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

Band: 2 (1936)

Rubrik: IIIa. Einfluss dynamischer und häufig wechselnder Lastwirkungen auf geschweisste Konstruktionen (Versuchsforschungen und Auswirkung auf die praktische Ausführung)

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 30.09.2025

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

III

Praktische Fragen bei geschweißten Stahlkonstruktionen.

Questions pratiques concernant les constructions soudées.

Practical questions in connection with welded steel structures.

III a

Einfluß dynamischer und häufig wechselnder Lastwirkungen auf geschweißte Konstruktionen (Versuchsforschungen und Auswirkung auf die praktische Ausführung).

Influence des actions dynamiques sur les constructions soudées (études expérimentales et résultats pratiques).

Influence of dynamic and frequently alternating loading on welded structures (Research work and its practical application).

Leere Seite
Blank page
Page vide

IIIa 1

Einfluß häufig wechselnder Belastungen auf geschweißte Bauwerke.

Influence des variations de charge répétées sur les constructions soudées.

The Influence of Frequently Alternating Loading on Welded Structures.

Dr. Ing. O. Kommerell,
Direktor bei der Reichsbahn, im Reichsbahnzentralamt, Berlin.

A. *Einleitung.*

Anläßlich des I. Kongresses in Paris im Mai 1932 hatte ich die Ehre, über die

„Berechnung und bauliche Durchbildung geschweißter Stahlbauten"

zu berichten.[1] Es wurden dabei die Verhältnisse geschildert, wie sie sich damals in Deutschland entwickelt hatten. Die Berechnungsweise konnte sich *nur auf rein statische Versuche* stützen. In meiner *„Zusammenfassung"* führte ich aus: „Versuche haben gezeigt, daß mit der Berechnungsweise der deutschen Vorschriften ausreichende Sicherheit bei *statischer* Beanspruchung erzielt wird. Ob die Sicherheit auch bei *dynamischer* Beanspruchung ausreichend groß ist, soll durch eingeleitete Versuche noch weiter geprüft werden."

Man war sich also damals schon klar darüber, daß nur groß angelegte *Dauerfestigkeitsversuche* mittels *Pulsatormaschinen* und unter Verwendung von *Schwingbrücken* Licht in die völlig ungeklärten Verhältnisse bringen konnten. Von einem Kuratorium unter Leitung von Reichsbahndirektor Geh. Baurat Dr. Ing. ehr. *Schaper* wurden unter Aufwendung von nahezu 50000 *RM* solche Dauerfestigkeitsversuche durchgeführt und im Jahre 1934 abgeschlossen.[2]

Über diese Versuche habe ich eingehend im *dritten Band der „Abhandlungen" unter „Die Auswertung von Dauerfestigkeitsversuchen mit geschweißten Verbindungen"* berichtet. In meinem Nachtrag S. 263 des dritten Bandes der „Abhandlungen" habe ich schon darauf hingewiesen, daß in der abschließenden Sitzung in Friedrichshafen im August 1935 die zulässigen Spannungen der

---

[1] Siehe Vorbericht Pariser Kongreß.

[2] „Dauerfestigkeitsversuche mit Schweißverbindungen" Berlin 1935, VDI-Verlag und *Kommerell, „Erläuterungen* zu den Vorschriften für geschweißte Stahlbauten *mit Beispielen* für die Berechnung und bauliche Durchbildung". I. Teil: Hochbauten, Berlin 1934; II. Teil: Vollwandige geschweißte Eisenbahnbrücken, Berlin 1935. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn.

Schweißverbindungen heraufgesetzt wurden. Auch wurde die Berechnungsformel in den endgültigen Vorschriften etwas abgeändert. Bezüglich der *Auswertung der Versuchsergebnisse* kann ich mich mit dem Hinweis auf den dritten Band der Abhandlungen begnügen, dagegen halte ich es für zweckmäßig, noch einmal die Versuchsergebnisse zusammenzufassen und darzulegen, welche Schlüsse für die endgültigen Vorschriften gezogen wurden.

Diejenigen Bilder und Tafeln, die sich auf die amtlichen deutschen Vorschriften für geschweißte vollwandige Eisenbahnbrücken beziehen, erhalten den Zusatz V.

B. *Begriffe.*

Bei Dauerfestigkeitsversuchen will man feststellen, wie groß die Festigkeit eines Prüfstabes bei oftmals wiederholten Belastungen ist. Es ist

σ_u die untere Spannung (Vorspannung),
σ_o die obere Spannung (Grenzspannung bei $n \cdot 10^6$ Lastwechseln).
Bei Zug +-Zeichen, bei Druck —-Zeichen.

Haben σ_u und σ_o dasselbe Vorzeichen, so spricht man von *schwellender* Belastung, haben σ_u und σ_o verschiedene Vorzeichen, so spricht man von *wechselnder* Belastung. Will man besonders kennzeichnen, daß es sich um Zug (+) handelt, so setzt man noch den Zeiger z, bei Druck (—) den Zeiger d, also z. B.

σ_{oz} obere Spannung Zug,
σ_{ud} untere Spannung Druck.

Um die Verhältnisse leicht übersehen zu können, hat sich die schon von *Weyrauch*[3] verwendete Darstellung in Deutschland eingebürgert.

Auf der Abszissenachse trägt man die untere Spannung σ_u auf. Zieht man durch den Ursprung o Linien unter 45°, so ist die Ordinate z. B. des Punktes A ebenfalls gleich der unteren Spannung σ_u.

Die Ordinaten werden bei Zug (+) nach oben, bei Druck (—) nach unten aufgetragen. Die Ordinate des Punktes B stellt die obere Spannung σ_o bei $n \cdot 10^6$ Lastwechseln dar (Fig. 1).

Da nun nicht alle Versuchsstäbe bei der gleichen Lastwechselzahl brechen, so bedient man sich der sogenannten Wöhlerlinie, um abzuleiten, wie groß die obere Grenzspannung σ_o wäre, wenn der Stab $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel ausgehalten hätte. Bei der Auswertung des Kuratoriumsberichts sind alle Versuchswerte auf diese Lastwechselzahl umgerechnet worden; diese Lastwechselzahl soll auch für die weiteren Erörterungen angenommen werden. Bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln ist die obere Grenzspannung $\sigma_o = \sigma_D =$ der Dauerfestigkeit.

