäben ohne Walzhaut in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit. Wie zu erwarten, wird der Einfluß der Bohrung mit steigender Zugfestigkeit größer. Während z. B. bei Stahl von 42 kg/mm² Zugfestigkeit die Wechselfestigkeit durch die Bohrung um 18 % herabgesetzt wurde, sinkt sie bei Stählen mit 62 kg/mm² Zugfestigkeit um 36 % — also um

⁸⁾ „Der Einfluß der Bohrung auf die Dauerzugfestigkeit von Stahlstäben“. V. D. I.-Verlag Berlin, 1931.

den doppelten Betrag. Trotzdem weisen unter derartigen Prüfbedingungen die härteren Stähle höhere Werte für die Dauerbiegefestigkeit als St. 37 auf. Besonders bemerkenswert in diesem Zusammenhang ist, daß auch der seit Jahren praktisch bewährte 3%-ige Nickelstahl die gleiche, teilweise sogar eine stärkere Herabsetzung der Wechselfestigkeit als der St. 52 erfährt.

Durch die gleichzeitige Wirkung von Walzhaut und Bohrung wird die Wechselfestigkeit bei St. 37 auf rund 75 %, bei St. 52 auf etwa 60 % der Wechselfestigkeit des polierten Stabes herabgesetzt, während die Ursprungsfestigkeit gelochter Proben mit Walzhaut nahezu der Streckgrenze entspricht. Die vorher mitgeteilten Ergebnisse von GRAF, wonach die Ursprungsfestigkeit des St. 52 unterhalb der des St. 37 liegen kann, stellen also einen Aus-

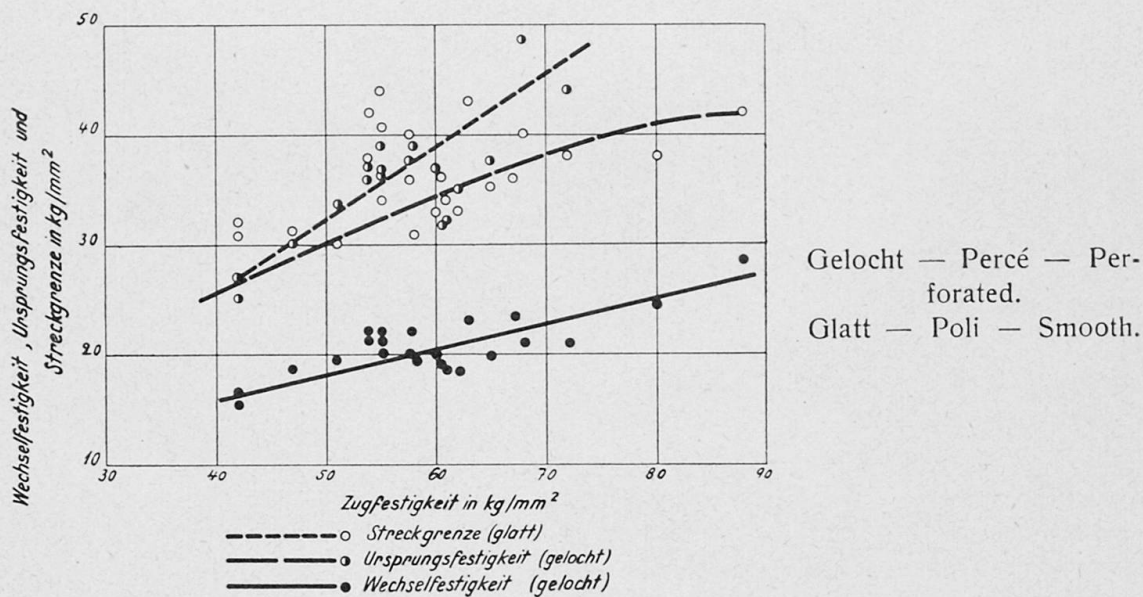


Fig. 6.

Streckgrenze, Wechsel- und Ursprungsfestigkeit in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit (gelochte Flachbiegeproben).

Limite d'écoulement, résistance aux efforts alternés et résistance initiale, en fonction de la résistance à la traction (barreaux plats percés, soumis à la flexion).

Yield point, fatigue and original strength, as a function of the tensile strength (drilled flat bending test pieces).

nahmefall dar. Wie Abb. 7 erkennen läßt, liegt nur in zwei Fällen die Ursprungsfestigkeit härterer Stähle bei Proben mit Walzhaut und Querbohrung unter der des St. 37, wobei zu berücksichtigen ist, daß der Stahl mit 60 kg/mm² Zugfestigkeit ein Kohlenstoffstahl war. Allerdings zeigt ein Vergleich mit Abb. 3, daß bei Anwesenheit von Querbohrungen und Walzhaut die Überlegenheit des St. 52 gegenüber St. 37 dann stark verkleinert wird, wenn hohe Schwingungsbeanspruchungen vorliegen. Diese Feststellung gilt im gleichen, wenn nicht sogar stärkeren Maße für alle härteren Stähle im geglähten oder vergüteten Zustand, insbesondere auch für den seit Jahren bewährten 3%-igen Nickelstahl. Der St. 52 stellt daher auch bei Vorliegen von Bohrungen und Walzhaut in der Reihe der härteren Stähle eine durchaus günstige Ausnahme dar, wie Abb. 8 und 9 besonders deutlich erkennen lassen. Unter Zugrundelegung aller Ergebnisse wurde hier das Verhältnis der Wechselfestigkeit zur Zugfestigkeit und das Verhältnis der Ursprungsfestigkeit zur Zugfestigkeit für die einzelnen Prüfarten — mit und ohne Walzhaut bzw. mit und ohne Bohrung — errechnet und in Abhängigkeit von der Zugfestig-

keit aufgetragen, wobei die Stähle mit 42 und 62 kg/mm² mittlerer Zugfestigkeit Kohlenstoffstähle, die Stähle mit 56 kg/mm² Zugfestigkeit St. 52 darstellen.

Bei St. 52 liegen die Verhältniszahlen bei allen Prüfarten oberhalb von denen des Kohlenstoffstahles mit 62 kg/mm² Zugfestigkeit; bei Querbohrung und Walzhaut weist allerdings der St. 37 die günstigsten Verhältniszahlen auf, was erneut die hohe Unempfindlichkeit dieses Werkstoffs dartut.

3. Die Dauerfestigkeit bei zusammengesetzter ruhender und schwingender Beanspruchung.

Trotz des günstigen Verhaltens des St. 37 bei überwiegenden Schwingungsbeanspruchungen muß seine Verwendung mit Rücksicht auf die niedrige Streckgrenze auf die Fälle niedriger ruhender Beanspruchung beschränkt bleiben. Wie schon eingangs ausgeführt wurde, dürfte in großen Brücken,

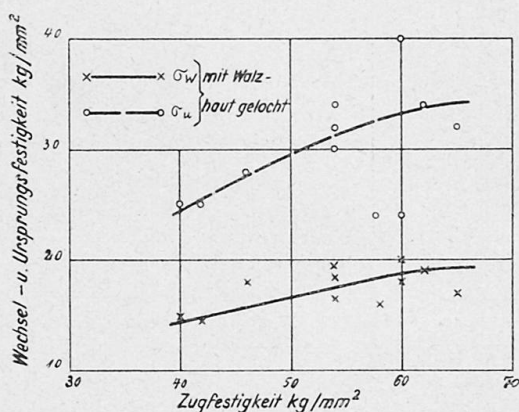


Fig. 7.

