

Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht

Band: 2 (1936)

Artikel: Allgemeine Betrachtungen über das Schweißen

Autor: Schaechterle, K.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-2798>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 02.02.2025

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

III a 1

Allgemeine Betrachtungen über das Schweißen.

Considérations générales sur le soudage.

General Considerations on Welding.

Oberbaurat Dr. Ing. K. Schaechterle,
Direktor bei der Reichsbahn, Berlin.

Die Ergebnisse der in den Jahren 1928—1933 in der Materialprüfungsanstalt der Technischen Hochschule Stuttgart von Prof. O. Graf durchgeführten Dauerversuche sind zusammenfassend in meinem Bericht über die „Dauerfestigkeit von Niet- und Schweißverbindungen und die Bemessung dynamisch beanspruchter Konstruktionsteile auf Grund der aus Dauerversuchen gewonnenen Erkenntnisse“ (IVBH., Zürich 1934) wiedergegeben. Inzwischen sind die Erkenntnisse über den Einfluß dynamischer und häufig wechselnder Belastungen auf genietete und geschweißte Konstruktionselemente durch zahlreiche Forschungsarbeiten erweitert und vertieft worden.

In Übereinstimmung mit den Ergebnissen gleichlaufender Untersuchungen anderer Forschungsstellen wurde festgestellt, daß die Dauerfestigkeit der Bau­stähle verschiedener Zusammensetzung und Herkunft durch Unregelmäßigkeiten im Werkstoff, Oberflächenbeschaffenheit und Bearbeitungsgrad beeinflußt wird, daß Einschnürungen und Verdickungen, Bohrungen und Schweißnähte sich hinsichtlich der Dauerfestigkeit ungünstig auswirken, daß bei stetig ansteigender (statischer) Belastung dem Bruch eine weitgehende plastische Verformung vorausgeht, die mit einer Verfestigung durch Kaltreckung verbunden ist, während bei oftmals wiederholten Schwell- und Wechselbelastungen die plastische Verformung und die Verfestigung geringer ist und die Dauerfestigkeitswerte mehr oder weniger tief unter den Reißfestigkeiten liegen, daß bei statischer Belastung Spannungsschwellen und Spannungsspitzen sich durch Spannungsausgleich im plastischen Bereich weniger bemerkbar machen, während bei dynamischer Belastung örtliche Spannungsanhäufungen sich in einer Abminderung der Dauerfestigkeitswerte auswirken, daß insbesondere die Abminderung bei harten Stählen größer ist als bei weichen Stählen, und daß schließlich Stähle, bei denen das Herauf­treiben der Festigkeit und der Streckgrenze mit starker Zunahme der Kerbempfindlichkeit verknüpft ist, für die Zwecke des Brückenbaues ungeeignet sind.

An Prüfstäben aus St. 37 bzw. St. 52 ermittelte Zugfestigkeiten $\sigma_B = 40$ bzw. 57 kg/mm^2 und Ursprungsfestigkeiten $\sigma_U = 27$ bzw. 31 kg/mm^2 ergaben: ein Verhältnis $\frac{\text{Ursprungsfestigkeit}}{\text{Zugfestigkeit}} = 0,68$ für St. 37 und $0,55$ bei St. 52. Am gelochten Stab sind die Verhältniszahlen $0,50$ bei St. 37 und $0,36$ bei St. 52

ermittelt worden. Die Abminderung ist bei St. 52 größer als bei St. 37, was auf die höhere Kerbempfindlichkeit der St. 52 zurückzuführen ist.

Der gewöhnliche Baustahl St. 37 ist sowohl für Nietung als auch Schweißung geeignet. Die hochwertigen Stähle St. 52 verschiedener Zusammensetzung und Herkunft weisen hinsichtlich der Schweißbarkeit recht erhebliche Unterschiede auf. Mechanisch und thermisch nicht einwandfrei behandelte, hoch gekohlte und legierte Stähle haben schon zu Mißerfolgen geführt. Bei einem Stahl St. 52 mit C 0,25 %, Mn 1,20 %, Si 0,76 %, Cu 0,5 %, S und P 0,023 %, der sich durch hohe Festigkeit ($\sigma_B = 58 \text{ kg/mm}^2$) und Streckgrenze ($\sigma_F = 44 \text{ kg/mm}^2$) bei 20 % Dehnung auszeichnete, jedoch von der Randzone ausgehende feinste rißartige Kerben zeigte, sind durch das Verschweißen und die unvermeidlichen Schrumpfspannungen gefährliche Risse aufgetreten. Bei Stählen St. 52 mit glatter, kerbfreier Oberfläche und einer Zusammensetzung von C unter 0,18 % und Si unter 0,5 % sind solche Erscheinungen bis jetzt nicht beobachtet worden. Hiernach muß für geschweißte Konstruktionen aus St. 52 die günstigste Zusammensetzung des Werkstoffs durch Versuche bestimmt werden. Außerdem ist festzustellen, mit welchem Schweißstab die beste Schweißverbindung mit dem gewählten Mutterwerkstoff entsteht, am einfachsten durch Prüfung der meist verwendeten Elektroden an Probestäben mit Stumpfnähten im Dauerversuch (Ursprungsfestigkeit). Vom Grundwerkstoff und Schweißgut ist die Zusammensetzung und der Aufbau (Gefügebild) sowie die Schweißrissigkeit festzustellen.

I. Im Jahr 1931 sind die ersten deutschen „Vorschriften für geschweißte Stahlbauten“ (Din 4000 für Hochbau und Brücken) erschienen, die sich auf statische Versuche des Materialprüfungsamtes Dresden stützten. Man glaubte damals, daß die Verbindung mit Kehlnähten zuverlässiger sei als der Stumpfstoß und deckte dementsprechend die Stöße nach dem Vorbild der genieteten Konstruktionen mit Laschen. Geschweißte Brücken wurden im übrigen gleich behandelt wie die altbewährten genieteten Tragwerke, also für die Querschnittsbemessung dieselben Formeln vorgeschrieben; z. B. bei Wechselbeanspruchung

und St. 37
$$\sigma = \frac{M \max - 0,3 M \min}{W_n} \leq \sigma_{zul} \leq 14 \text{ kg/mm}^2.$$
 Für Schweiß-

nähte im Schwellbereich wurde die amerikanische Formel $M = \max M + \frac{1}{2} (\max M - \min M)$ eingeführt. Die ersten Dauerversuche mit geschweißten Konstruktionselementen brachten gegenüber den statischen Versuchen überraschende Ergebnisse. Sie zeigten, daß die Leistungsfähigkeit einer Schweißverbindung nicht nur von den Festigkeitseigenschaften der Schweiße, den durch die thermische Beeinflussung während des Schweißvorgangs geänderten Eigenschaften des Mutterwerkstoffes in der Übergangzone, sondern in noch höherem Maße von dem Kraftfluß abhängig ist und daß für den Eintritt des Dauerbruches der gestaltlich bedingte innere Spannungszustand in erster Linie maßgebend ist. Der Stumpfstoß mit ungestörtem Kraftfluß lieferte wesentlich bessere Schwellzugfestigkeiten als die Laschenverbindung mit Kehlnähten, bei der die Kräfte abgelenkt werden und Spannungsspitzen entstehen. Als man die Stumpfnahverbindung zusätzlich durch Laschen mit Kehlnähten deckte, sank die Dauerfestigkeit im Schwell- und Wechselbereich zum Teil beträchtlich. Der Dauerbruchanriß ging dabei von den Stirnkehlnähten aus, bei denen im übrigen entgegen den bisherigen Anschauungen leichte Hohlkehlnähte mit allmählichem

Übergang der Schweiße zum Blech bessere Ergebnisse lieferten als volle Kehlnähte. Unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse hat man daraufhin in Din 4100 vom Jahre 1933 eine Ausnutzung der Stumpfnah mit $\frac{4}{5}$ der zulässigen Beanspruchung des Mutterwerkstoffes zugelassen. Diese Bestimmung führte zur Anordnung von Schrägnähten. Weitere Versuche zeigten jedoch, daß durch die Verlängerung der Schweißnaht eine Erhöhung der Dauerfestigkeit der Verbindung gegenüber einer senkrechten Stumpfnah nicht zu erzielen war. Andererseits konnte bei Laschen-Verbindungen durch bauliche Maßnahmen, wie Anschärfen der Laschenenden zur Erzielung eines stetigen Querschnittsüberganges und sorgfältige Nachbearbeitung der Kehlnähte mit Fräser, besonders am Beginn der Flankenkehlnähte die Dauerfestigkeit gesteigert werden. Die Vorschriften mußten hiernach nochmals geändert und neu bearbeitet werden, wobei eine grundsätzliche Trennung in statisch beanspruchte und in vorwiegend dynamisch beanspruchte Tragwerke durchgeführt wurde.