Der Abstand der σ_o-Linie von der unter 45° geneigten σ_u-Linie zeigt in übersichtlicher Weise den wichtigsten Wert: die *Schwingweite* σ_w. Ist $\sigma_u = o$ (Ursprung), so ist $\sigma_o = \sigma_U =$ *Ursprungsfestigkeit.* Ist die Druckspannung $\sigma_u =$ der Zugspannung σ_o, so spricht man von der *Wechselfestigkeit* σ_W. Sind die größeren Spannungen σ_o Zugspannungen, so ergibt sich in Bild 1 der mit senkrechten Linien schraffierte Schwingbereich. Sind die größeren Spannungen

[3] *Weyrauch,* Die Festigkeitseigenschaften und Methoden der Dimensionenberechnung von Eisen- und Stahlkonstruktionen. Tafel IV, Fig. 66. Leipzig 1889. Verlag Teubner.

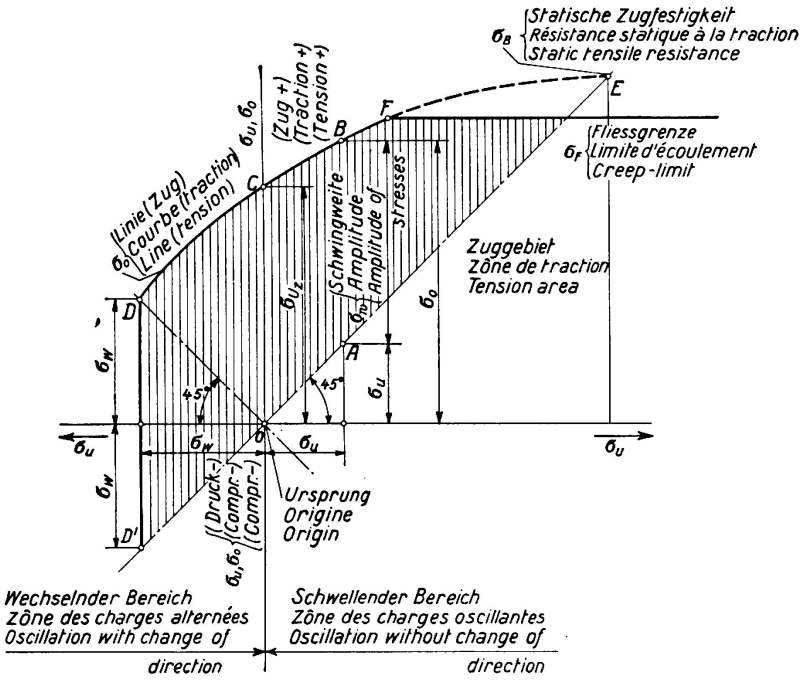


Fig. 1.

Linie der Dauerfestigkeiten (σ_0-Linie), wenn σ_0 Zug ist.

σ_0 Druckspannungen, so ergibt sich in Fig. 2 der mit waagerechten Linien schraffierte Schwingbereich.

Rechts von der Ordinatenachse hat man es nur mit Spannungen desselben

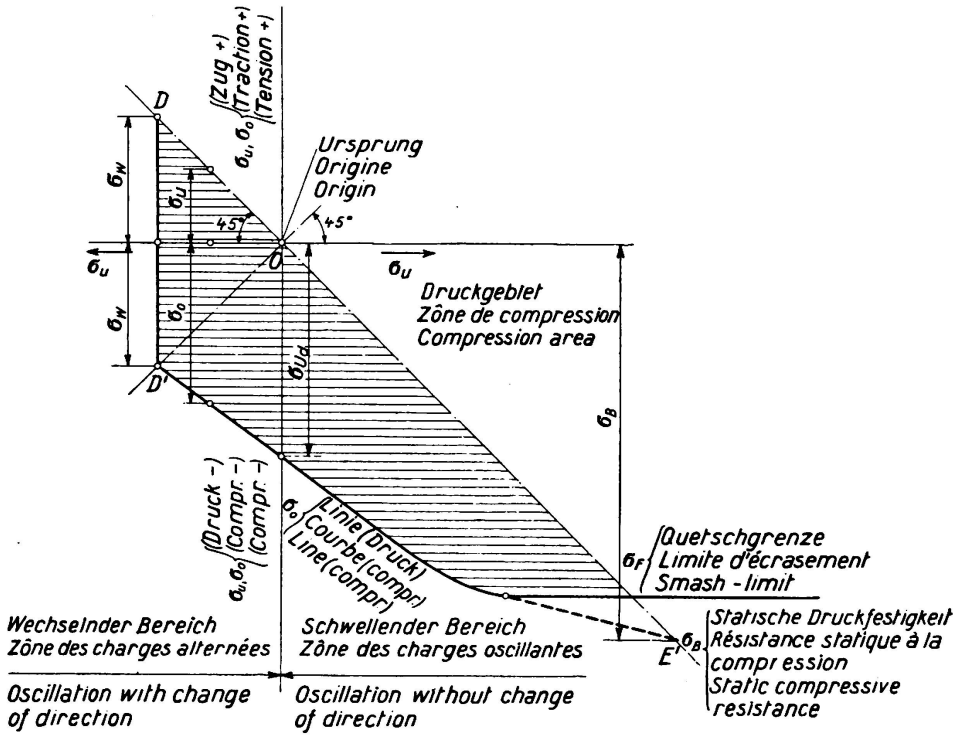


Fig. 2.

Linie der Dauerfestigkeiten (σ_0-Linie), wenn σ_0 Druck ist.

Sinnes zu tun, man spricht hier vom *schwellenden Bereich.* Links von der Ordinatenachse hat man es bei σ_u und σ_o mit Spannungen verschiedenen Vorzeichens zu tun, man spricht hier vom *Wechselbereich.*

Die Werte σ_o können im Zuggebiet (Fig. 1) nur bis zur Fließgenze σ_F, im Druckgebiet (Fig. 2) nur bis zur Quetschgrenze σ_{-F} ausgenutzt werden. (Die Zahlenwerte σ_F für die Fließgrenze und die Quetschgrenze können gleich groß angenommen werden.) Gut erforscht ist zur Zeit nur der schwellende Bereich im Zuggebiet. Aus der Auswertung der Versuche ergab sich, daß man mit ausreichender Genauigkeit die σ_o-Linie im Zuggebiet als eine unter dem Winkel α geneigte Gerade annehmen darf. Der Winkel α ist hier kleiner als 45^0 und verschieden, je nach der Nahtart (Stumpfnähte, Kehlnähte). Daraus folgt, daß im Zuggebiet (Fig. 1) die Schwingweite etwas abnimmt, je mehr man sich der Fließgrenze nähert. Die wenigen Versuche, die im Wechselbereich für Zug