Dauerbiegefestigkeit gelochter Proben in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit (mit Walzhaut).

Résistance à la flexion alternée sur barreaux percés en fonction de la résistance à la traction (avec couche extérieure de laminage).

Fatigue bending tests of drilled test pieces as a function of the tensile strength (with mill scale).

besonders in ihren tragenden Teilen, der Anteil der ruhenden Belastung gegenüber dem der schwingenden erheblich überwiegen. Für derartige Belastungsfälle gewinnt nun, wie leicht ersichtlich, die Streckgrenze mehr und mehr an Bedeutung; damit wächst gleichzeitig naturgemäß auch die Überlegenheit des St. 52 gegenüber St. 37 wieder an. Diese Überlegungen werden durch die Ergebnisse⁶⁾ von Dauerzug- und Dauerbiegeversuchen unter höherer ruhender Grundspannung bestätigt. In Abb. 10—12 sind typische Vorspanndiagramme bei Biegebeanspruchung für Union-Baustahl, St. 37 und Kohlenstoffstahl mit 62 kg/mm² Zugfestigkeit, und zwar für Proben mit Walzhaut, mit Querbohrung und Schweißbraupe bzw. Schweißnaht wiedergegeben. (Auf die Proben mit Schweißbraupe und Schweißnaht wird weiter unten besonders eingegangen.) Die Abmessungen der in den einzelnen Versuchsreihen geprüften Probestäbe sind Abb. 13 zu entnehmen. Die Kurven zeigen die Wechselbeanspruchung, die ohne Bruch noch eben ertragen wird in Abhängigkeit von der ruhenden Beanspruchung, und zwar sind von der als 0-Linie gezeichneten Abszisse nur die positiven Anteile der Wechselbeanspruchung nach oben hin aufgetragen. Die Spannung ist auf den kleinsten Querschnitt — also in Versuchsreihe II nach Abzug des Loches — unter Zugrundelegung des Widerstandsmomentes für den rechteckigen Querschnitt berechnet, wobei die Kurven die höchste Spannung der Randfaser angeben, die ohne Bruch noch gerade ertragen wird.

Die mit AK bezeichneten Kurven lassen erkennen, daß, wie zu erwarten, mit steigender ruhender Vorspannung die Fähigkeit, zusätzliche Schwingungs-

⁶⁾ a. a. O.

beanspruchungen ohne Bruch zu ertragen, abnimmt. Bei den Punkten B_w bzw. B_r schneiden die Dauerfestigkeitskurven die Streckgrenze. Alle Werte zusammengesetzter Beanspruchung rechts des Punktes B führen zu plastischen Verformungen von mehr als 0,2 %. Alle Beanspruchungen oberhalb der Dauerfestigkeitskurven AK verursachen in entsprechender Zeit Dauerbruch. Alle Beanspruchungen innerhalb des Gebietes $A_w B_w G O$ u. s. w. liegen im sogenannten „sicheren“ Gebiet, in dem weder Bruch noch größere plastische Verformungen auftreten. Bei Prüfung glatter und gelochter Stäbe ist das „sichere“ Gebiet der härteren Stähle nahezu doppelt so groß wie das des St. 37, was weniger auf die Lage der Wechselfestigkeit als auf die höhere

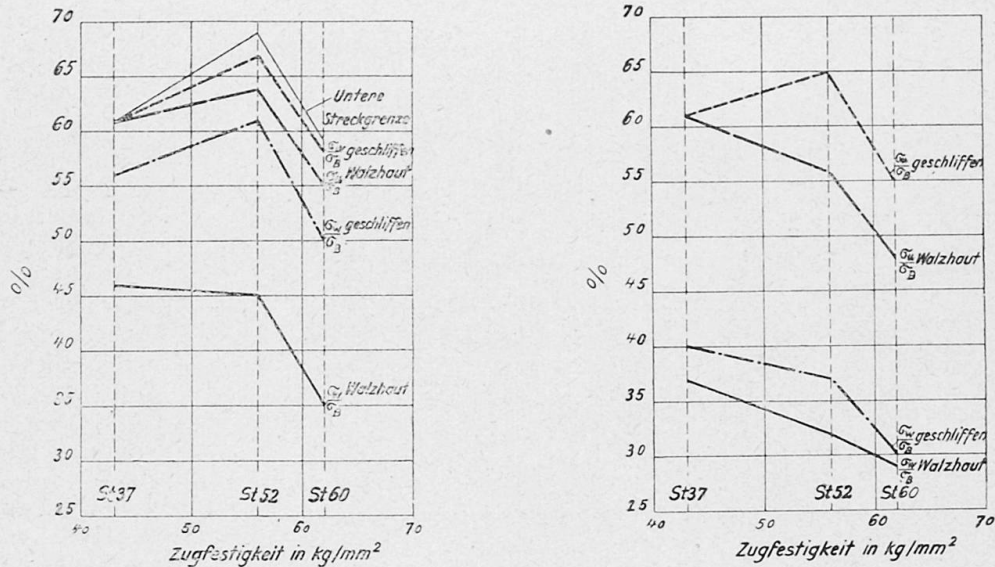


Fig. 8 und 9.

Verhältnis von Streckgrenze σ_s , Wechselfestigkeit σ_w und Ursprungsfestigkeit σ_u zur Zugfestigkeit σ_B in Abhängigkeit von letzterer.

Rapports entre la limite d'écoulement σ_s , la résistance aux efforts alternés σ_w et la résistance initiale σ_u d'une part, et la résistance à la traction σ_B , d'autre part, en fonction de cette dernière.

Relation of the yield point σ_s , fatigue strength σ_w and original strength σ_u , as a function of the tensile strength σ_B .

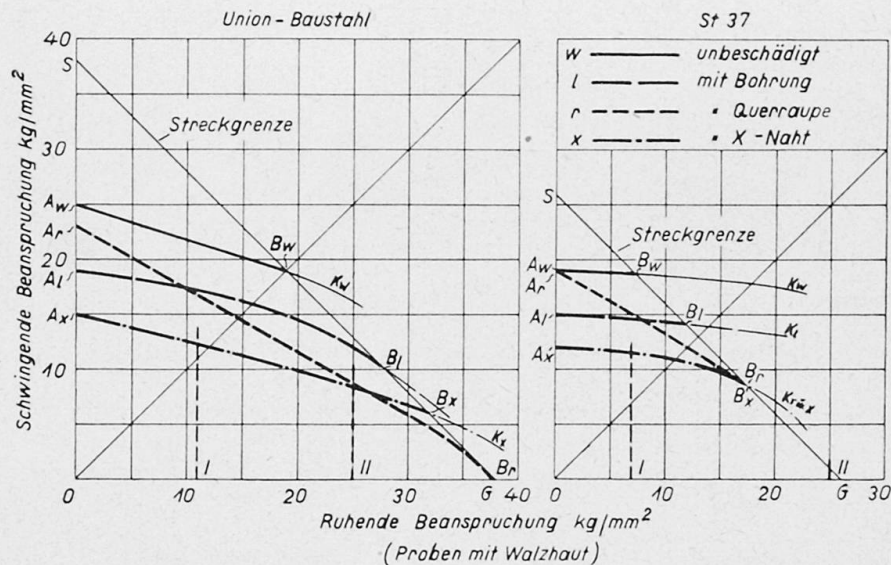
Fig. 8.
Glatte Proben.
Eprouvettes lisses.
Smooth test pieces.