Werden die Dauerfestigkeiten eines gewöhnlichen oder hochwertigen Baustahls in einem Festigkeits-Diagramm aufgetragen, so erhält man die in Fig. 1 dargestellte σ_0 -Linie, bezogen auf die untere Spannung σ_u . Die Schwingweite $\sigma_s = \sigma_0 - \sigma_u$ ergibt sich aus dem Abstand der σ_0 -Linie von der unter 45° geneigten σ_u -Linie. Die schraffierte Fläche ist der Schwingbereich. Wegen der mit dem Überschreiten der Fließ- bzw. Quetschgrenze verbundenen Verformungen scheidet die über diese Grenzen hinaus sich erstreckenden Teile des Diagrammes für die praktische Ausnützung aus. In dem verbleibenden Bereich darf die Dauerfestigkeitskurve angenähert durch eine Gerade ersetzt werden. Die Schwingweite nimmt gegen die Fließgrenze etwas ab. Mit hinreichender Genauigkeit darf bei Schweißkonstruktionen im Zug- und Druckgebiet nach den Versuchen von Professor Graf die Schwingweite σ_s durchweg gleich groß, also $\sigma_s = \sigma_U = 2 \sigma_W$ angenommen werden.

Maßgebend für die Bemessung von Brückenteilen, die durch die Verkehrslasten schwingend beansprucht werden, sind die Größtwerte der Normalkräfte, Querkkräfte und Biegemomente unter der Einwirkung der ruhenden Last und der mit der Stoßzahl φ vervielfachten Verkehrslast. Die mit den Größtwerten errechneten Spannungen müssen in dem durch die Spannungshäuschen gegebenen sicheren Bereich ($\sigma_{D,zul}$) bleiben.

Mit den Ergebnissen der Kuratoriumsversuche (Dauerfestigkeitsversuche mit Schweißverbindungen, Berlin 1935, VDI-Verlag) sind von dem Arbeitsausschuß zur Aufstellung von Vorschriften für geschweißte Eisenbahnbrücken, dem Vertreter der Wissenschaft und Praxis angehörten, die in Fig. 2a und 2b dargestellten Spannungshäuschen festgesetzt worden.

Unverkennbar tritt darin das Bestreben zutage, die zulässigen Spannungen möglichst hochzutreiben. Man ist mit den $\sigma_{D,zul}$ -Werten sehr nahe an die aus Versuchen ermittelten Wechselfestigkeitswerte (Mittelwerten bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel) herangegangen, so daß die Spanne z. T. nur 1 kg/mm^2 beträgt. Dabei sind die unvermeidlichen Schrumpfspannungen nicht berücksichtigt. Unter Beibehaltung des Berechnungsverfahrens der BE. sind neben dem auf ungestoßene Bauteile abgestellten Schwingungsbeiwert γ noch veränderliche Formbeiwerte α eingeführt worden, um die dynamisch beanspruchten Bauteile wie solche mit ruhender Belastung behandeln zu können. Bei dem Spannungsnachweis ent-

sprechend $\sigma_I = \frac{\gamma}{\alpha} \cdot \frac{\max M_I}{W_n} \leq \sigma_{zul}$ werden die aus ständiger Last und Verkehrslast sich ergebenden Größtwerte der Biegemomente ($M_I = M_g + \varphi \cdot M_P$) mit dem Schwingungsbeiwert γ vervielfältigt und die verschiedenen Bauarten und Schweißbearbeitungen durch die Formzahl α erfaßt. Man rechnet also mit gedachten Spannungen σ_I , während die tatsächlich auftretenden Spannungen sich

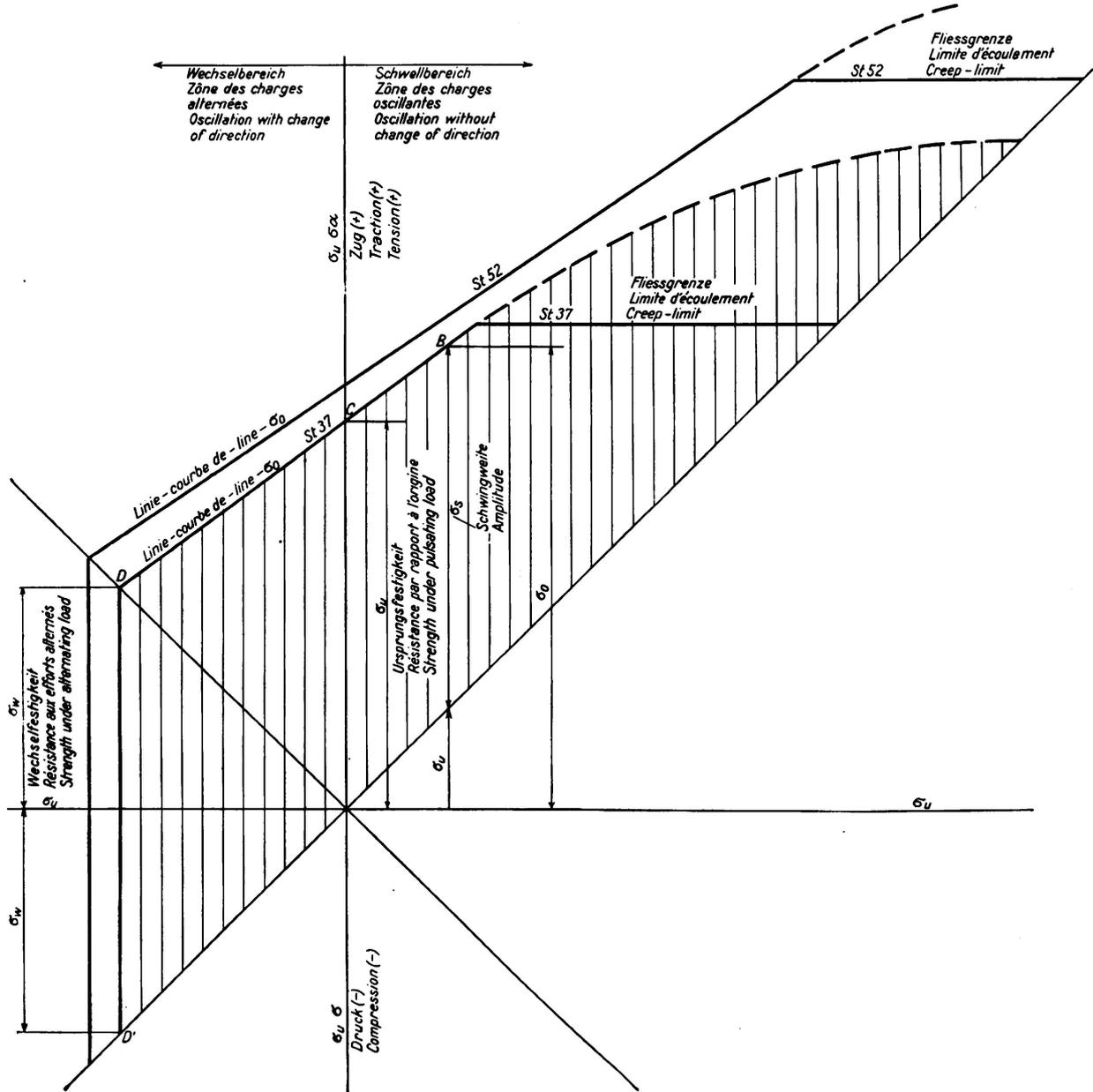


Fig. 1.

Linie der Dauerfestigkeiten (σ_0 -Linie) für St. 37 und St. 52 Zug.

rückwärts aus $\sigma_{max} = \frac{\alpha}{\gamma} \cdot \sigma_I \left(= \frac{\max M_I}{W_n} \right)$ ergeben. Die γ - und α -Werte für Eisenbahnbrücken sind aus den Tabellen 1, 2 und 3 der „Vorläufigen Vorschriften für geschweißte vollwandige Eisenbahnbrücken“ zu entnehmen. Die

γ -Werte, die von dem Verhältnis $\frac{\min S_I}{\max S_I}$ bzw. $\frac{\min M_I}{\max M_I}$... abhängig sind, folgen aus den Spannungshäuschen für $\alpha = 1$. Für die α -Werte, bezogen auf $\frac{\min S_I}{\max S_I}$ bzw. $\frac{\min M_I}{\max M_I}$, ergeben sich leicht gekrümmte Linien, die in den Vorschriften