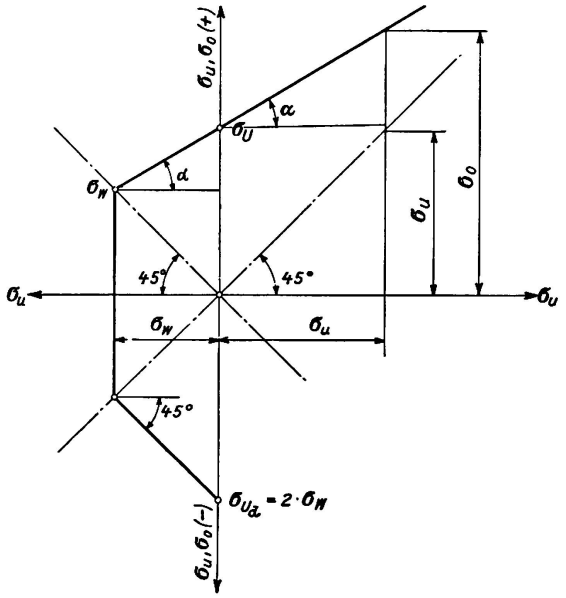


Fig. 3.

ebenso groß wie Druck vorliegen (Graf), ergaben, daß man eher zu ungünstig rechnet, wenn man die σ_o-Gerade bis zur Wechselfestigkeit σ_W verlängert. Die σ_W-Werte wurden danach im Kuratoriumsbericht einfach aus den σ_U-Werten mit Hilfe der α-Winkel abgeleitet.

$$\text{Es ist } \operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma_U - \sigma_W}{\sigma_W}, \text{ also } \sigma_W = \frac{\sigma_U}{1 + \operatorname{tg} \alpha}. \tag{1}$$

Im Druckgebiet kann man mit hinreichender Genauigkeit annehmen, daß die Schwingweite σ_W überall gleich groß, also $\sigma_W = 2\sigma_W$ ist. D. h. hier wird $\alpha = 45^0$ angenommen. Es ist also die Ursprungsfestigkeit im Druckgebiet $\sigma_{Ud} = \sigma_W = 2\,\sigma_W$ angenommen.

Wie schon erwähnt, begnügt man sich bei den Dauerfestigkeitsversuchen meist mit einer Lastwechselzahl $N = 2 \cdot 10^6$. Um sich ein ungefähres Bild zu machen, was diese Zahl bei einer Eisenbahnbrücke bedeutet, nehmen wir zum Beispiel an, es handle sich um eine eingleisige Strecke mit 25 Zügen täglich. Dabei kommt es beim Befahren der Brücke nur auf die *größte* Beanspruchung an, die ein

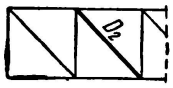
Bauteil bei jeder Zugfahrt erfährt. Maßgebend ist dabei im allgemeinen nur *eine* Laststellung des Zuges, nämlich die ungünstigste. Um $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel zu erzeugen, sind dann

$$\frac{2\,000\,000}{25 \cdot 365} = \sim 220 \text{ Jahre erforderlich.}$$

Dabei ist aber zu berücksichtigen, daß die Brücken im gewöhnlichen Betrieb im allgemeinen von leichteren Zügen befahren werden, als in der Festigkeitsberechnung beim Entwurf der Brücke angenommen wurde. Da die Lebensdauer einer solchen Brücke aus anderen Gründen (Rostgefahr, bedeutende Erhöhung der Verkehrslasten) wesentlich niedriger ist, so bewegt man sich im allgemeinen auf der sicheren Seite, wenn man sich damit zufrieden gibt, wenn die Brücke diese $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel bei der ungünstigsten Belastung aushält.

Bei den Vorarbeiten zur Herausgabe der neuen Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE) im Jahre 1934 wurde auch die Frage erörtert, ob es nicht angängig wäre, bei zweigleisigen Eisenbahnbrücken die zulässigen Spannungen gegenüber eingleisigen Eisenbahnbrücken heraufzusetzen, da die in den Festigkeitsberechnungen vorgeschriebenen Belastungsannahmen bei zweigleisigen Eisenbahnbrücken im Betriebe nur selten vorkommen, so daß nach der Wöhlerlinie die Dauerfestigkeit bei der geringeren Zahl der Lastwechsel wesentlich höher liegt. Um ein Bild über die Größenordnung der Unterschiede $\Delta\sigma$ in den Spannungen bei verschiedener Belastung gegenüber den in den Festigkeitsberechnungen ermittelten zu bekommen, wurden die in der folgenden Tafel 1 angegebenen fünf Belastungsfälle unterschieden und die jeweiligen Beanspruchungen ermittelt.

Tafel 1.

1	2	3	4	5	6	7
		größte Spannung zweigleisiger Eisenbahnbrücken aus St 37				
Stützweite l m	Bauteil 	I. Ein Gleis voll belastet, das andere nicht belastet kg/cm²	II. Ein Gleis voll belastet, das andere mit 3,6 t/m belastet kg/cm²	III. Ein Gleis voll belastet, das andere mit 8,0 t/m belastet kg/cm²	IV. Ein Gleis voll belastet. das andere mit 2 N-Lokomot. kg/cm²	V. Beide Gleise voll belastet wie in d. Festigkeits-Berechn. kg/cm²
70	Untergurt	1080 $\Delta\sigma = 320$	1185 $\Delta\sigma = 215$	1310 $\Delta\sigma = 90$	1315 $\Delta\sigma = 85$	1400
	Zugstrebe D^2	1065 $\Delta\sigma = 335$	1160 $\Delta\sigma = 240$	1290 $\Delta\sigma = 110$	1310 $\Delta\sigma = 90$	1400
100	Untergurt	1100 $\Delta\sigma = 300$	1200 $\Delta\sigma = 200$	1330 $\Delta\sigma = 70$	1270 $\Delta\sigma = 130$	1400
	Zugstrebe D^2	1085 $\Delta\sigma = 315$	1185 $\Delta\sigma = 215$	1300 $\Delta\sigma = 100$	1290 $\Delta\sigma = 110$	1400

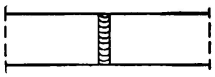
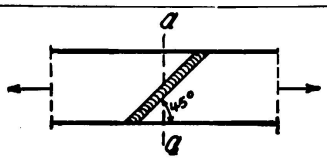
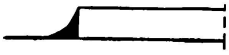
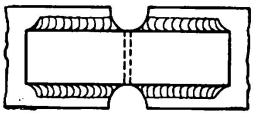
Man kam zu dem Ergebnis, daß bei neuen Eisenbahnbrücken kein Unterschied zwischen eingleisigen und zweigleisigen gemacht werden sollte. Diese Frage spielt aber unter Umständen eine große Rolle, wenn es sich um die Verstärkung einer Eisenbahnbrücke handelt. Ähnliche Erwägungen können auch bei Straßenbrücken angestellt werden.