Fig. 9.
Gelochte Proben.
Eprouvettes percées.
Perforated test pieces.

Streckgrenze zurückzuführen ist. Legt man für beide Stähle die zulässigen Beanspruchungen als Vorspannung zu Grunde, so kann der Union-Baustahl bei Prüfung gelochter Stäbe noch 14, der St. 37 noch 12 kg/mm² zusätzliche Schwingungsbeanspruchung ertragen. Das Maß der Sicherheit gegenüber Wechselbiegebeanspruchungen unter gleichzeitig ruhender Beanspruchung ist also für Union-Baustahl mindestens ebenso groß wie für St. 37. Mit steigender ruhender Vorspannung werden die Verhältnisse für den St. 52 immer günstiger. Bei Beanspruchungen oberhalb von 26 kg/mm² muß der St. 37 vollständig versagen, da hier seine Streckgrenze erreicht ist. Auf das Vorspanndiagramm des St. 60 (Abb. 12) wird bei der Besprechung der Dauerfestigkeit von Schweißungen noch eingegangen.

4. Über die Dauerfestigkeit von Nietverbindungen.

Bei ruhender Beanspruchung wird die Tragfähigkeit von Nietverbindungen durch die Klemmkraft und die Scherfestigkeit der Niete bestimmt, während bei überwiegend schwingender Beanspruchung ein event. einsetzender Dauerbruch durch die Spannungserhöhung an den Lochrändern der verbundenen Stäbe verursacht wird. Danach sollte die Dauerfestigkeit einer Nietverbindung etwa der eines gelochten Stabes entsprechen. Allerdings werden die Verhältnisse hinsichtlich der Beanspruchung und der Tragfähigkeit durch die Klemmkraft und den Leibungsdruck der Nieten verschleiert, so daß die Dauerfestigkeit einer Nietverbindung mitunter größer, mitunter



Schwingende Beanspruchung — Efforts alternés — Vibrating stress.

Ruhende Beanspruchung — Efforts statiques — Dead load stress.

Unbeschädigt — Intact — Undamaged.
Mit Bohrung — Avec percage — With hole.

Schweißnaht quer — Gorge de soudure transversal — With transverse weld. X-Naht — Soudure en X — Double-vee weld.

Fig. 10 und 11.

Dauerfestigkeit von Union-Baustahl und St 37 bei zusammengesetzter Beanspruchung. Résistances a la fatigue de l'acier de construction „Union Baustahl“ et de l'acier St 37; pour des efforts combinés.

Fatigue-strength of „Union Baustahl“ (structural steel) and St 37 with composite stressing.

kleiner sein kann als die Dauerfestigkeit eines gelochten Stabes. Nach Untersuchungen der Material-Prüfungsanstalt an der Technischen Hochschule Stuttgart⁶⁾ war die Dauerfestigkeit von zwei- und mehrreihigen Nietverbindungen aus St. 37 mit Nieten aus St. 34 höher als die des gebohrten Flachstabes. Bei St. 37 wirkte also die Klemmkraft der aufgenieteten Laschen günstig. Bei Nietverbindungen aus St. 52 mit harten Nieten aus St. 52 wurde die Ursprungsfestigkeit gegenüber der des gebohrten Flachstabes weiter herabgesetzt. Die Ursache für diese weitere Verminderung der Dauerfestigkeit ist einmal auf die bei den Stuttgarter Versuchen festgestellte geringere Klemmkraft der harten Nieten aus St. 52 und gleichzeitig auf die erhebliche Härtesteigerung dieser Nieten auf mehr als 65 kg/mm² Zugfestigkeit zurückzuführen, was sich in einer Erhöhung des Lochleibungsdruckes und infolgedessen in einem frühen Anriß äußert. Die Ergebnisse dieser Dauerversuche mit Nietverbindungen aus St. 37 und St. 52 sind in Abb. 14 wiedergegeben, wobei allerdings berücksichtigt werden muß, daß der hier geprüfte St. 52 nicht den Durchschnitt, sondern einen unteren Grenzfall der gesamten Stahl-

⁶⁾ a. a. O.

gruppe darstellt. Die Ursprungsfestigkeit des St. 52 liegt hier in allen Versuchsreihen unter der des St. 37.

Inzwischen ist die Frage des günstigsten Nietenstahles für Nietverbindungen aus St. 52 als gelöst zu betrachten. Mit Rücksicht auf die geringe Scherfestigkeit der Niete aus St. 34 bei statischen Beanspruchungen wurde ein schwach legierter Stahl auf der gleichen Legierungsgrundlage wie der St. 52 gewählt, der aber gleichzeitig etwa die gleiche Stauchfähigkeit und Klemmkraft wie der St. 34 besitzt. Diese sich teilweise zuwiderlaufenden Eigenschaften wurden nach umfangreichen Entwicklungsarbeiten im Nietenstahl St. 44 (auf Chrom-Kupfer-Grundlage) erreicht; geschlagene Nieten aus

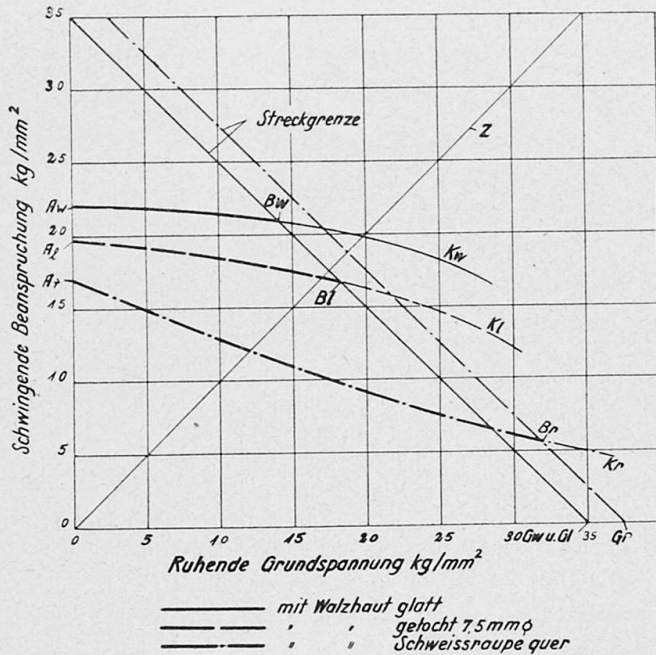


Fig. 12.

Dauerbiegefestigkeit von St 60 bei Prüfung von Flachproben mit Loch und Quernaht.

Résistance à la flexion alternée pour l'acier St 60, sur éprouvettes percées et avec cordon de soudure transversal.

Fatigue strength of St 60 when testing flat pieces with hole and transverse welded seam.

diesem St. 44 weisen eine Scherfestigkeit von mehr als 36 kg/mm² bei einer mittleren Zugfestigkeit von 55 kg/mm² auf. Über die Dauerfestigkeit von Nietverbindungen aus St. 52 mit derartigen Nieten aus St. 44 wird demnächst berichtet werden können.