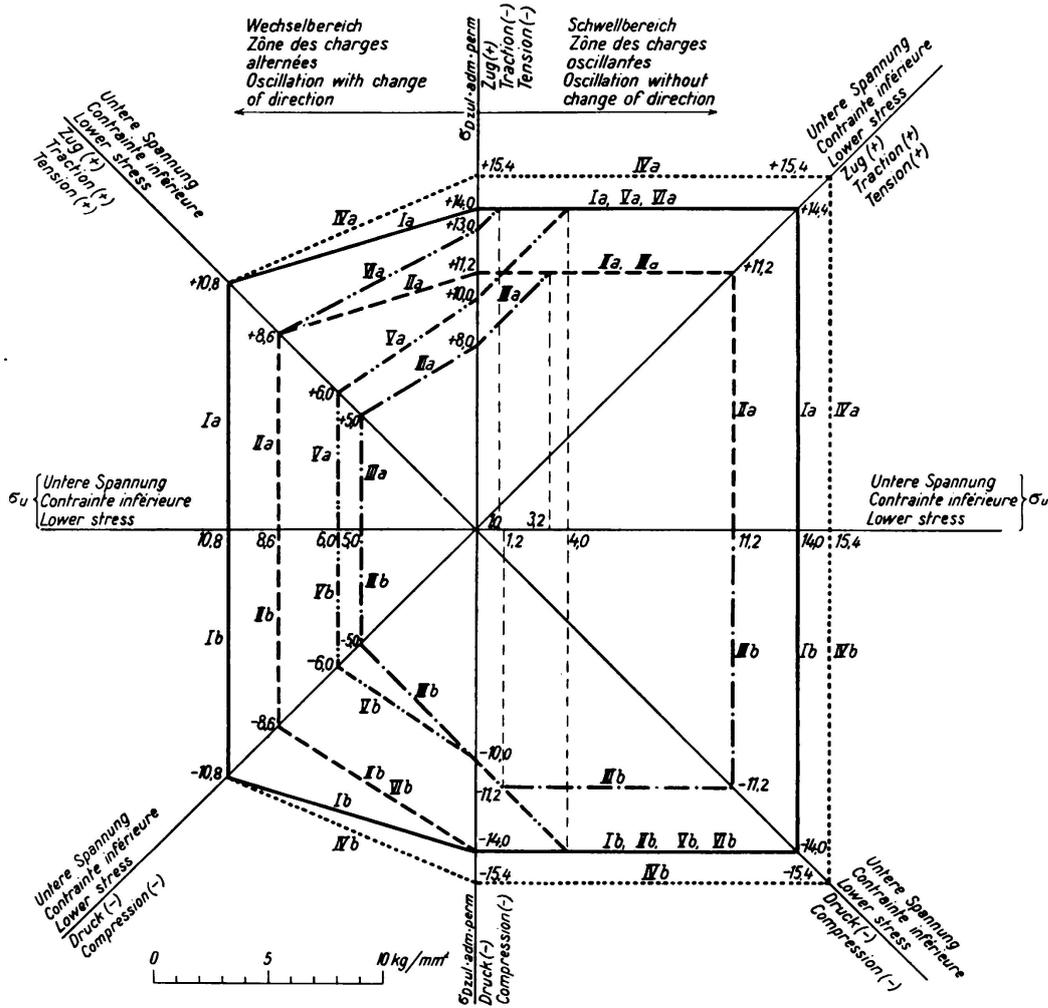


Fig. 2 a.

Schaubild der zulässigen Spannungen σ_{Dzul} bei geschweißten Brücken aus St. 37.

- I a, I b ungestoßene Bauteile im Zug- und Druckgebiet.
- II a gestoßene Bauteile im Zuggebiet in der Nähe von Stumpfnähten und die Stumpfnähte selbst, wenn die Wurzeln nachgeschweißt und die Nähte bearbeitet sind.
- II b dasselbe wie bei II a im Druckgebiet.
- III a, III b dasselbe wie bei II a, II b wenn die Wurzel nicht nachgeschweißt werden kann.
- IV a, IV b zulässige Hauptspannungen nach der Formel

$$\sigma = \frac{\sigma_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_I^2 + 4\tau_I^2}$$

- V a, V b Bauteile in der Nähe von Stirnkehlnähten und am Beginn von Flankenkehlnähten. Stirnnahtübergänge und Flankenkehlnähtenden unbearbeitet.
- VI a, VI b dasselbe wie bei V a und V b bei bester Bearbeitung der Stirnnahtübergänge und der Flankenkehlnähtenden.

näherungsweise durch Geraden ersetzt wurden. Die Bemessung geschweißter Eisenbahnbrücken wird durch die gewählte Berechnungsform nicht einfacher und anschaulicher. Die Abminderungen der zulässigen Spannungen, die aus dem

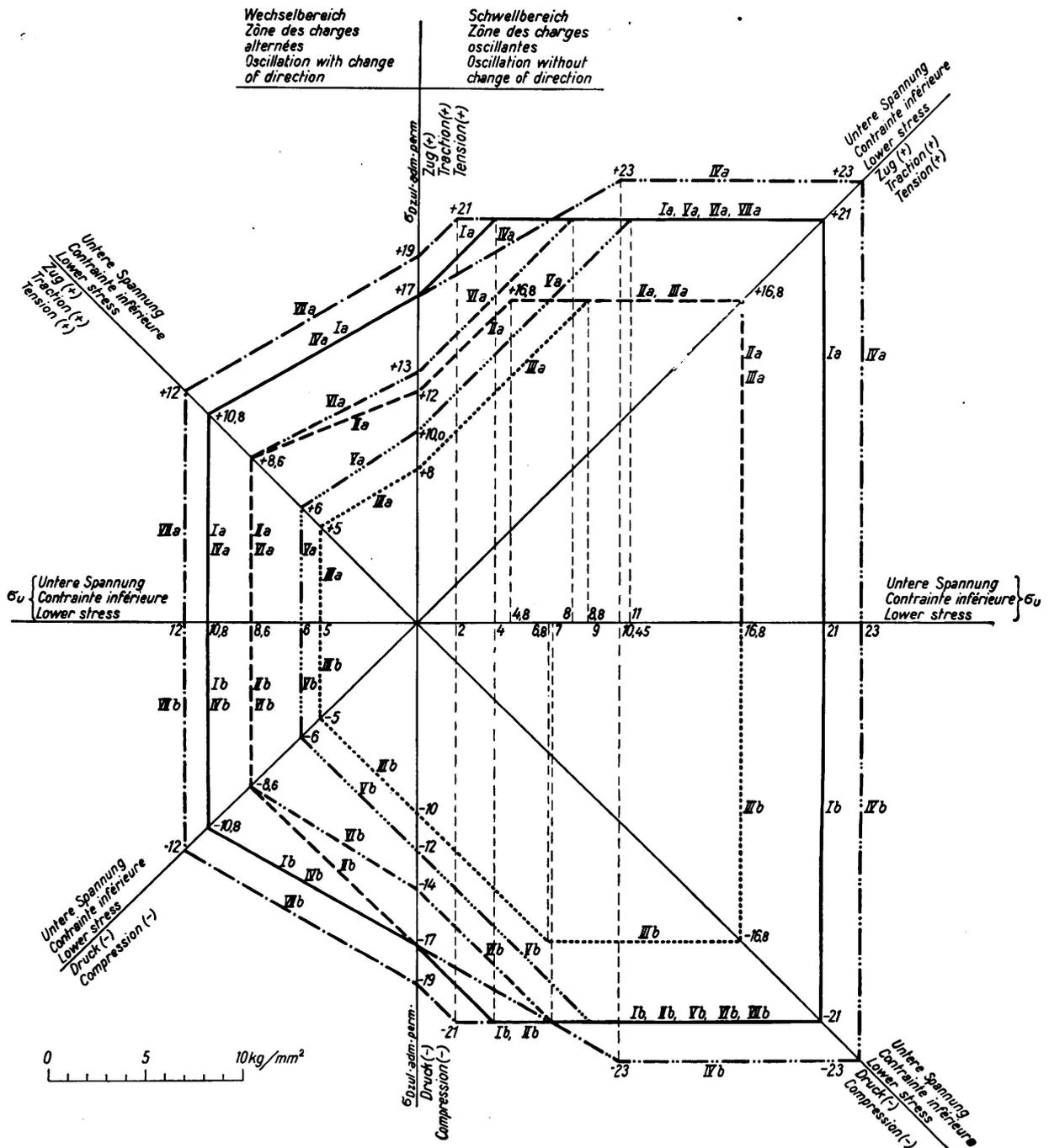


Fig. 2 b.

Schaubild der zulässigen Spannungen σ_{Dzul} bei geschweißten Brücken St. 52.

- I a, I b ungestoßene Bauteile im Zug- und Druckgebiet bei starkem Verkehr (mehr als 25 Züge am Tage auf jedem Gleis).
- II a gestoßene Bauteile im Zuggebiet in der Nähe von Stumpfnähten und die Stumpfnähte selbst, wenn die Wurzeln nachgeschweißt und die Nähte bearbeitet sind.
- II b dasselbe wie bei II a im Druckgebiet.
- III a, III b dasselbe wie bei II a, II b wenn die Wurzel nicht nachgeschweißt werden kann.