C. Die hauptsächlichsten Ergebnisse[4] *des Kuratoriumsberichts (Dauerfestigkeitsversuche).*

1. Die Zahlenwerte der Dauerfestigkeiten.

Die aus den Versuchsergebnissen abgeleiteten Dauerfestigkeiten σ_D gehen aus der folgenden Tafel 2 hervor:

Tafel 2 (für St 37).

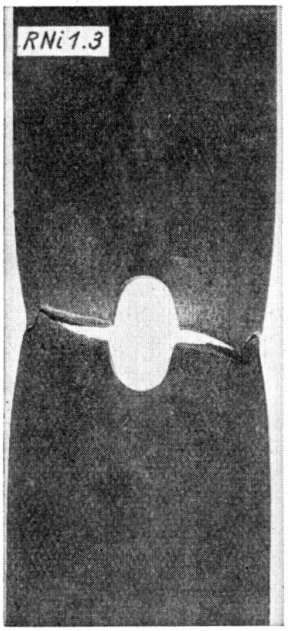
1	2	3	4	5	6
Nr.	Art und Beschaffenheit der Naht	Wechselfestigkeit σ_W (abgeleitet) bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln kg/mm²	Ursprungsfestigkeit Zug σ_{Uz} bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln kg/mm²	Ursprungsfestigkeit Druck σ_{Ud} (abgeleitet) bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln kg/mm²	Tafel des Kuratoriumsberichts
1	 Stumpfnaht, Nahtwurzel nachgeschweißt	11	18	—22	Zahlentafel 5** Zeile Nr. 2
2	Wie bei 1, jedoch Nahtwurzel nicht nachgeschweißt	8	13	—16	Zahlentafel 5** Zeile Nr. 1
3	 Stumpfnaht wie bei 1, aber unter 45° angeordnet	13	22	—26	Zahlentafel 5** Zeile Nr. 3
4	 Leichte Stirnkehlnaht mit allmählichem Übergang von der Raupe zum Blech	5,4	10,3	—10,8	Zahlentafel 13** Zeile Nr. 2
5	Volle Stirnkehlnähte ohne Bearbeitung	3,4	6,5	—6,8	Zahlentafel 13** Zeile Nr. 3
6	 Leichte Flankenkehlnähte mit Anfräsen der Nahtenden da, wo Kehlnähte beginnen oder endigen	6,3	12,0	—12,6	Zahlentafel 13** Zeile Nr. 6
7	Volle Flankenkehlnaht ohne Anfräsen	4,2	8	—8,4	Zahlentafel 13** Zeile Nr. 5

[4] Siehe *Kommerell,* Erläuterungen zu den Vorschriften für geschweißte Stahlbauten. 4. Auflage. Teil I: Hochbauten; Teil II: Vollwandige Eisenbahnbrücken.

2. Allgemeine Bemerkungen zu diesen Ergebnissen. Kraftfluß.

Schon die ersten Versuche mittels Pulsatormaschinen ergaben gegenüber den statischen Festigkeiten (Bruchspannung $\sigma_B = 40$ kg/mm²) *besonders bei Kehlnähten* auffallend niedrige Dauerfestigkeitswerte (Ursprungsfestigkeit $\sigma_U = 8$ kg/mm²). Es hängt dies, wie später noch gezeigt wird, vom *Kraftfluß* ab.

„Bei *dynamisch beanspruchten* Schweißverbindungen ist es besonders wichtig, sich den Kraftfluß genau zu überlegen. Spannungsspitzen, die durch plötzliche Querschnittsänderungen, scharfe Ecken bei Ausklinkungen und durch für die Ausführung ungünstige Lage der Schweißnähte entstehen können, sind wegen der Kerbwirkung möglichst zu vermeiden oder jedenfalls durch geschickte bauliche Ausbildung in ihrer Auswirkung zu mildern. Die Kräfte sind auf nächstem Wege und auf natürliche Weise ohne wesentliche Änderung ihrer Richtung von einem Bauteil auf den andern überzuleiten."



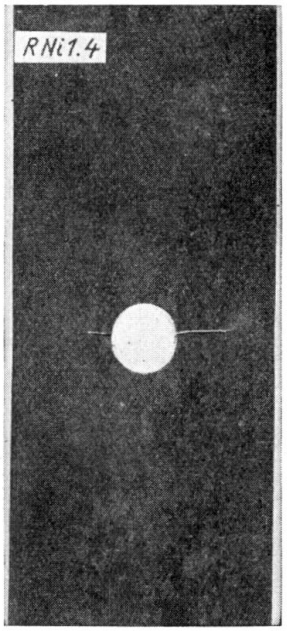


Fig. 4.

Statischer Zugversuch
Zugfestigkeit
$\sigma_B = 54{,}6$ kg/mm²

Dauerzugversuch
Ursprungsfestigkeit
$\sigma_U = 24{,}0$ kg/mm²

Fig. 4. Versuche mit gebohrten Probestäben.

Im *Hochbau* spielen solche Spannungsspitzen bei weitem keine so große Rolle wie bei *dynamisch beanspruchten* Bauteilen. Es kommt dies daher, daß der Werkstoff vermöge seiner Bildsamkeit bei statischer Überbeanspruchung einzelner Teile, nach Überschreitung der Fließgrenze, die Spannungsspitzen abbaut, so daß zur Aufnahme der Kräfte andere vorher weniger stark beanspruchte Querschnittsteile herangezogen werden. Der Unterschied geht aus folgenden Versuchen[5] hervor (Fig. 4). Links ist das Ergebnis des statischen

[5] *Graf*, Über die Festigkeiten der Schweißverbindungen .... Autogene Metallbearbeitung, 1934, S. 1 u. f.

Zugversuchs ersichtlich. Durch die Bohrung ist in einem Querschnitt durch die Mitte des Lochs die Spannungsverteilung ungleichmäßig. An den Lochrändern treten Spannungsspitzen auf. Beim statischen Versuch ergab sich eine Zugfestigkeit $\sigma_B = 54{,}6$ kg/mm², während beim Dauerzugversuch bis zum Bruch (Bild rechts) nur eine Ursprungszugfestigkeit von $\sigma_U = 24$ kg/mm² erreicht wurde.