II. Das Schweißen des St. 52.

Das Schweißen von St. 52, insbesondere von Union-Baustahl, mittels elektrischer Lichtbogenschweißung, ist grundsätzlich als gelöst zu betrachten. Die in jüngster Zeit von der Vereinigte Stahlwerke A.-G. mit hochwertigen Stählen ausgeführten Bauten, insbesondere der Allerbrücken bei Verden liefern hierfür den besten Beweis. Es handelt sich bei den beiden Allerbrücken um zwei Straßenbrücken, die als Träger-Auslegerbrücken ausgebildet sind. Die Gesamtlänge der Brücke beträgt 88,70 m, sie besteht aus zwei Vorflutbogen von 24,50 m und einem Mittelbogen von 39,70 m Spannweite. Der Brücken-Mittelträger ist in einer Länge von 24,50 m in die beiden seitlichen Kragträger eingehängt. Bei der Herstellung der Brücken wurde besonders darauf geachtet, daß Montageschweißung auf ein unerläßliches Mindestmaß herabgesetzt wurde, wodurch der Arbeitsvorgang bei dem Bau der Brücke bedingt war. Die Längsträger (Hauptträger) wurden aus Universaleisen in einer besonderen, weiter unten näher besprochenen Weise zusammengebaut derart, daß in den Ober- und Untergurt, die mit eingewalzten Rillen ver-

sehen waren, der Steg eingesetzt wurde⁹⁾ und zunächst geheftet, dann auf der ganzen Länge geschweißt wurde. Durch symmetrische Ausbildung der Träger konnten Verziehungen vermieden werden, in ähnlicher Weise wurden die Querträger aus Universaleisen hergestellt. Auch die Fahrbahn wurde in einzelnen Feldern, und zwar Haupt- und Zwischenfeldern, in der Werkstatt soweit vorbereitet, daß an der Baustelle nur geringe Schweißarbeiten notwendig wurden. Diese günstige Art des Zusammenbaues war begünstigt dadurch, daß die gesamte Verfrachtung zu Wasser erfolgen konnte und dem Betrieb in den Abmessungen der vorgearbeiteten Einzelteile kaum Beschränkung auferlegt waren. Die örtliche Montagearbeit bezog sich daher lediglich auf das Anschweißen der Querträger an die Hauptträger, die Verbindung der Haupt- und Zwischenfelder der Fahrbahn und einige kleinere Arbeiten wie Anbringen des Geländers u. s. w. Zu bemerken ist außerdem, daß die Verbindung von Union-Baustahl mit dem für weniger hochbeanspruchte Teile

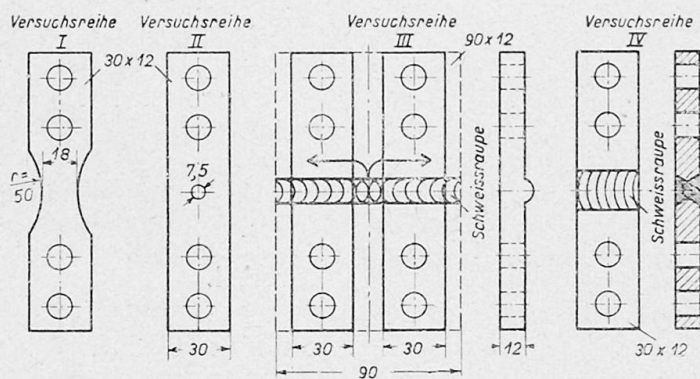


Fig. 13.
Form der Probestäbe für die
Dauerbiegeversuche.
Eprouvettes employées pour
l'essai de flexion alternée.
Shape of test pieces for the
fatigue bending tests.

verwendeten Patinastahl und normalen St. 37 keinerlei Schwierigkeiten bereitete.

Als Elektroden wurden verwendet eine vom Forschungsinstitut eigens für Union-Baustahl entwickelte blanke Sonderelektrode und eine umhüllte Elektrode, die auch für Vertikalnähte geeignet ist. Entsprechend der um 50 % höheren Streckgrenze gegenüber St. 37 wurden bei der Prüfung die für St. 37 in den deutschen Normen (Din 4100) vorgesehenen Mindestfestigkeitswerte um 50 % erhöht. Großzahluntersuchungen der an über 1000 Proben ermittelten Werte ergaben in der Festigkeit von Kreuzproben bei umhüllten Elektroden ein Maximum in der Häufigkeit bei 43 kg/mm², bei blanken Elektroden bei 41 kg/mm² gegenüber einer Sollfestigkeit von 37,5 kg/mm².

Zu den Schweißarbeiten wurden nur solche Schweißer zugelassen, die entweder bereits längere Zeit legierten Stahl geschweißt hatten oder bei einer diesbezüglichen Prüfung ihre Sicherheit nachwiesen. Es ist selbstverständlich, daß legierte Stähle stets mit größerer Umsicht zu schweißen sind als unlegierte weiche Stähle. Vorbedingung einer guten Schweißung bei diesen Stahlsorten ist eine gute Lichtbogenführung bei kurzem Lichtbogen und Verwendung geeigneter Elektroden. Bei Stumpfschweißung an V-Stößen wurde in allen Fällen zwischen 90 % und 100 % der Nennfestigkeit von Union-Baustahl (> 47 kg/mm²) erreicht. Auch die Flankenschweißung ergab sowohl horizontal als auch vertikal geschweißt um 50 % höhere Festigkeitswerte als St. 37.

Obwohl Biegeproben für Schweißungen von St. 52 bisher amtlich nicht vorgeschrieben sind, wurden stichprobenartig auf Veranlassung der Bau-

⁹⁾ D. R. P. und Auslandspatente.

behörde derartige Versuche vorgenommen; an 10 mm dicken Blechen wurden Biegewinkel von 25—35° bei blanken Elektroden und 60—70° bei umhüllten Elektroden ermittelt (vgl. Abb. 15). Diese Werte stimmen überein mit den im Rahmen einer Gemeinschaftsarbeit im Werkstoffausschuß des Vereins deutscher Eisenhüttenleute, Unterausschuß für Schweißbarkeit, an den verschiedenen Arten St. 52 festgestellten Mittelwerten. Hinsichtlich des Wertes der Biegeprobe für den Stahlhochbau muß die Stellungnahme des oben genannten Ausschusses als richtig angesehen werden, wonach die Biegeprobe