IVa, IVb zulässige Hauptspannungen nach der Formel

$$\sigma = \frac{\sigma_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_I^2 + 4 \tau_I^2}$$

- Va, Vb Bauteile in der Nähe von Stirnkehlnähten und am Beginn von Flankenkehlnähten. Stirrnahtübergänge und Flankenkehlnähtenden unbearbeitet.
 VIa, VIb dasselbe wie bei Va und Vb bei bester Bearbeitung der Stirrnahtübergänge und der Flankenkehlnähtenden.
 VIIa, VIIb dasselbe wie bei Ia, Ib bei schwachem Verkehr (bis zu 25 Zügen im Tage auf jedem Gleis).

Spannungshäuschen klar und eindeutig ersichtlich sind, werden durch die Beiwerte verschleiert. Der natürliche Weg ist doch der, nachzuweisen, daß die Größtspannungen (σ_{\max}), die die statische Berechnung liefert, in jedem Fall in dem durch die Spannungshäuschen gekennzeichneten zulässigen Bereich liegen. Der entwerfende Ingenieur wird durch die Abminderung der zulässigen Spannungen zum wirtschaftlichen und schweißgerechten Konstruieren angehalten, also beispielsweise Stumpfstöße an Stelle von Laschenverbindungen zu wählen, die Trägerstöße in die Nähe von Momentennullpunkten zu verlegen, die Halsnähte der Vollwandträger von den Gurtplatten abzurücken u. a. m.

Wird die Schwingungsweite durchweg gleich groß angenommen, so ergibt sich aus der allgemeinen Formel für nach der Fließ- oder Quetschgrenze stetig abnehmende Schwingweite

$$\sigma_D \text{ zul} = \frac{\sigma_U \text{ zul}}{1 - \frac{\sigma_U \text{ zul} - \sigma_W \text{ zul}}{\sigma_W \text{ zul}} \cdot \frac{\min S}{\max S}} = \frac{\max S}{F_{\text{erf}}}$$

mit $\sigma_S = \sigma_U = 2 \sigma_W$ die einfache Bemessungsformel,

$$F_{\text{erf}} = \frac{\max S - \min S}{\sigma_U \text{ zul}},$$

die auf *Wöhler* zurückgeht. Das Berechnungsverfahren wird dadurch außerordentlich vereinfacht. Die Tabellen fallen weg. Man braucht nur die Grundspannungen, nämlich die zulässigen Schwingweiten, $\sigma_S \text{ zul}$, die Abminderungsbeiwerte für Stumpfstöße (= 0,8) und für Laschenverbindungen mit Stirn- und Flankenkehlnähten (0,65 bis 0,75) im Gedächtnis festzuhalten, und kann damit die Bemessung ohne Tabellenwerte durchführen.

Unter diesen vereinfachenden Annahmen gelten nach den heutigen Erkenntnissen für ungestoßene durchgehende Bauteile aus $\left\{ \begin{array}{l} \text{St. 37} \\ \text{St. 52} \end{array} \right\}$ im $\left\{ \begin{array}{l} \text{Zug-} \\ \text{Druck-} \end{array} \right\}$ gebiet die Linien $\left\{ \begin{array}{l} \text{Ia} \\ \text{Ib} \end{array} \right\}$ mit einer Schwingweite $\sigma_S \text{ zul} = \sigma_U \text{ zul} = 2 \sigma_W \text{ zul} = \left\{ \begin{array}{l} 14 \\ 16 \end{array} \right\} \text{ kg/mm.}^2$ Für stumpfgestoßene Bauteile (Nahtwurzel nachgeschweißt und Nahtübergänge bearbeitet) gilt im Zuggebiet die Linie IIa mit einer Schwingweite für $\left\{ \begin{array}{l} \text{St. 37} \\ \text{St. 52} \end{array} \right\}$ $= \left\{ \begin{array}{l} 0,8 \cdot 14 = 11,20 \\ 0,8 \cdot 16 = 12,80 \end{array} \right\} \text{ kg/mm}^2$. Stumpfnähte im Druckgebiet dürfen ebenso beansprucht werden wie ungestoßene, durchgehende Bauteile (Linie IIb). Für

Bauteile in der Nähe von Stirnkehlnähten und am Beginn von Flankenkehlnähten und am Beginn von Flankenkehlnähten und Kehlnahtenden (Nahtübergänge sorgfältig bearbeitet) gelten die Linien IIIa und IIIb = $\left\{ \begin{matrix} 0,75 \cdot 14 = 10,5 \\ 0,75 \cdot 16 = 12,0 \end{matrix} \right\}$ kg/mm². Sind die Nähte unbearbeitet, so gelten die Linien IVa und IVb, für $\left\{ \begin{matrix} \text{St. 37} \\ \text{St. 52} \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} 0,65 \cdot 14 \\ 0,65 \cdot 16 \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} 9,1 \\ 10,4 \end{matrix} \right\}$ kg/mm². (Fig. 3a und 3b).

II. Was die Auswirkung der Versuchsforschung auf die praktische Ausführung anlangt, so haben die Dauerversuche dazu beigetragen, durch geschickte Form-

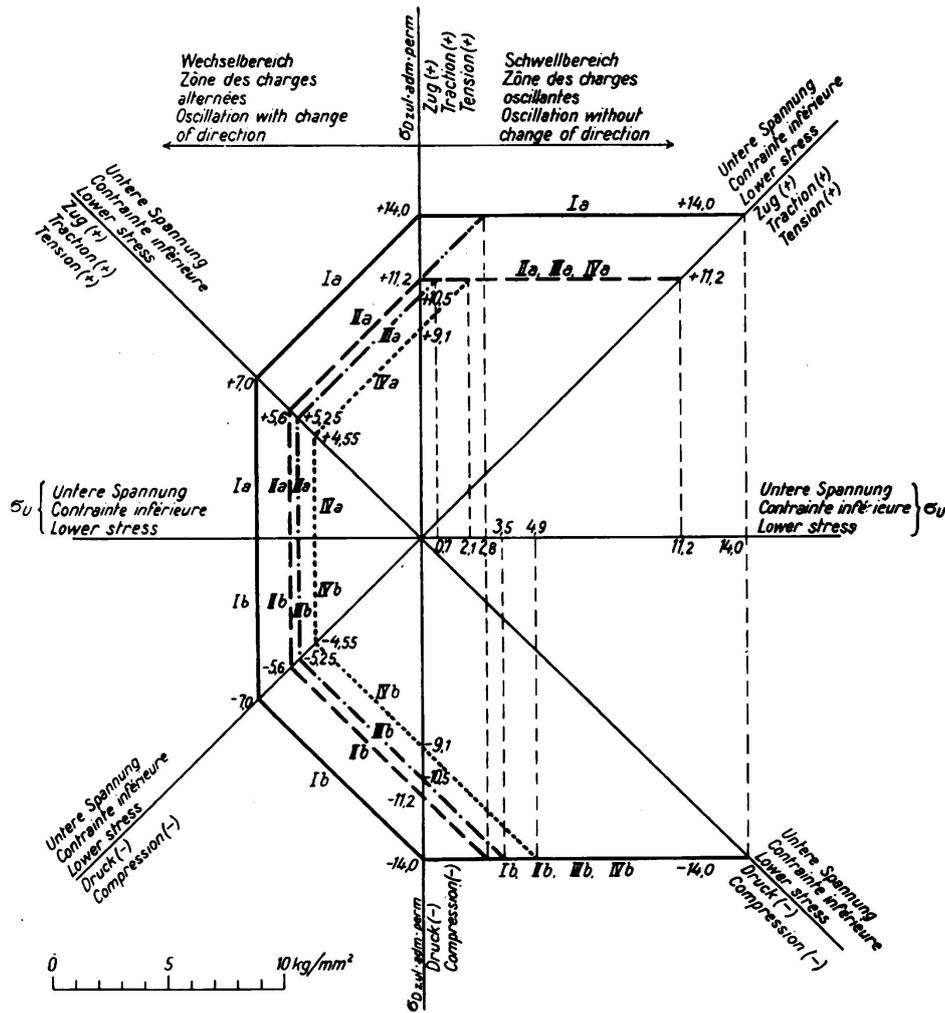


Fig. 3 a.

Schaubild der zulässigen Spannungen σ_{Dzul} bei geschweißten Brücken aus St. 37.