3. Stumpfnähte.

a) „Während man im Anfang der Schweißung den Stumpfnähten gegenüber zunächst rein gefühlsmäßig vorsichtig war, haben sich seit der Ausführung zahlreicher Dauerfestigkeitsversuche die Anschauungen vollständig geändert.

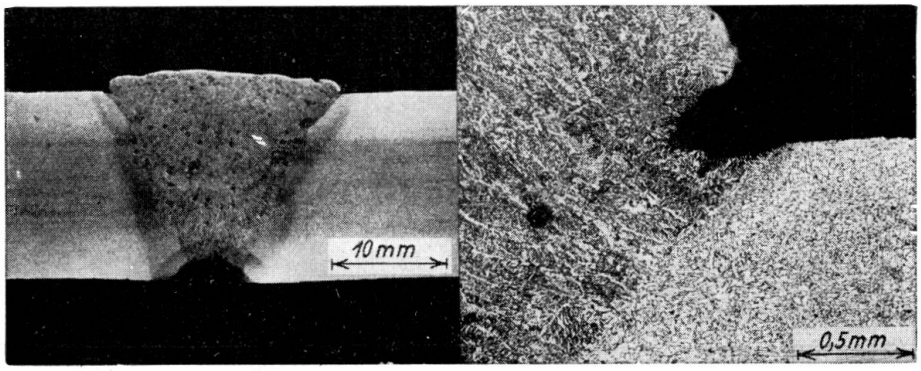


Fig. 5a.

Ursprungszugfestigkeit $\rho_{Uz} = 10$ kg/mm²
Statische Zugfestigkeit $\sigma_B = 34$ kg/mm²

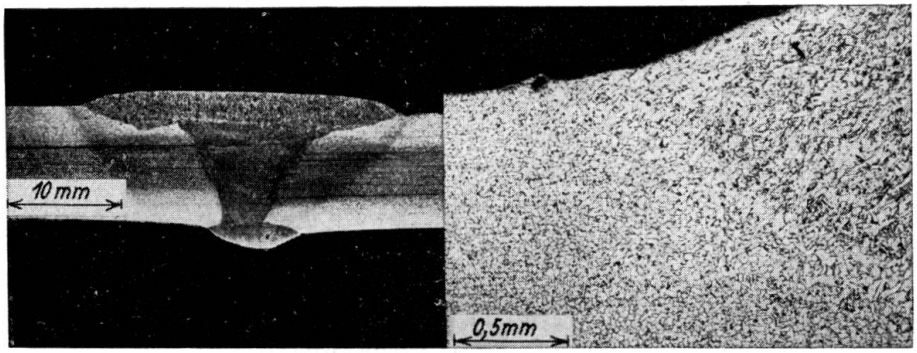


Fig. 5b.

Ursprungszugfestigkeit $\rho_{Uz} = 18$ kg/mm²
Statische Zugfestigkeit $\sigma_B = 37{,}5$ kg/mm²

Fig. 5a und 5b. Dauerzugversuch mit einer Stumpfnaht mit Poren und Löchern in der Übergangszone und ohne solche.

Stumpfnähte haben dabei wegen des geradlinigen natürlichen Kraftflusses durchweg besser abgeschnitten als Kehlnähte. Man ist heute soweit, daß die Ursprungszugfestigkeit von sorgfältig ausgeführten Stumpfnähten in den oberen Grenzen ebenso hoch ist wie beim gelochten Stab ($\sigma_U = 18$ kg/mm²).

Die Dauerfestigkeit ist stark abhängig von der Ausführung der Schweißraupe.

Z. B. hatte eine Stumpfnahtschweißung[6] mit mangelhaftem Übergang der Schweiße vom Blech zur Raupe und mit zahlreichen Poren nach Fig. 5a eine Ursprungsfestigkeit von nur $\rho_U = 10$ kg/mm² (Kerbwirkung), während nach Fig. 5b, wo diese Mängel vermieden waren, Ursprungsfestigkeiten von $\rho_U = 18$ kg/mm² erzielt wurden. Die statische *Zugfestigkeit* war in beiden Fällen nicht sehr verschieden. Immerhin war sie bei der besseren Raupe ebenfalls höher.

b) Die Raupen sollen allmählich ansteigen und nur wenig über die Oberfläche der zusammenzuschweißenden Bauteile hervortreten. Es ist ein Irrtum zu glauben, daß durch eine dickere Raupe auch die Dauerfestigkeit erhöht wird. Das Gegenteil ist der Fall."

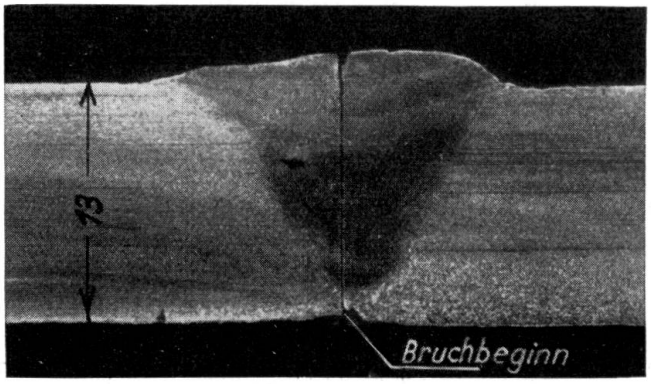


Fig. 6a.

Ursprungszugfestigkeit $\rho_{Uz} = 12$ kg/mm²
Statische Zugfestigkeit $\sigma_B = 38$ kg/mm²

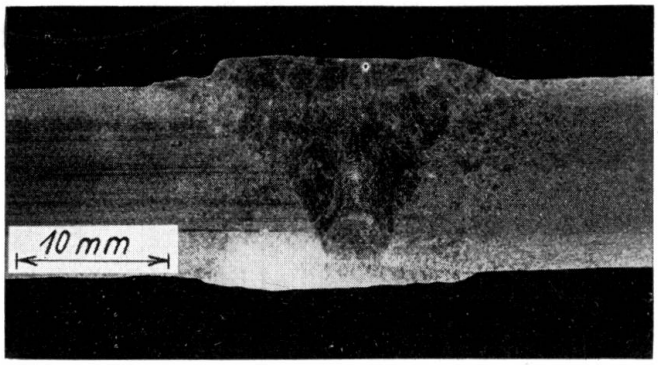


Fig. 6b.