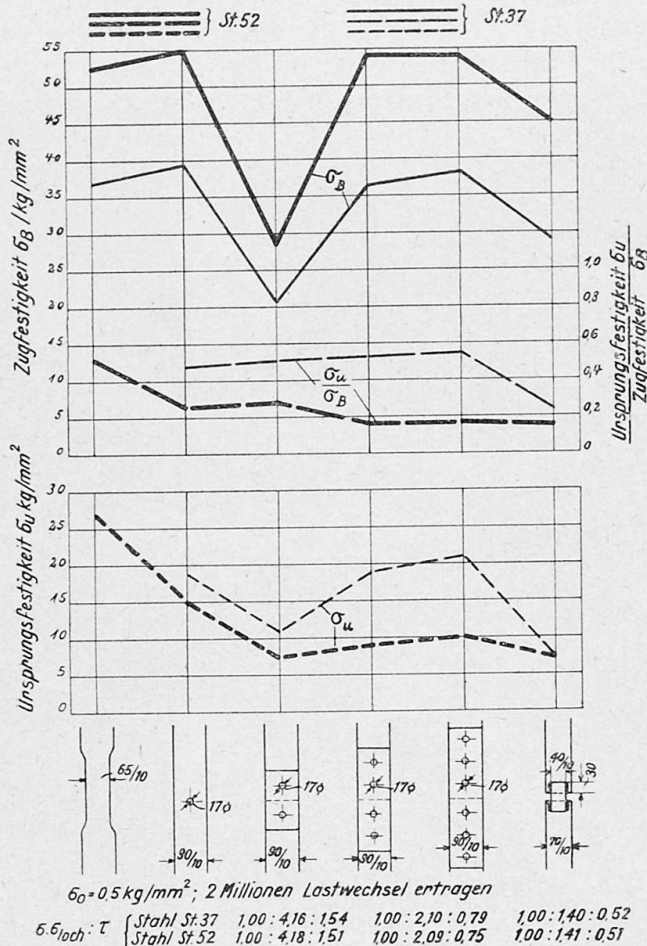


Fig. 14.

Zugfestigkeit und Ursprungsfestigkeit von Niet- und Schweißverbindungen aus St 37 und St 52.

Résistance à la traction et résistance initiale des assemblages rivés et soudés en aciers St 37 et St 52.

Tensile strength and original strength of riveted and welded joints in St 37 and St 52.

2 Millionen Lastwechsel ertragen — Deux millions d'alternances supportent — Two million reversals of load stand by.

keinen Gütemaßstab für die Schweißung abzugeben vermag, da einerseits unverlaschte V-Stöße praktisch im Hochbau nicht angewendet werden, andererseits nachgewiesenermaßen selbst bei fehlerhaften, poren- und schlackenreichen Schweißungen hohe Biegewinkel ermittelt werden können. Außerdem beweisen die zahlreichen im Forschungs-Institut der Vereinigte Stahlwerke A.-G. durchgeführten Biegeversuche, daß die Anteilnahme der Schweißung an der Biegung selbst bei umhüllten Elektroden außerordentlich gering ist und die größte Verformung neben der Schweißstelle eintritt.

Die Verwendung geeigneter Elektroden bei der Schweißung von St. 52 ist, wie schon oben hervorgehoben, größte Aufmerksamkeit zu schenken. Planmäßig durchgeführte Versuche zur Herstellung dieser Elektroden gingen von dem Gedanken aus, sowohl mit Rücksicht auf die Festigkeit der Verbindungen als auch auf ihren Korrosionswiderstand, Elektroden zu entwickeln, die in ihrer Zusammensetzung nicht erheblich von der des Grundwerkstoffes abweichen. Wesentlich war hierbei die Frage des Kohlenstoffgehaltes, da,

wie die Erfahrung beweist, bei verhältnismäßig hohem Kohlenstoffgehalt Porenbildung und normalerweise spröde Schweißnähte begünstigt werden. Es gelang, auf der Grundlage des Chrom-Kupfer-Stahles mit geringem Kohlenstoffgehalt Elektroden herzustellen, die den Anforderungen hinsichtlich Festigkeit vollkommen gerecht wurden. Besonders günstig wirkt bei diesen Elektroden ein hoher Mangangehalt, durch den selbst bei normal hohem Abbrand Rotbrüchigkeit der Schweißnaht vermieden wird. Diese Tatsache wurde durch eine Reihe schwieriger Schmiederversuche erwiesen.

Zu der grundsätzlichen Frage, ob vorteilhafter blanke oder umhüllte Elektroden zu verwenden sind, gehen die Erfahrungen, ohne die Frage der Wirtschaftlichkeit zu berühren, dahin, daß einer guten umhüllten Elektrode die Vorteile einer höheren Dehnfähigkeit, der leichteren Schweißbarkeit und der größeren Gleichmäßigkeit zukommen. Sie hat jedoch den Nachteil, daß durch stärkere Erwärmung des Grundwerkstoffes stärkere Schrumpfungen

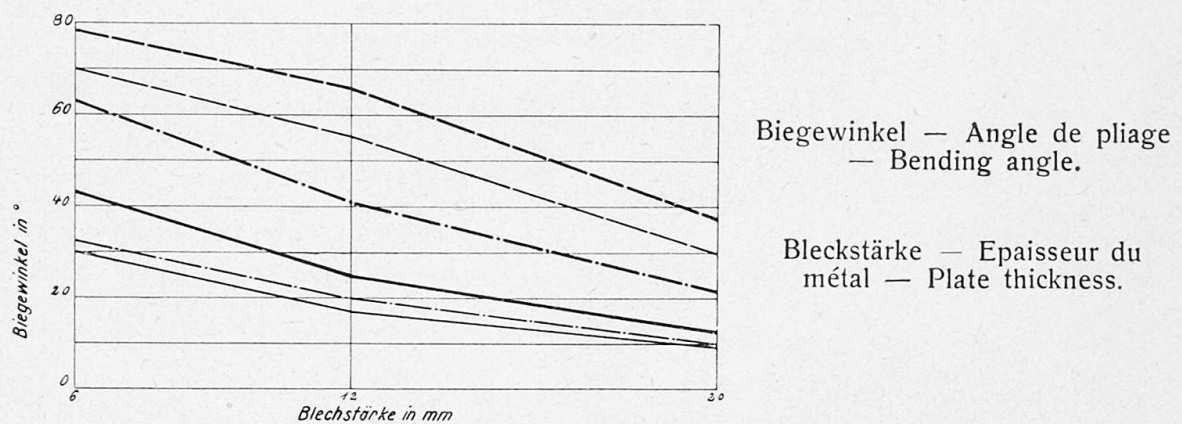


Fig. 15.

Einfluß der Elektroden und Blechstärke auf den Biege Winkel von St 52 (Union-Baustahl).
Influence des électrodes et des épaisseurs du métal sur l'angle de pliage de l'acier St 52 (Union Baustahl).

Influence of electrodes and plate thickness on the bending angle of St. 52 (Union Baustahl).

auftreten, die bei unsymmetrischer Ausbildung einer Konstruktion erhebliche Verziehungen mit sich bringen. Diesem Gefahrenmoment kann man zwar durch entsprechendes Vorbiegen der zu schweißenden Teile begegnen, jedoch ist die Größe der Schrumpfung außer von der Nahtstärke auch vom Schweißer selbst abhängig; man wird deshalb in den seltensten Fällen das richtige Vorbiegemaß treffen. Nachträgliches Richten in kaltem Zustande ist unbedingt zu verwerfen; auch die Anwendung des Schweißbrenners dürfte eher schädlich als günstig wirken. Mit Rücksicht auf diese Nachteile werden von verschiedenen Verbänden umhüllte Elektroden gänzlich verworfen.