- I a, I b ungestoßene Bauteile im Zug- und Druckgebiet. $\sigma_u = 14$ kg/mm².
- II a, II b gestoßene Bauteile im Zug- und Druckgebiet in der Nähe von Stumpfnähten und die Stumpfnähte selbst, wenn die Wurzeln nachgeschweißt und die Nähte bearbeitet sind. $\sigma_u = 0,8 \cdot 14 = 11,2$ kg/mm².
- III a, III b Bauteile im Zug- und Druckgebiet in der Nähe von Stirnkehlnähten und am Beginn von Flankenkehlnähten. Stirnnahtübergänge und Flankenkehlnahtenden sorgfältig bearbeitet. $\sigma_u = 0,75 \cdot 14 = 10,5$ kg/mm².
- IV a, IV b dasselbe wie vor im Zug- und Druckgebiet. Stirnnahtübergänge und Flankenkehlnahtenden unbearbeitet. $\sigma_u = 0,65 \cdot 14 = 9,1$ kg/mm².

gebung die Werkstoffeigenschaften besser auszunützen und so an Gewicht zu sparen, gleichzeitig die Sicherheit und Zuverlässigkeit der geschweißten Tragwerke zu erhöhen. Während die Beurteilung der Schweißverbindungen auf

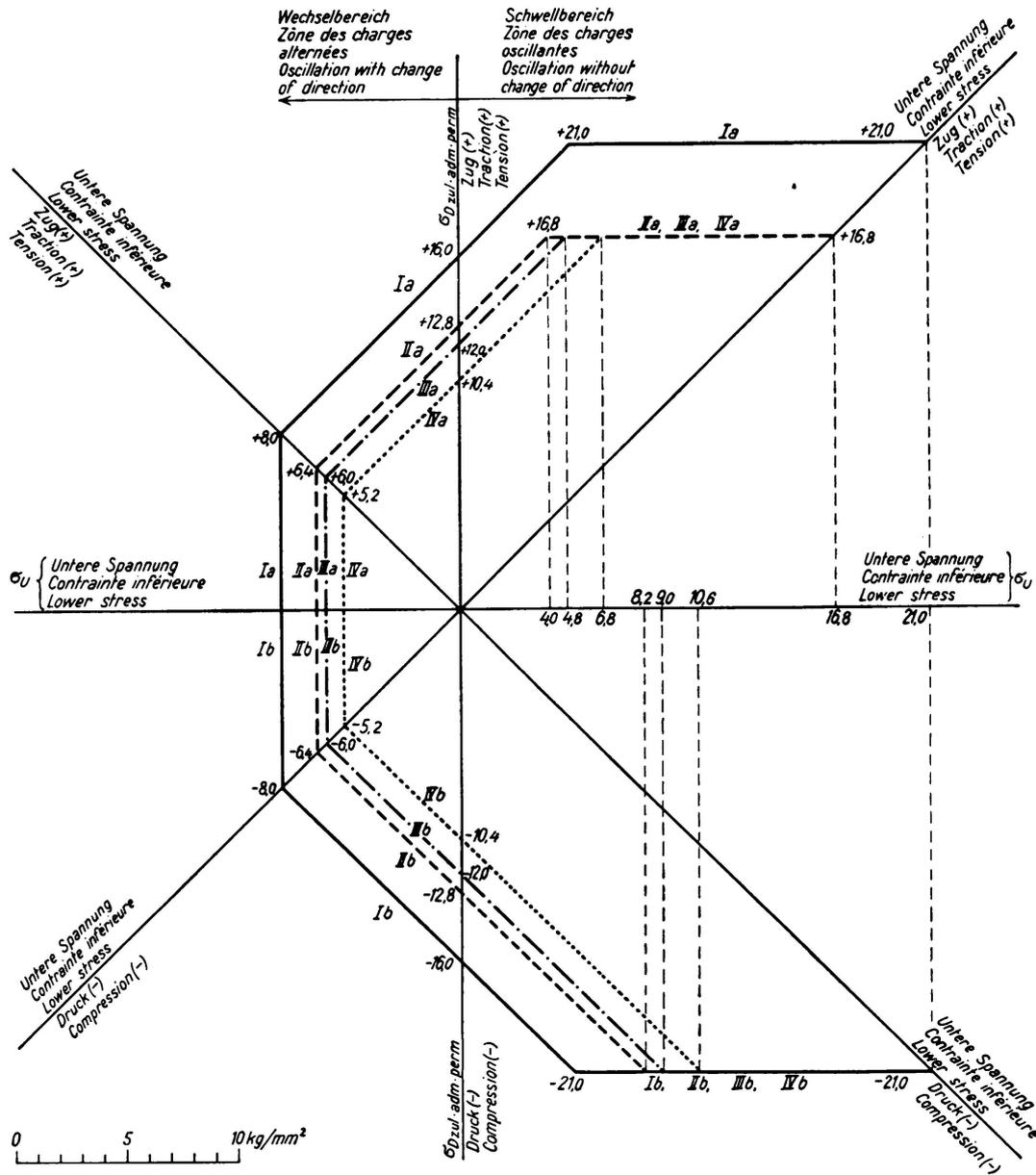


Fig. 3 b.

Schaubild der zulässigen Spannungen σ_{zul} bei geschweißten Brücken aus St. 52.

- I a, I b ungestoßene Bauteile im Zug- und Druckgebiet. $\sigma_u = 16 \text{ kg/mm}^2$.
- II a, II b gestoßene Bauteile im Zug- und Druckgebiet in der Nähe von Stumpfnähten und die Stumpfnähte selbst, wenn die Wurzeln nachgeschweißt und die Nähte bearbeitet sind. $\sigma_u = 0,8 \cdot 16 = 12,8 \text{ kg/mm}^2$.
- III a, III b Bauteile im Zug- und Druckgebiet in der Nähe von Stirnkehlnähten und am Beginn von Flankenkehlnähten. Stirnnahtübergänge und Flankenkehlnähtenden sorgfältig bearbeitet. $\sigma_u = 0,75 \cdot 16 = 12,0 \text{ kg/mm}^2$.
- IV a, IV b dasselbe wie vor im Zug- und Druckgebiet. Stirnnahtübergänge und Flankenkehlnähtenden unbearbeitet. $\sigma_u = 0,65 \cdot 16 = 10,4 \text{ kg/mm}^2$.

Grund von statischen Versuchen oft zu falschen Schlüssen und abwegigen Konstruktionen geführt hat, es sei nur an die Vorschläge zur Verbesserung der Nietverbindungen durch Flankenkehlnähte erinnert, an die Bevorzugung der Laschenverbindung vor dem Stumpfstoß und anderes mehr, haben die Dauerversuche wesentlich zum schweißgerechten Konstruieren beigetragen. Die erste Forderung schweißgerechten Konstruierens ist „alles zu vermeiden, was die Dauerfähigkeit nachteilig beeinflußt“. Durch die aus Dauerversuchen gewonnenen Erkenntnisse ist eine Wandlung in der baulichen Durchbildung geschweißter Tragwerke eingetreten. Der Schweißkonstrukteur hat sich mehr und mehr von den Nietformen freigemacht. Er hat gelernt, die Tragwerke aus möglichst wenigen, leicht verschweißbaren Einzelteilen zusammensetzen, nachteilige Anhäufungen von Schweißnähten, Umlenkungen des Kraftflusses durch Laschen oder scharfe Richtungswechsel, Spannungstauungen durch plötzliche Querschnittsänderungen zu vermeiden oder weitgehend zu mildern und schließlich mit Rücksicht auf die unvermeidlichen Wärme- und Schrumpfspannungen die Nahtlängen und die Nahtquerschnitte auf ein Mindestmaß zu beschränken.

Die wichtigste Bauform im Brückenbau ist heute der aus Blechen und Sonderprofilen verschiedener Breite und Dicke zusammengesetzte, geschweißte Vollwandträger. Durch zahlreiche Bauausführungen ist für Vollwandbalkenbrücken die Eignung und Wirtschaftlichkeit der Schweißung erwiesen. Mit geschweißten Vollwandträgern sind dank der Initiative von Geheimrat Dr.-Ing. e. h. und Dr.-techn. h. c. *Schaper* Stützweiten bis 54 m ausgeführt worden (Rügendamm).

Für kleinere und mittlere Spannweiten werden die geschweißten Träger mit I-Querschnitt nach dem Vorbild der Walzträger ausgeführt. Dabei ist man in der Wahl der Abmessungen freier, weil man nicht wie beim Walzträger aus walztechnischen Gründen an bestimmte Verhältnisse gebunden ist. Neben den I-Querschnitten kommen noch geschweißte Kasten- und Hohlquerschnitte vor.