Ursprungszugfestigkeit $\rho_{Uz} = 18$ kg/mm²
Statische Zugfestigkeit $\sigma_B = 38$ kg/mm²

Fig. 6a und 6b. Dauerzugversuch mit nicht nachgeschweißter und nachgeschweißter Nahtwurzel.

c) „Besonders wichtig ist bei Stumpfnähten, daß die Nahtwurzel nach Beseitigen der Schlacke sorgfältig nachgeschweißt wird. Dies zeigt sich deutlich bei Fig. 6a,[7] wo bei einer V-Naht (Gasschmelzschweißung), nur eine Ursprungs-

[6] Siehe *Graf*, Über die Festigkeiten der Schweißverbindungen .... Autogene Metallbearbeitung, 1934, S. 4 und 5.

[7] Siehe Fußnoten [5] und [6].

festigkeit von $\rho_U = 12$ kg/mm², bei Fig. 6b mit nachgeschweißter Wurzel dagegen $\rho_U = 18$ kg/mm² erreicht wurde. In beiden Fällen war die statische Zugfestigkeit $\sigma_B = 38$ kg/mm². Auch bei vielen Dauerfestigkeitsversuchen mit X-Nähten hat sich gezeigt, wie wichtig es ist, die Wurzel im Innern gründlich von Schlacke zu säubern (ausstemmen, ausschmirgeln) und sorgfältig mit dünnem Draht *nachzuschweißen*. Siehe Fig. 7, Ursprungsfestigkeit nur $\rho_U = 10$ kg/mm². V-Nähte haben im allgemeinen besser abgeschnitten als X-Nähte."

„Bei zu stoßenden Gurtplatten von Trägern kann es vorkommen, daß die V-Naht nicht nachgeschweißt werden kann; in diesem Fall empfiehlt es sich,

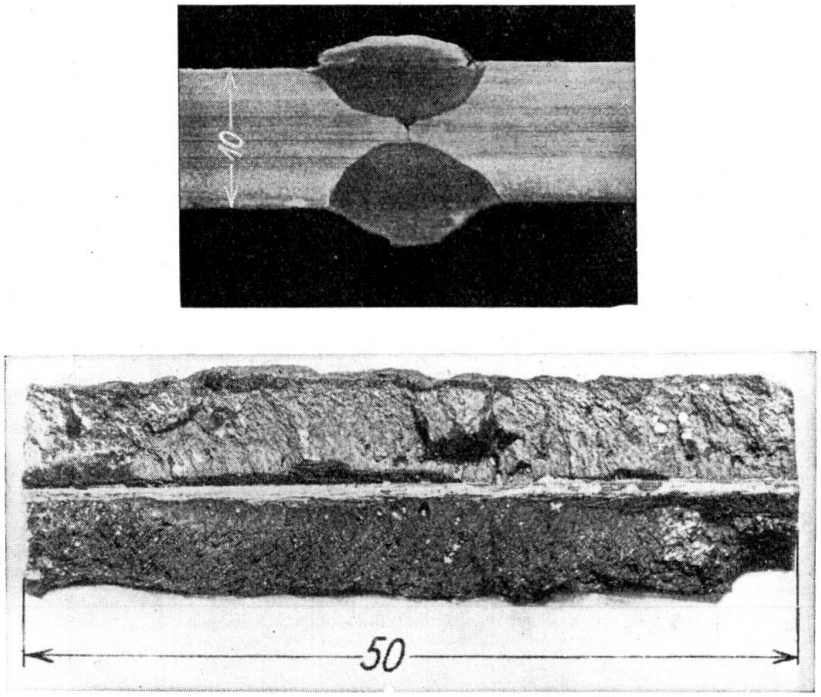


Fig. 7.

Mangelhafte Lichtbogenschweißung aus St. 37. X-Naht.

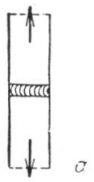
unter allen Umständen zunächst mit einem dünnen Draht vorzuschweißen und dabei den Abstand der zu verschweißenden Teile so groß zu machen, daß auch im Grunde eine gute Bindung erzielt wird. Wenn möglich, sollte in einem solchen Fall der Stoß an eine Stelle gelegt werden, an der die Spannungen entsprechend niedriger liegen.

d) Die Ursprungsfestigkeit ließ sich nach *Graf* bei Stumpfnähten bis auf $\rho_U = 24$ kg/mm² steigern, wenn die Raupen auf beiden Seiten sorgfältig gleichlaufend zur Zugrichtung abgehobelt und geschlichtet wurden. Man erkennt auch hieraus, wie wichtig bei Dauerbeanspruchung eine glatte, kerbfreie Oberfläche ist. Die Ursprungsfestigkeit der Schweißverbindungen kann auch durch sorgfältiges Anschleifen der Schweißraupen erhöht werden, wenn dabei ein allmählicher Übergang geschaffen wird und alle Kerben verschwunden sind."

e) „Es ist zwecks Erhöhung der Dauerfestigkeit einer Stumpfnaht (zur Verbindung von Teilen aus St 37) auch schon vorgeschlagen worden, Schweißdrähte

höherer Festigkeit zu verwenden. Wie aus Versuchen hervorgeht, ist es zwecklos, der Schweiße eine höhere Festigkeit zu geben als dem Mutterwerkstoff, weil diese doch nicht ausgenutzt wird; denn in den meisten Fällen bricht die Verbindung nicht in der Schweiße, sondern ausgehend von Kerben in der Übergangszone."

f) „Interessant ist auch ein Versuch[8] von Graf mit einer unter 45° geneigten V-Naht im Vergleich zur V-Naht rechtwinklig zum Blechrand. Wie aus folgender Tafel hervorgeht, kann die Ursprungsfestigkeit der V-Naht noch gesteigert werden:

Ursprungsfestigkeit der V-Naht	 a	b
Nahtwurzel nicht nachgeschweißt	$\rho_U = 12$ kg/mm²	$\rho_U = 17$ kg/mm²
Nahtwurzel nachgeschweißt	$\rho_U = 18$ kg/mm²	$\rho_U = 22$ kg/mm²

In beiden Fällen ging der Bruch von Kerben aus (s. Fig. 8 und 9).