Das Streben nach weiterer Gewichtersparnis und erhöhter Wirtschaftlichkeit, das zur vereinigten Verwendung von hochwertigem Baustahl und des Schweißverfahrens führte, hat über die Anwendung der Schweißung im Stahlbau hinaus insofern neue Wege gewiesen, als es die Schwächen, die in der Verarbeitung normaler Walzprofile zu geschweißten Konstruktionen liegen, durch Herstellung geschweißter Doppel-T-Träger aus Union-Baustahl überwand. In gemeinsamer Arbeit mit verschiedenen Instituten ist es der Gesellschaft für Elektroschweißung in Dortmund gelungen, geschweißte Doppel-T-Träger aus St. 52 herzustellen, deren Hauptabmessungen, Trag-

fähigkeit und Widerstandsmomente mit denen der gewalzten Breitflanschträger ungefähr übereinstimmen, gegenüber dem gewalzten oder dem genieteten Träger aus St. 37 jedoch eine Reihe beachtlicher Vorteile aufweisen. Die Herstellung der geschweißten Träger erfolgt in der in Abb. 16 rechts wiedergegebenen Weise unter Benutzung von Nasenprofilen als Flanschen und von Universaleisen als Stehblech, wobei die Schweißverbindung entweder durch Abschmelzen der Nasen mit dem Kohlelichtbogen ohne Zusatzwerkstoffe oder in bekannter Weise durch Metallelektroden geschaffen wird. Unter Verwendung nur dreier Flanschprofile lassen sich zur Zeit 42 verschiedene Querschnittsformen bis zu den größten Höhen herstellen. Außer dieser Vielseitigkeit besitzen die geschweißten Träger eine große Anpassungsfähigkeit an die örtlichen Bedingungen, z. B. bei Bauwerken mit beschränkter

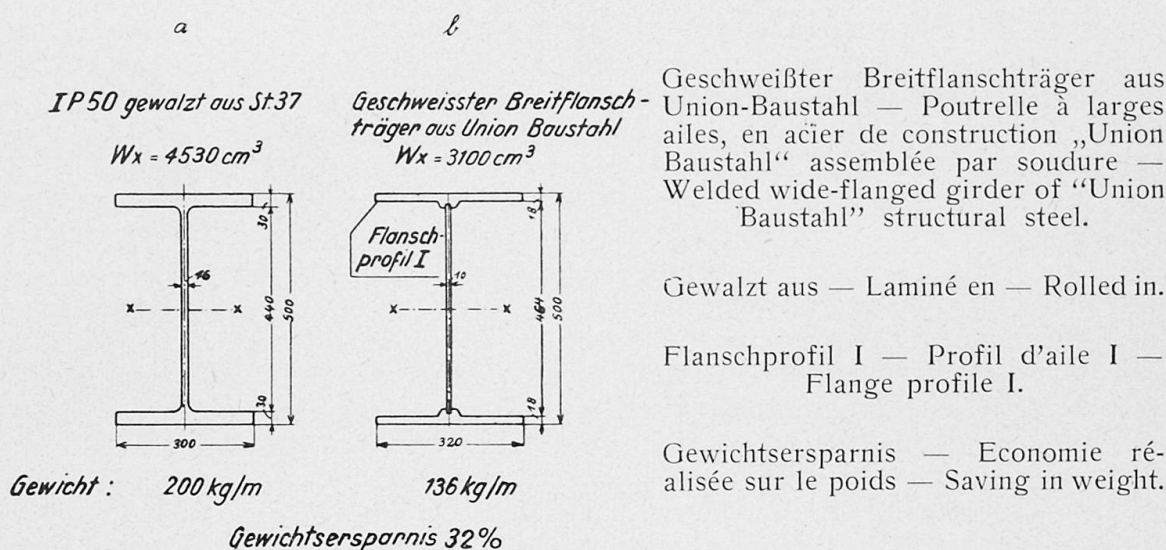


Fig. 16.

Breitflanschträger gleicher Tragfähigkeit und Höhe.
 Poutrelles à larges ailes d'égal capacité et de même hauteur.
 Wide-flanged girders of the same height and carrying capacity.

Bauhöhe insofern, als ein Walzträger aus St. 37 durch einen geschweißten Breitflanschträger aus St. 52 geringerer Höhe, aber gleicher Tragfähigkeit ersetzt werden kann. Auf diese Weise lassen sich an Bauhöhe bis zu 25 % und an Gewicht bis zu 16 % ersparen. Noch größere Gewichtersparnisse werden erzielt, wenn gewalzte Träger aus St. 37 durch geschweißte Breitflanschträger aus Union-Baustahl gleicher Tragfähigkeit und Höhe ersetzt werden. Infolge der verringerten Dicke der Flanschen und des Steges ergeben sich hier Gewichtersparnisse bis zu 37 %. Die geschweißten Breitflanschträger ermöglichen also volle Ausnutzung des Widerstandsmomentes bei beliebiger Wahl aller Abmessungen und sind in ihrer Anwendungsmöglichkeit nahezu unbeschränkt.

III. Über die Dauerfestigkeit geschweißter Verbindungen.

Zwangsläufig mußten die Erkenntnisse über die Dauerfestigkeit gelochter Stäbe und genieteter Verbindungen auch zu der Untersuchung der Dauerfestigkeit von Schweißungen führen. Auch hier wurden zunächst einige ungünstige Ergebnisse veröffentlicht, die Bedenken gegen die Anwendung von Schweißverbindungen in nicht nur rein statisch beanspruchten Bauwerken

wegen der geringen Dauerfestigkeit aufkommen ließen. So fand GRAF für geschweißte Laschenverbindungen aus St. 37 und St. 52 eine Ursprungsfestigkeit von nur 7 kg/mm^2 , d. h. nur etwa 40 % derjenigen einer statisch gleichwertigen Nietverbindung (siehe Abb. 14). Geschweißte Konstruktionsglieder müßten danach schon unterhalb ihrer statisch zugelassenen Beanspruchung versagen, wenn diese Beanspruchung vorwiegend als Schwingungsbeanspruchung auftritt. Allerdings stellte GRAF auf Grund einiger weiterer Versuche ergänzend fest, daß bei überwiegend ruhender Beanspruchung die Verhältnisse auch für die Schweißverbindungen, insbesondere solche aus St. 52, wesentlich günstiger werden.

Die Ursache für die geringe Dauerfestigkeit der geschweißten Laschenverbindungen sieht GRAF im wesentlichen in dem ungünstigen Verlauf des zu übertragenden Kräfteflusses, insbesondere in der mehrfachen Richtungsänderung des Spannungsverlaufes, erst in zweiter Linie sollen die durch den Schweißvorgang verursachten Änderungen der Werkstoffeigenschaften des Stahles sich auswirken. Die Beseitigung oder wenigstens Beschränkung der ersten Ursache ist Aufgabe des schweißgerechten Konstruierens. Dagegen hätte in der Richtung der zweiten Ursache die Arbeit des Stahlherstellers und des Schweißfachmannes einzusetzen, um günstigere Verhältnisse zu erzielen.