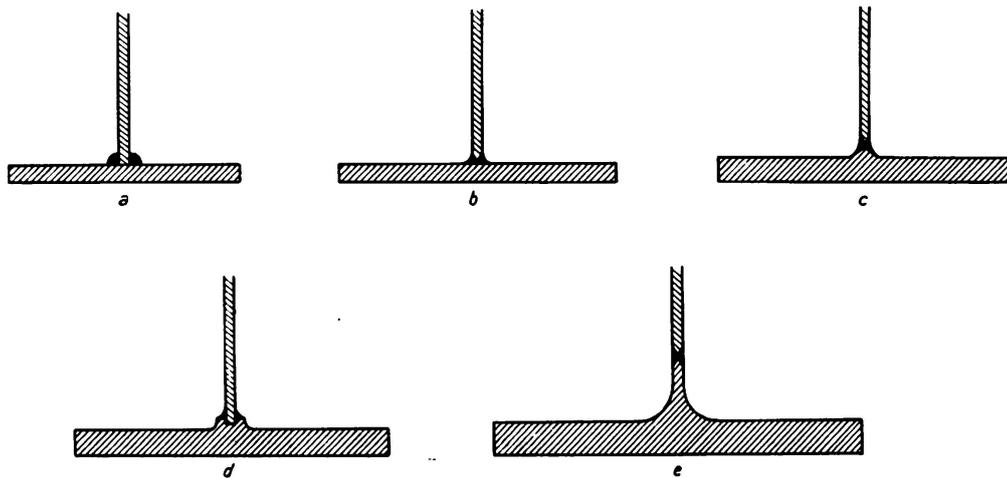


Fig. 4.

Bei den ersten geschweißten Vollwandträgern (Fig. 4) hat man die Gurtplatten durch volle Kehlnähte mit dem Stegblech verbunden (Fig. 4a). Auf Grund von Erfahrungen und Versuchen wurden dann die Stegbleche angeschrägt und beiderseitige Hohlkehlnähte angeordnet (Fig. 4b), wobei sich aber

bei dicken Stegblechen Schwierigkeiten hinsichtlich des Durchschweißens der Wurzel ergaben. Man ist deshalb zur Herstellung von Sonderprofilen für die Gurtplatten übergegangen, von denen die Nasenprofile der Dortmunder Union mit Kehlnahtanschluß (Fig. 4d), die Wulstprofile von *Dr. Dörnen* (Fig. 4c) und die Kruppschen Rippenplatten, die mit dem Stegblech stumpf verschweißt werden, zu erwähnen sind. Bei letzteren wurden durch die Wegverlegung der Halsnähte vom Gurt in die Zone geringerer Beanspruchung und durch die Schaffung eines stetigen Überganges vom Gurt zum Stegblech günstigere Spannungsbedingungen für die Halsnaht geschaffen und die Einkerbungen der Gurtung vermieden (Fig. 4e). Außerdem ergab sich der Vorteil, daß die von der Gurtung abliegende Naht für die Nachprüfung zugänglich bleibt und leicht durchstrahlt werden kann.

Aus wirtschaftlichen Gründen kann bei Trägern größerer Stützweite auf eine Abstufung der Gurtquerschnitte entsprechend dem Momentenlinienverlauf nicht verzichtet werden. Man hat zunächst in solchen Fällen zusätzliche Gurtverstärkungsplatten paketartig übereinander gesetzt und mit Kehlnähten verschweißt

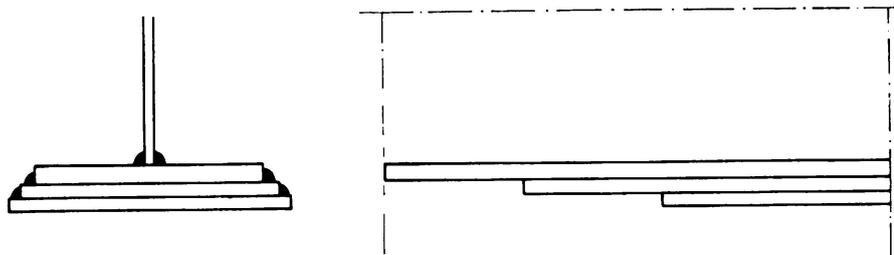


Fig. 5.

(Fig. 5). Diese Anordnung ist baulich nicht einwandfrei, weil dabei nur die innere Gurtplatte des Paketes an das Stegblech angeschlossen wird, da die Verbindung von breiten Platten durch außenliegende Kehlnähte ungenügend ist und weil beim Schweißen der Kehlnähte die breiten Platten sich wölben und dadurch die Gefahr des Ausbeulens in der Druckzone erhöht wird. Diese Mängel werden gemildert, wenn Gurtplatten verschiedener Dicke angeordnet und mit

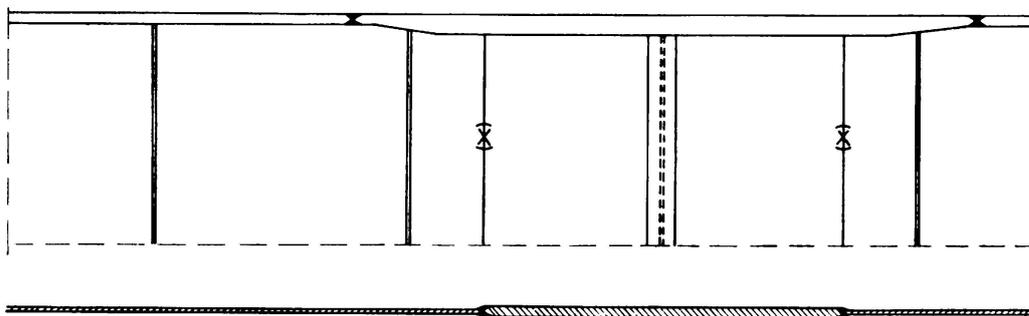


Fig. 6.

allmählichem Übergang durch Stumpfnähte verbunden werden (Fig. 6). Die Verdickung wird gewöhnlich nach innen gelegt, um ebene Außengurtflächen zu erhalten. Eine gute Ausführungsform ergibt sich durch Verwendung von Nasen- und Rippenprofilen und die Einschweißung von zweiteiligen Gurtver-

stärkungsplatten auf der Innenseite (Fig. 7a bis c). Dazu ist der Stegansatz genügend hoch und kräftig auszubilden, damit die Halsnaht zugänglich bleibt und die zusätzlichen Gurtverstärkungsplatten durch Stumpfnah mit dem Stegansatz verschweißt werden können. Bei dieser Anordnung ist ein einwandfreier Kraftfluß von der Gurtung zum Stegblech gewährleistet. Ein weiterer Fortschritt in der Richtung, die Gurtquerschnitte der Maximalmomentenlinie anzupassen, ergibt sich durch Verwendung von Kreuzrippenplatten (Fig. 7d), in-

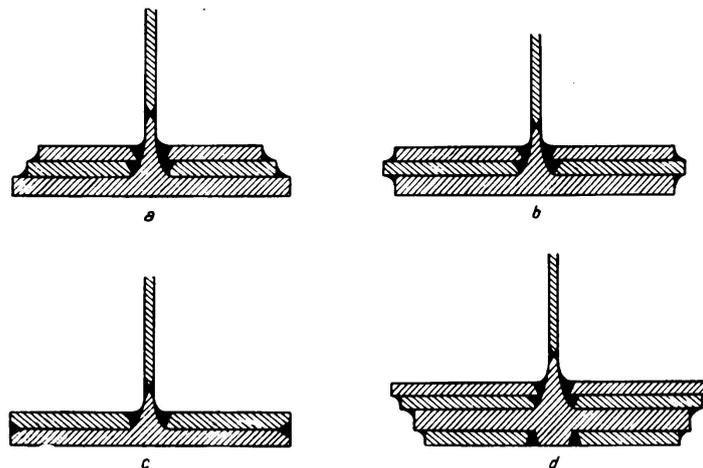


Fig. 7.

dem auf beiden Seiten zusätzliche Gurtverstärkungsplatten mit Stumpfnähten an die Rippen angeschlossen werden können. Bei Straßenbrücken ergeben sich Vorteile hinsichtlich des Einschweißens von Tonnen- oder Buckelblechen mit Stumpfnähten (Fig. 8); bei Eisenbahnbrücken ermöglicht die Kreuzrippenplatte eine zentrische Auflagerung der Schwellen¹ (Fig. 9).

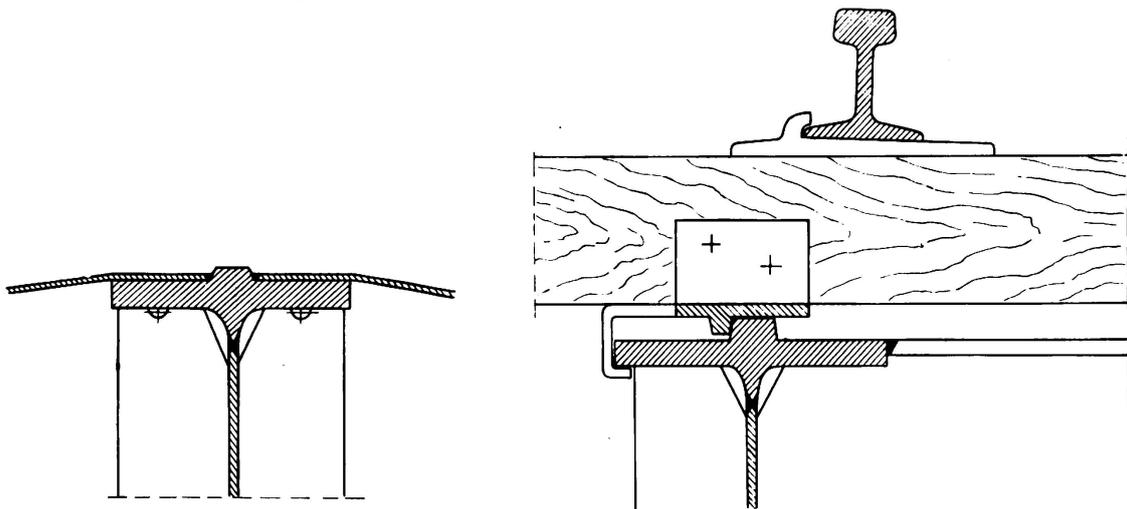


Fig. 8.