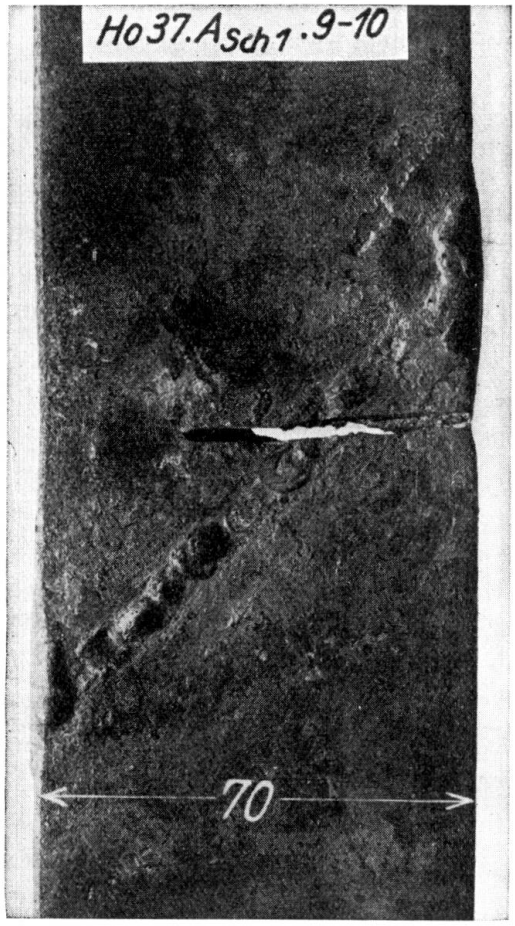


Fig. 8.
(Wurzel nicht nachgeschweißt.)

Fig. 9.
(Wurzel nachgeschweißt.)

Fig. 8 u. 9. Gasschmelzschweißung (schiefe V-Naht) aus St 37 mit oftmals wiederholter Zugbelastung.

[8] Autogene Metallbearbeitung, 1934, S. 5.

Da aber in einem Querschnitt senkrecht zur Kraftrichtung im Falle b der größte Teil des Querschnitts aus dem Mutterwerkstoff bestand, so ist hier der Einfluß der Kerben der Schweiße geringer als im Falle a. Durch eine schräge Lage der Stoßfuge und weiter noch durch Abarbeiten der Schweißraupen (Schlichten) kann die Dauerfestigkeit noch wesentlich gesteigert werden.

g) Zum Vergleich gibt *Graf* die Ursprungsfestigkeiten ungeschweißter Flachstäbe wie folgt an:

a) für St 37 mit Walzhaut ohne Bohrung $\sigma_U = 25$ bis 31 kg/mm²,

b) für St 37 mit Walzhaut und mit Bohrung $\sigma_U = 16$ bis 21 kg/mm².

In der Nietverbindung ist die Dauerfestigkeit wegen des Lochleibungsdrucks geringer, insbesondere in Verbindungen mit Zwischenanstrich. Sie liegt nach Ermittlungen von Dahlem etwa bei $\sigma_U = 15$ kg/mm².

In Stumpfnähten mit Nachschweißen der Wurzel und porenarmer Schweiße wurden dagegen, wie oben ausgeführt, folgende Ursprungsfestigkeiten gefunden:

$\rho_U = 18$ kg/mm² bei Lage der Naht $\perp$ zur Kraftrichtung,

$\rho_U = 22$ kg/mm² bei Lage der Naht unter 45° zur Kraftrichtung

(siehe Tafel 2).

Bemerkenswert ist also, daß die oberen Werte der Ursprungsfestigkeit gut geschweißter Stumpfnähte der Größenordnung nach die Ursprungsfestigkeit von Flachstäben mit Walzhaut und Bohrung erreichten. Dagegen wurde bis jetzt die Widerstandsfähigkeit der Stäbe ohne Bohrung auch von bearbeiteten Stumpfnähten nicht erreicht. Stuttgart weist noch besonders darauf hin, daß bei der Ursprungsfestigkeit der Stumpfnähte die Streuung zwischen den unteren und oberen Werten größer ist als bei den Flachstäben mit und ohne Bohrung; so fanden sich bei einfachen nicht bearbeiteten Stumpfnähten folgende Ursprungszugfestigkeiten:

Gasschmelzschweißungen mit 10 bis 26 mm dicken Blechen aus St 37 (5 Lieferungen) $\rho_{Uz} = 12$ bis 18 kg/mm²,

Lichtbogenschweißungen mit 10 bis 16 mm dicken Blechen aus St 37 (12 Lieferungen) $\rho_{Uz} = 9$ bis 18 kg/mm².

Die Ursprungs*druck*festigkeiten können bei Stumpfnähten so hoch wie die Spannungen an der Streckgrenze des Mutterwerkstoffs angenommen werden, also

$$\rho_{Ud} = 24 \text{ kg/mm}^2.\text{“}$$

4. Flankenkehlnähte.

a) „Bei den Flankenkehlnähten ist der Kraftfluß wesentlich ungünstiger als bei Stumpfnähten. Die Kraftlinien sind bei Verbindungen nach Fig. 11 am Übergang zu den Anschlußblechen stark zusammengerückt und fließen von der Hauptrichtung in die seitlichen Schweißraupen ab. Es ergeben sich Richtungswechsel der Kräfte und zugleich Querbiegungen der angeschlossenen Stäbe. Zu Versuchszwecken aus dem Vollen gearbeitete und dem Kreuzstoß nachgebildete Verbindungen zeigen schon einen starken Abfall der Dauerfestigkeiten, dazu kommt noch die Kerbwirkung der unregelmäßigen Übergänge der Schweißraupen zum Mutterwerkstoff. Dies alles hat zur Folge, daß bei den Ver-

suchen mit Flankenkehlnähten der Unterschied zwischen den Ergebnissen beim statischen Versuch gegenüber denjenigen beim Dauerfestigkeitsversuch noch wesentlich größer ist als bei den Stumpfnähten. Während beim statischen Versuch Flankenkehlnähte mittlerer Güte ebensoviel aushalten wie gut ausgeführte Stumpfnähte, ist die Dauerfestigkeit der Flankenkehlnähte wesentlich niedriger. Z. B. ist nach Fig. 11[9] rechts die Ursprungsfestigkeit $\rho_U = 9 - 0{,}5 = 8{,}5$ kg/mm²

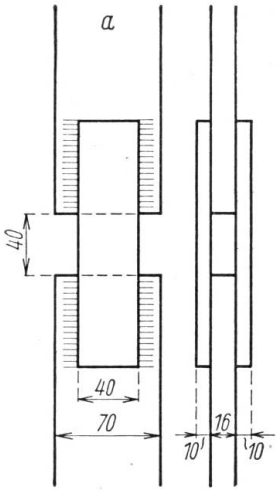


Fig. 10.