Eine erfolgreiche Entwicklung in letzterer Richtung setzt aber voraus, daß bei Untersuchungen diese beiden Faktoren — Spannungs-Übertragung und Änderung der Werkstoffeigenschaften — voneinander getrennt werden. Um daher zunächst einmal den Einfluß der durch den Schweißvorgang veränderten Werkstoffeigenschaften auf die Dauerfestigkeit zu erfassen, wurden im Forschungsinstitut der Vereinigte Stahlwerke A.-G. Dauerbiege- und Dauerzugversuche an Flachstäben mit durch Lichtbogenschweißung aufgelegter Raupe durchgeführt. Es handelte sich also bei diesen Versuchskörpern nicht um Verbindungsschweißungen, sondern lediglich um Flachstäbe mit Walzhaut, die durch Quer- bzw. Längsraupe versteift wurden. Durch diese Anordnung sollte versucht werden, die Wirkung des Schweißvorganges, des Einbrandes und der zwangsläufig damit verbundenen Wärmebehandlung auf die Dauerfestigkeit des Grundwerkstoffes zu ermitteln, wobei allerdings zu berücksichtigen ist, daß jede Querschnittsänderung an sich, also auch die nur aufgelegte Raupe, den Spannungsverlauf stört und ähnlich einer Kerbe die Dauerfestigkeit des glatten Stabes herabsetzt.

In weiteren Versuchsreihen wurden dann ausgesprochene Verbindungsschweißungen mit X-Naht und einseitig abgearbeiteter Raupe geprüft (siehe Abb. 13). Als Elektroden wurden für die aufgelegten Querraupe eine blanke Sonderelektrode St. 37, für die Verbindungsschweißungen blanke und umhüllte Elektroden mit einer der Festigkeit des Grundwerkstoffes entsprechenden Zusammensetzung verwendet. Der Einfluß der Elektroden scheint gegenüber der durchgreifenden Wirkung des Schweißvorganges selbst zurückzutreten. Die Ergebnisse der Dauerbiegeversuche sind in den Vorspanndiagrammen in Abb. 10—12 für St. 37, Union-Baustahl und einen Kohlenstoffstahl mit 62 kg/mm^2 neben den Dauerfestigkeitskurven der glatten und gelochten Stäbe mit Walzhaut mit aufgenommen.

Die mit *AK* bezeichneten Kurven lassen erkennen, daß übereinstimmend mit den früheren Versuchsergebnissen für glatte und gelochte Stäbe auch für die Stäbe mit Schweißraupe bzw. X-Naht mit steigender statischer Vorspannung die Fähigkeit, zusätzliche Schwingungsbeanspruchungen ohne Bruch zu ertragen, abnimmt. Bei den Punkten B_{11} bzw. B_r schneiden die

Dauerfestigkeitskurven die der Streckgrenze. Alle Werte zusammengesetzter Beanspruchung rechts des Punktes *B* führen wieder zu plastischen Verformungen, Beanspruchungen oberhalb der Kurven *AK* verursachen Dauerbruch. Durch eine Querbohrung wird die Wechselfestigkeit bei Union-Baustahl von 25 auf 19 kg/mm², also um etwa 24 %, bei St. 37 von 19 auf 15 kg/mm², also um etwa 20 % herabgesetzt. Beide Kurven verlaufen schwach geneigt, der Einfluß der Vorspannung ist also verhältnismäßig gering. Durch eine Querraupe wird bei Union-Baustahl die Wechselfestigkeit von 25 auf 23 kg/mm², also nur unwesentlich erniedrigt, während bei St. 37 eine Abnahme überhaupt nicht stattfindet. Die Wirkung der durch den Schweißvorgang erzeugten Werkstoffveränderung ist bei St. 37 zwar kleiner als bei Union-Baustahl, die Wechselfestigkeit des Union-Baustahles ist aber doch immer noch um etwa 20 % größer als die des St. 37. Mit steigender ruhender Beanspruchung sinkt die Dauerfestigkeit der Stäbe mit Querraupe bei allen Stäben schneller als bei Stäben mit Querbohrung. Infolgedessen sind geschweißte Stäbe bei höheren statischen Beanspruchungen solchen mit Querbohrung unterlegen.

Bei Stäben mit X-Naht sinkt die Wechselfestigkeit bei Union-Baustahl auf 16, bei St. 37 auf 12 kg/mm². Der geschweißte Union-Baustahl hat eine Ursprungsfestigkeit von 24, der St. 37 eine solche von 22 kg/mm². Beide Stähle besitzen also unter derartigen Prüfbedingungen praktisch die gleiche Dauerfestigkeit, jedoch liegen die Werte wesentlich oberhalb denen, die GRAF für geschweißte Laschenverbindung im Dauerzugversuch feststellte, auch wenn man die Art der Beanspruchung berücksichtigt. Mit steigender ruhender Beanspruchung werden auch hier für Union-Baustahl die Verhältnisse wesentlich günstiger, allerdings sind die Verbindungsschweißungen gebohrten Stäben und wahrscheinlich auch Nietverbindungen um ein Geringes unterlegen.

Wenn danach die Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen aus St. 37 und St. 52 bei überwiegend schwingender Beanspruchung geringer zu sein scheint als diejenige von Nietverbindungen, so liegt doch kein Grund für übertriebene Befürchtungen vor bei Verwendung der Schweißverbindungen bei vorwiegend ruhenden Beanspruchungen. Legt man z. B. für die Stähle St. 37 und St. 52 die für Schweißungen zugelassene Beanspruchung von 7 bzw. 11 kg/mm² als Vorspannung zu Grunde, so besitzt die X-Schweißung aus Union-Baustahl noch einen Schwingungsbereich von ± 17 , der St. 37 noch einen solchen von ± 11 kg/mm², das erscheint ein genügend großer Bereich zusätzlicher Sicherheit. Bei höherer ruhender Beanspruchung — etwa 25 kg/mm² — werden die Verhältnisse für den St. 52 wesentlich günstiger, da hier seine höhere Streckgrenze zur Geltung kommt. Union-Baustahl erträgt bei 25 kg/mm² ruhender Last noch ± 8 , der St. 37 nur ± 1 kg/mm² zusätzlicher Schwingungsbeanspruchung.

Bei stoßartiger Beanspruchung, wie sie z. B. auf dem Krupp'schen Dauer Schlagwerk vorliegt, wiesen X-Schweißungen aus Union-Baustahl naturgemäß geringere Schlagzahlen als der nicht geschweißte Werkstoff, jedoch das gleiche Maß der Überlegenheit gegenüber St. 37 wie bei Vergleich nicht geschweißter Proben auf. Es wurden für Union-Baustahl etwa 2—3fache Schlagzahlen wie bei St. 37 ermittelt, sodaß auch in dieser Richtung kein Grund zu übertriebenen Befürchtungen besteht.

Der härtere Kohlenstoffstahl St. 60 verhält sich bei der Schwingungsprüfung von Stäben mit Querraupe wesentlich ungünstiger als der Union-Baustahl. Die Wechselfestigkeit wird beispielsweise bis auf 17 kg/mm², also

unter den Wert des St. 37 herabgesetzt. Wie die Gefügeuntersuchung in Übereinstimmung mit älteren Beobachtungen zeigte, wächst mit steigendem Kohlenstoffgehalt die durch den Schweißvorgang beeinflusste Zone im Grundmaterial. Gleichzeitig wird mit steigender Festigkeit die Kerbempfindlichkeit bei Schwingungsbeanspruchung erhöht. Beide Faktoren sind als die Ursache für das ungünstige Verhalten des härteren Kohlenstoffstahles anzusehen, sodaß auch zu erwarten ist, daß sich Verbindungsschweißungen aus härterem Kohlenstoffstahl gegenüber Wechselbeanspruchung wesentlich ungünstiger als solche aus St. 37 und St. 52 verhalten.