Fig. 9.

Für die Gesamtwirkung der geschweißten Vollwandträger sind noch die Aussteifungen der Stegblechwände von Bedeutung. Zur Aussteifung hoher Trägerwände werden einfache Bleche, T- oder I-Profile verwendet. Auf das Versetzen

¹ Schaechterle: Der geschweißte Vollwandträger. Beitrag zur Gestaltung von geschweißten Brücken. Bauingenieur, 17. Jahrg., H. 15/16, S. 131 ff.

der Nähte kann bei Stegblechdicken über 16 mm verzichtet werden. Um ein Überschweißen der Halsnähte zu vermeiden, werden die Innenecken der Aussteifung ausgeschnitten. In die Zugzone werden Unterlagsplättchen eingekeilt und mit Kehlnähten an die Aussteifung angeschlossen, um die Schwächung des Zuggurtes durch Einbrandkerben auszuschalten. Bei Deckbrücken empfiehlt es sich, die obere Gurtung der Querträger oder Querrahmen mit Stumpfnah an die

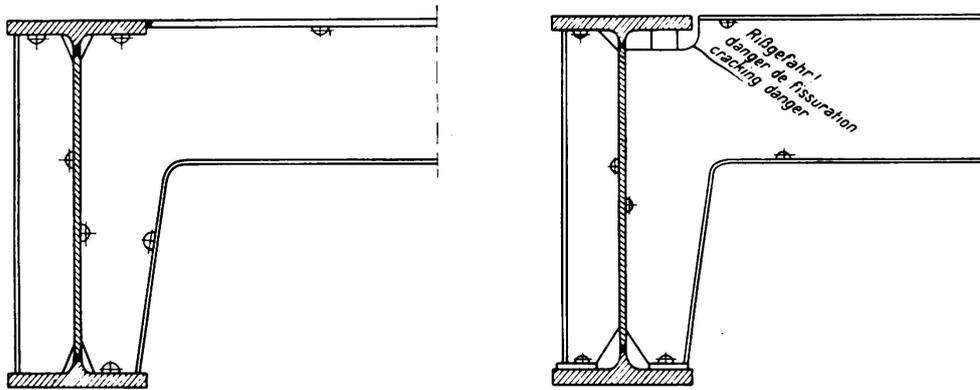


Fig. 10.

Hauptträger anzuschließen, sowie deren Stegbleche in der Rahmenecke an den Hauptträger voll anzuschweißen. Hierdurch werden die Gurtkräfte des Querrahmens auf den Hauptträger ohne Unstetigkeit übergeleitet (Fig. 10).

III. Ein heute noch ungelöstes Problem bilden die beim Schweißen entstehenden Schrumpfspannungen, die in den Vorschriften nicht berücksichtigt sind, obwohl sie erfahrungsgemäß hohe Werte erreichen können und bei ungeeigneten Stählen und unsachgemäßer Schweißfolge sogar zu Rissen geführt haben. Auch in der Versuchsforschung ist das Gebiet der Schrumpfspannungen etwas stiefmütterlich behandelt. Die nächstliegende Aufgabe besteht darin, die Größe der Schrumpfspannungen in Tragwerken und ihre Auswirkung auf die Dauerfestigkeiten zu erkunden. Innere Spannungen bedrohen geschweißte Konstruktionen, wenn durch das Schweißen Anrisse entstehen. Die bekannt gewordenen Mißerfolge sind zurückzuführen auf

1. hochgekohlte und hochsilizierte Nähte mit Walzfehlern, insbesondere feinsten rißartigen Kerben, Poren, Überwalzungen, Doppelungen . . . ,
2. unsachgemäße Verarbeitung, z. B. Kaltbiegen steifer Profile,
3. ungeeignete thermische Behandlung, so daß Abkühlungs- und Schrumpfspannungen sich summieren,
4. Spannungsspitzen durch Häufung von Schweißnähten, durch Ausklinkungen, plötzliche Querschnittsänderungen . . .

Man muß in der Praxis erst lernen, die Schrumpfspannungen zu meistern. Dazu ist der Schweißvorgang selbst auf Grund von Erfahrungen und Versuchen planmäßig festzulegen.

Ist beim Zusammenschweißen von Bauteilen die freie Beweglichkeit behindert, so entstehen Schrumpfspannungen. Bis zu einem gewissen Grad werden die Schrumpfspannungen durch Kaltreckung ausgeglichen. Die Verhältnisse liegen jedoch anders als bei Walzträgern mit Walz- und Abkühlungsspannungen. Die Schrumpfspannungen können unter ungünstigen Bedingungen wesentlich

höhere Werte erreichen. Es muß deshalb beim Verschweißen der Trägerkonstruktionen alles versucht werden, um die Schrumpfspannungen möglichst niedrig zu halten. Schon beim Herrichten der Bleche oder Werkstücke für eine Schweißverbindung sind Vorkehrungen zu treffen, um eine einwandfreie Herstellung der Schweißnähte zu gewährleisten. Da im Brückenbau Bleche unter 8 mm Stärke nur ausnahmsweise zur Verwendung kommen, scheidet die Strichnahtverbindung aus. Zur Ausführung von V-, X- oder U-Nähten sind die gestoßenen Blechkanten sorgfältig zu bearbeiten, damit der Querschnitt der Naht gleichmäßig über die ganze Nahtlänge durchläuft und Schweißgutanhäufungen vermieden werden. Der Wurzelabstand soll mindestens 2 mm betragen, um ein einwandfreies Schweißen der Wurzel zu gewährleisten und zu tiefes Auskreuzen bei der Nachbearbeitung der Wurzel zu vermeiden. Bei der Herstellung der Nähte müssen die Teile des Werkstückes so zurechtgelegt werden, daß Bewegungen in der Hauptschrumpfrichtung möglich sind und gleichzeitig Verwerfungen auf ein Kleinmaß beschränkt bleiben. Bei der Wahl der Schweißdrähte ist die Stärke der zu verbindenden Bleche zu beachten. Je dicker die Bleche, umso stärker müssen auch die Elektroden sein. Bei der ersten Lage der Naht ist die Reißgefahr am größten, deshalb ist beim Vorschweißen mit dünnen Elektroden Vorsicht geboten. Der Stumpfstoß mit V-Naht wird verwendet bei dünnen Blechen und bei dicken Blechen, wenn eine Drehung des Werkstückes nicht möglich ist. Die U-Naht hat gegenüber der V-Naht bei dicken Blechen den Vorteil geringeren Bedarfs an Schweißgut. Bei beiden Nahtarten kann die Wurzel über Kopf ausgekreuzt und nachgeschweißt werden. Bei V- und U-Nähten sind die Winkelschrumpfungen zu beachten. Um der Winkelschrumpfung entgegenzuwirken, empfiehlt es sich, die zu verbindenden Bleche unter einem kleinen Winkel zusammenzulegen, so daß nach der Winkelschrumpfung die verschweißten Bleche in einer Ebene liegen. Die X-Naht erfordert die geringste Menge Schweißgut. Sie wird verwendet, wenn in Drehvorrichtung geschweißt wird, ferner bei stehenden Nähten und wenn Überkopfschweißungen zugelassen sind. Winkelschrumpfungen werden durch gleichzeitiges oder abwechselndes Schweißen der einzelnen Lagen auf beiden Seiten ausgeglichen. Damit die beiden Hälften der Naht nach Fertigstellung möglichst gleich ausfallen, muß der zuerst zu schweißende Teil des Nahtquerschnitts, aus dem die Wurzel herausgestemmt wird, etwas größer sein. Soll der untere Teil der Naht über Kopf geschweißt werden, so empfiehlt es sich, die Wurzel in den unteren Drittelpunkt zu verlegen. Die Stumpfstoße sind möglichst senkrecht zur Trägerachse auszuführen, weil diese Anordnung die geringste Menge Schweißgut erfordert. Bei Breitflanschträgerstößen mit schrägen Stumpfnähten in den Gurten haben sich die Träger stark verzogen und sind teilweise im Stegblech von der Naht ausgehend gerissen (Fig. 11). Beim senkrechten Stumpfstoß haben sich solche Schäden nicht ergeben. Doppelseitige Steifen und Quertträger werden an das Stegblech mit dünnen Kehlnähten angeschlossen. Wie bei X-Nähten so kann auch bei doppelseitigen Kehlnähten schon durch die Schweißfolge eine Herabsetzung bzw. ein Ausgleich der Winkelschrumpfung erzielt werden. Außer der Winkelschrumpfung treten noch Quer- und Längsschrumpfungen auf. Bei langen Nähten wird meist in der Mitte begonnen und nach beiden Seiten gleichzeitig geschweißt. Das Pilgerschrittverfahren wird im

Brückenbau weniger angewendet, da die häufigen Ansätze leicht Fehlerquellen ergeben. Durch Warmhaltung des bereits fertiggestellten Nahtquerschnitts ist es möglich, die Querschrumpfung und damit die Querverspannung herabzusetzen. Wenn nach Fertigstellung der ganzen Naht die künstliche Erwärmung aufhört, kann die Querschrumpfung gleichzeitig über die ganze Nahtlänge eintreten und sich nur in einer Verkürzung des gesamten Werkstückes auswirken. Voraussetzung ist dabei, daß die Werkteile ungehindert und leicht nachkommen können.

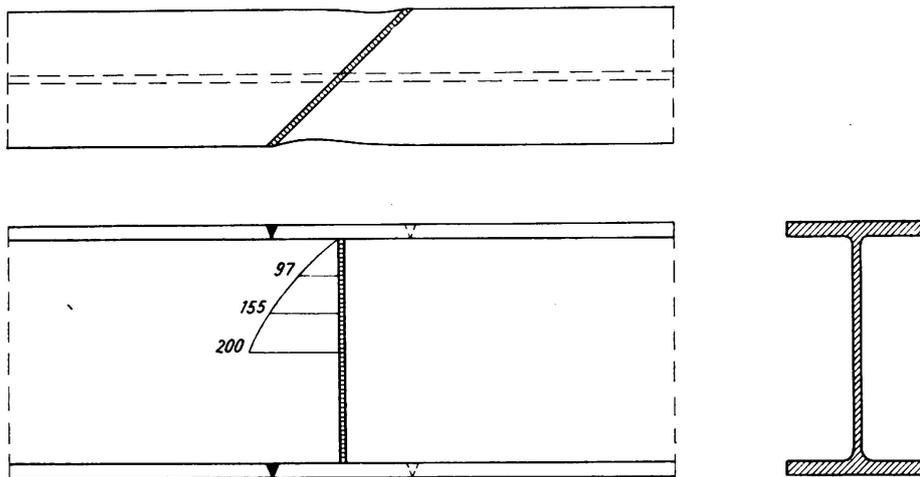


Fig. 11.

Außer den Schrumpfungen in der Schweißnaht selbst treten auch in den benachbarten Zonen zu beiden Seiten der Schweißnaht während des Schweißvorgangs Ausdehnungen und nach Beendigung Schrumpfungen auf. Diese können nicht durch zusätzliches Erwärmen herabgesetzt werden; Vor- und Nachwärmen kann bestenfalls nur einen Spannungsausgleich bringen. Durch bewegliche Lagerung ist ein ungehindertes Ausdehnen während des Vorwärmens und ungehindertes Nachkommen während des Schrumpfens sicherzustellen.

Die Forderung freier Beweglichkeit der Werkstücke beim Zusammenschweißen ist in der Werkstatt leicht zu erfüllen. Stegblech und Gurte werden deshalb in der Werkstatt für sich zu längeren Stücken verschweißt, dann erst zum Träger zusammengesetzt und die Halsnähte verschweißt. Durch das Aufschweißen der Aussteifungen auf dem Stegblech bevor die Halsnähte gezogen sind, werden die Halsnähte entlastet, während bei dem nachträglichen Aufschweißen infolge der größeren Schrumpfung des Stegbleches gegenüber der Gurtung zusätzliche Spannungen in den Halsnähten hervorgerufen werden. Auf der anderen Seite behindern genau eingepaßte Steifen die Querschrumpfung an dieser Stelle, so daß die Gurte wellenförmig ausgebogen werden. Auch das nachträgliche Einpassen unter Vorwärmen der mittleren Stegblechzone behebt diese Mängel nicht. Werden die Steifen mit Spiel eingesetzt, so sind Unterlagskeile in verschiedener Stärke vorrätig zu halten, um kleine Längenänderungen, die durch Schrumpfung hervorgerufen werden, auszugleichen. Beim Vorhandensein einer Luftfuge zwischen Gurtplatte und Aussteifung, ist es falsch, die Verbindung durch Zuschweißen der Luftfuge herzustellen, weil dabei die Gurtung herangezogen wird. Bei dem Zusammenbau des Trägers machen sich die Längsschrumpfungen in

der Naht durch Verkürzung des Werkstückes bemerkbar. Da die Größe der Längsschrumpfung mit der Nahtlänge zunimmt, so werden beim Zusammenbau die Halsnähte von der Mitte ausgehend nach den Enden geschweißt. Vorteilhaft ist es, beide Gurtungen zu gleicher Zeit mit dem Stegblech zu verbinden oder die Halsnähte abwechselnd zu schweißen. Dadurch wird einer einseitigen Verkrümmung des Stegbleches entgegengewirkt.

Bei verschiedenen Querschnittausbildungen von Brücken, z. B. mit Fahrbahntafeln aus aufgeschweißten Buckel-, Tonnen- oder Flachblechen, findet eine Häufung von Schweißnähten im Obergurt der Fahrbahnträger statt. Da die Längsschrumpfung eine Verkürzung der Obergurte und damit eine Durchbiegung der Träger hervorruft, muß von vornherein eine zusätzliche Überhöhung vorgesehen werden.

Durchlaufende Träger größerer Abmessung und Länge müssen auf der Baustelle zusammengebaut werden, was bisher mit Drehrollen bewerkstelligt wurde. Diese Einrichtung hat jedoch den Nachteil, daß einer Bewegung senkrecht zur Drehvorrichtung große Reibungswiderstände entgegenstehen, die die Längsschrumpfung behindern. Man ist deshalb neuerdings dazu übergegangen, die Trägerstücke während des Zusammenschweißens längsbeweglich zu lagern, so daß die an den festen Teil anzufügenden Einzelstücke der Schrumpfung frei folgen können. Bei dieser Montageart müssen Überkopfschweißungen in Kauf genommen werden, die aber bei dem heutigen Stand der Schweißtechnik keine Schwierigkeiten machen. Für die Reihenfolge, in der die einzelnen Nähte beim Trägerstoß zu schweißen sind, gilt die Forderung, daß die Naht zum Schluß zu schweißen ist, die einem Herankommen des Montagestückes den größten Widerstand entgegensetzt. Die Gurtstöße werden gewöhnlich zu beiden Seiten des Stegblechstoßes angeordnet. Die Halsnähte zwischen Gurtung und Stegblech bleiben auf eine größere Länge bis zum Schluß offen, damit sich die Schrumpfungen in Gurtung und Stegblech unabhängig voneinander auswirken können. Man beginnt mit dem Verschweißen an den beiden Gurtnähten gleichzeitig und vergrößert den Wurzelabstand der Stegblechnaht derart, daß nach dem Schrumpfen der ersten Lagen der Gurtnähte noch ein einwandfreies Durchschweißen der Stegblechnaht möglich ist. Durch abwechselndes Schweißen der Gurt- und Stegblechnaht kann einer Überlagerung der Spannungen entgegengewirkt und ein Ausgleich zwischen Druck- und Zugspannungen erzielt werden. So erzeugt die Schrumpfung jeder weiteren Lage der Gurtnaht in der bereits fertiggestellten Lage der Stegblechnaht Druck, womit die durch die Schrumpfung der Stegblechnaht hervorgerufenen Zugspannungen zum Teil ausgeglichen werden. Dieses Spiel wiederholt sich bei jeder weiteren Lage und zum Schluß bleiben nur die Spannungen übrig, die durch die Schlußnaht und durch die größere Schweißmasse ausgelöst werden. So wird in der Praxis häufig zunächst je ein Drittel der Gurtnähte hergestellt, dann die Stegblechnähte zu zwei Drittel zugeschweißt, weiterhin Gurtnähte und Stegblechnaht gleichzeitig fertiggestellt und zum Schluß die Halsnaht gezogen.

IV. In den letzten Jahren wurden mehrere vollständig geschweißte Brücken ausgeführt. Kennzeichnend ist der gerade durchlaufende Träger und die bis zur äußersten Vereinfachung vorgetriebene Form. In schönheitlicher Hinsicht sind die geschweißten Bauten den genieteten überlegen.