Wenn also zunächst bei der Anwendung von Schweißverbindungen für vorwiegend schwingend beanspruchte Teile Vorsicht geboten erscheint, so sind doch die übertriebenen Befürchtungen bei der Verwendung von Schweißungen allgemein als ungerechtfertigt zurückzuweisen, besonders für alle Fälle überwiegend ruhender Beanspruchung. Hand in Hand mit der systematischen Untersuchung im Laboratorium kann eine schrittweise gesteigerte Anwendung von Schweißverbindungen aus St. 37 und Union-Baustahl zunächst beim Bau von Straßenbrücken sehr wohl verantwortet werden. Dabei sind allerdings die Aufgaben auf dem Gebiete schweißgerechten Konstruierens mindestens ebenso groß, wie die Aufgaben, die noch in der Werkstoff-Frage zu bearbeiten sind.

Zusammenfassung.

Die Auswertung der im Laboratorium durchgeführten Dauerversuche für die konstruktive Gestaltung wird dadurch erschwert, daß die wirklichen, in größeren Stahlbauwerken auftretenden Beanspruchungen — insbesondere die Anteile von statischen und dynamischen — zur Zeit noch durchaus ungenügend bekannt sind. Damit ergibt sich für den Werkstoffprüfer die Aufgabe, die Dauerfestigkeit nicht nur bei vorwiegend schwingender, sondern auch bei zusammengesetzter ruhender plus wechselnder Beanspruchung zu ermitteln.

Während die Dauerfestigkeit bei überwiegend wechselnder Beanspruchung durch die Ausbildung der Oberfläche — Walzhaut, Bohrungen, Kerbe u. s. w. — mit steigender Zugfestigkeit in wachsendem Maße erniedrigt wird, und daher unter bestimmten Umständen der Baustahl St 52 keine oder eine nur geringe Überlegenheit gegenüber dem St 37 aufweisen kann, tritt der Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit mit steigender ruhender Grundspannung immer mehr zurück; gleichzeitig nimmt die Tragfähigkeit des St 52 gegenüber dem St 37 mit steigender Grundspannung bis zum Verhältnis der Streckgrenzen zu.

Verglichen mit härteren Kohlenstoffstählen und 3%-igem Nickelstahl zeigt der St 52 ein durchaus günstiges Verhalten bei Dauerbeanspruchung.

Die Dauerfestigkeit von Nietverbindungen aus St 52 genügt bei Verwendung eines geeigneten Nietenstahles — St 44 — allen praktischen Ansprüchen.

Das Schweißen von St 52, insbesondere von Union-Baustahl mittels der elektrischen Lichtbogenschweißung ist grundsätzlich als gelöst zu betrachten; der Bau mehrerer Straßenbrücken liefert dafür den besten Beweis.

Die Dauerfestigkeit geschweißter Laschenverbindungen ist bei überwiegend schwingender Beanspruchung geringer als die einer Nietverbindung, doch sind auch hier durch Verbesserung der Kraftübertragung günstigere Verhältnisse zu erzielen. Bei hoher ruhender Grundspannung ist die Schweiß-

verbindung der Nietverbindung zum mindesten als gleichwertig anzusprechen. Die Verwendung geschweißter Verbindungen aus St 52 für vorwiegend ruhend beanspruchte Konstruktionen kann daher schon heute durchaus verantwortet werden.

Résumé.

L'interprétation des résultats des essais de fatigue effectués au Laboratoire, en vue de déterminer les dispositions qu'il convient d'adopter dans la construction est rendue assez difficile du fait que les efforts qui interviennent d'une manière effective dans les charpentes réelles, dont les dimensions sont notablement plus importantes, sont encore actuellement insuffisamment connus; on connaît en particulier mal la répartition entre les charges statiques et les charges dynamiques. Les recherches sur la résistance des matériaux à la fatigue doivent donc être effectuées, non seulement avec des charges oscillantes, mais également avec des systèmes de charges constitués par des charges statiques, auxquelles il faut superposer des charges variables.

Lorsque les charges variables dominent, et par suite de la formation d'une couche superficielle due au laminage, ainsi que par suite des perçages, encochages, etc. . . , la résistance relative à la fatigue diminue de plus en plus rapidement lorsque la charge de rupture du métal croît. Il en résulte que, dans certains cas, la résistance de l'acier de construction St 52 n'est que peu ou pas du tout supérieure à celle de l'acier St 37. Par contre, l'influence de l'état de la surface du métal est de moins en moins importante lorsque la charge fixe de base augmente; simultanément, la capacité de charge de l'acier St 52, par rapport à celle de l'acier St 37, augmente jusqu'à atteindre la valeur du rapport entre les limites d'écoulement.

Par comparaison avec les aciers durs au carbone et avec l'acier à 3 % de nickel, l'acier St 52 se comporte d'une manière tout à fait favorable sous l'influence des efforts de fatigue.

En employant, pour les rivets, un acier convenable, — St 44 par exemple — on assure à tous les assemblages rivés en acier St 52 une résistance à la fatigue qui satisfait à toutes les exigences de la pratique.

On peut considérer comme résolue la question de la soudure à l'arc de l'acier St 52, et en particulier de l'acier „Union-Baustahl“. La construction de plusieurs ponts-routes en constitue le meilleur témoignage.

La résistance à la fatigue des assemblages à recouvrement effectués par soudure est, pour les charges principalement variables, inférieure à celle des assemblages rivés; toutefois, là encore, de meilleurs résultats peuvent être obtenus en améliorant la répartition des efforts dans les assemblages soudés. Pour une charge fixe de base considérable, l'assemblage soudé peut être considéré comme tout au moins équivalent à l'assemblage rivé. On peut donc employer en toute confiance, lorsque les charges fixes dominent, les assemblages en acier St 52 soudés.

Summary.

The practical application of the results of fatigue tests carried out in the laboratory to determine structural form is rendered difficult, because the actual stressings occurring in large steel structures — particularly the components of static and dynamic stressings — are not yet sufficiently investigated. Consequently, the tester of materials should determine the fatigue

strength not only under preponderating vibrating stress, but also under a stressing composed of dead load and alternating load.

Whilst the fatigue strength with preponderating alternating stressing is lowered, to an increasing degree as the tensile strength increases, by the presence of the superficial mill scale, drilled holes, notches, etc., so that consequently under certain circumstances constructional steel St 52 shows no, or only slight, superiority to St 37, the influence of the superficial properties becomes always less important as the basic dead-load stressing increases; at the same time, the carrying capacity of St 52 in comparison with St 37 increases with increasing basic stressing up to the ratio of the yield points.

Compared with harder carbon steels and 3 % nickel steel, St 52 shows much more favourable behaviour under continuous stressing.

The fatigue strength of riveted joints in St 52 is sufficient for all practical demands by adopting a suitable rivet steel — St 44.

The problem of welding St 52, particularly „Union-Baustahl“, by means of arc welding is in principle to be regarded as solved; the building of several road bridges is the best proof of this.

The fatigue strength of welded butt strap joints is, with preponderating vibrating stressing, less than that of a riveted joint, but here also more favourable conditions may be obtained by improving the force transmission. With higher basic dead-load stressing, the welded joint has to be declared at least equally as good as the riveted joint. The adoption of welded joints of St 52 for preponderating permanently stressed structures can now consequently be justified.