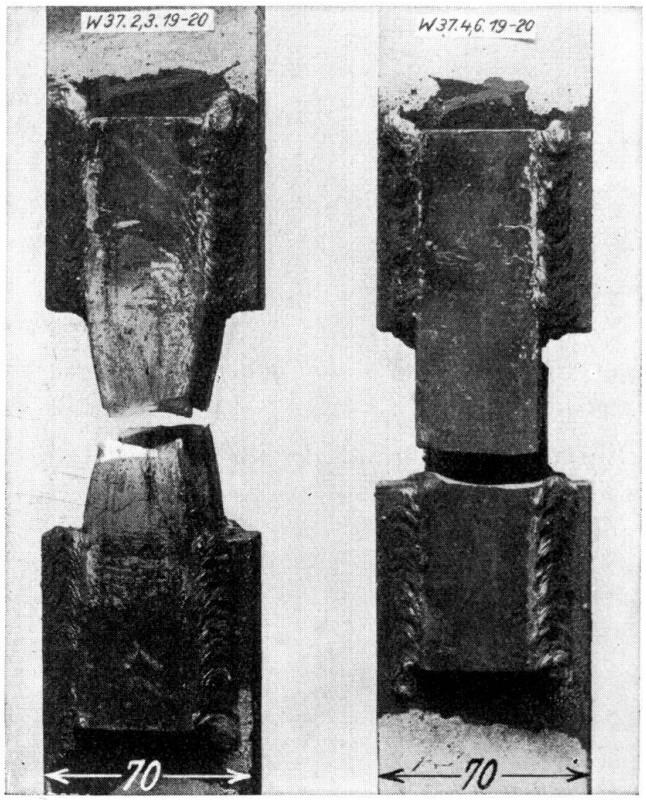


Fig. 11.

Zugversuche mit Flankenkehlnahtverbindungen nach Fig. 17. Lichtbogenschweißung, St 37. Links nach dem statischen Zugversuch, rechts nach dem Dauerzugversuch.

gegenüber der Zugfestigkeit $\sigma^B = 41{,}2$ kg/mm² beim statischen Zugversuch (Bild 11 links). Hier wirkt sich ein unregelmäßiger Übergang vom Werkstoff zur Schweißraupe (Kerb) noch viel nachteiliger aus (vgl. Fig. 12). Während also Kehlnähte im *Hochbau* auch bei Anschlüssen von Fachwerkstäben unbedenklich angewendet werden dürfen, können Kehlnähte bei *dynamisch beanspruchten Anschlüssen* nur unter bedeutender Herabsetzung der zulässigen Spannungen auch der Stäbe selbst zugelassen werden. An den Enden der Flankenkehlnähte treten hohe Spannungsschwellen auf. Diese können durch örtliches Nachgeben des Werkstoffs erheblich abgebaut werden. Um dies zu ermöglichen, wird man daher bei allen Kehlnähten, namentlich im *Brückenbau*, Schweißen hoher Verformbarkeit verlangen müssen.

[9] *Graf*, Über die Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen, Stahlbau 1933, S. 84 und 85.

Da, wie aus den Fig. 12 bis 14 (Stuttgart) hervorgeht, der Bruch (ausgehend vom Übergang der Schweißraupe) im Mutterwerkstoff eintritt, *so dürfen auch die durch solche Kehlnähte verbundenen Bauteile nicht höher*

Fig. 12.

beansprucht werden, als die ganze Schweißverbindung mit der nötigen Sicherheit verträgt.

b) Ein tiefer Einbrand der Schweiße in die zu verbindenden Bauteile kann wegen der Gefügeänderung eine große Kerbwirkung verursachen, die sich in die ganze Übergangszone erstrecken kann. Bei dynamisch beanspruchten Kehlnähten ist also zu tiefer Einbrand zu vermeiden. Bei Kehlnähten des Brücken-

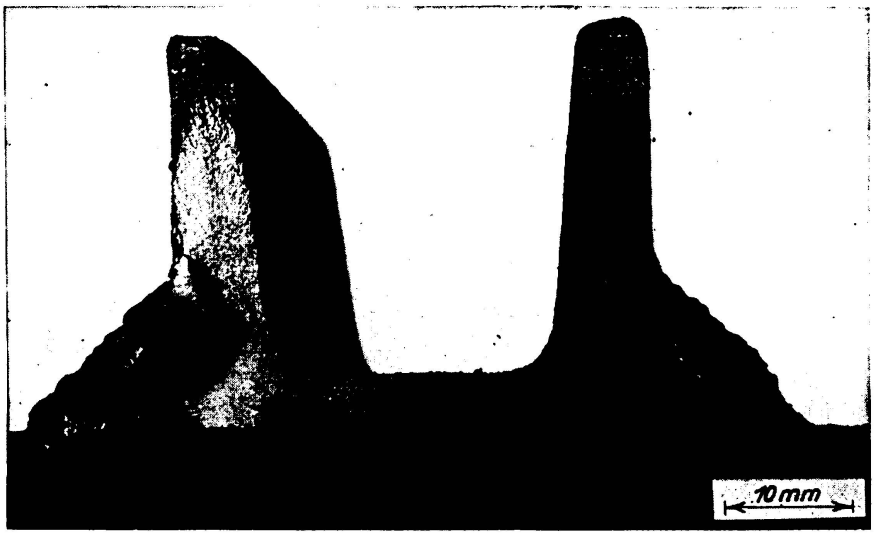


Fig. 13.

baues und Hochbaues ist es nötig, daß der Schweißer die vorgeschriebenen Maße der Schweißraupen möglichst genau einhält.

c) *Bei den Kehlnähten ist ein gutes Einschweißen in der Nahtwurzel besonders wichtig.*

d) Was bei den Stumpfnähten unter 3e über die Festigkeit des Schweißwerkstoffs gesagt wurde, gilt sinngemäß auch bei den Kehlnähten.

e) Bei Dauerzugversuchen mit Flankenkehlnähten wurde festgestellt, daß stets der Stab (in der Übergangszone) und nicht die Schweiße brach, wenn das Verhältnis

$$\frac{\text{Spannung in der Schweiße}}{\text{Spannung im Stab}} = \frac{\rho}{\sigma} = 0{,}5 \text{ war.}$$

War $\frac{\rho}{\sigma} = 1$ oder größer, so brachen die Nähte. Mit zunehmender Kehlnahtlänge nahm die Ursprungszugfestigkeit ρ_U der Verbindung zu. Bei $\frac{\rho}{\sigma} < 0{,}5$ ist ρ_U nur wenig gewachsen.

$\frac{\rho}{\sigma} = 0{,}5$ bedeutet, daß der Schweißnahtquerschnitt $F_{Schw} = 2 \cdot F_{Stab}$ wird. Von diesem Verhältnis ab ist also nicht mehr der Schweißnahtquerschnitt, sondern der Stabquerschnitt maßgebend. Es bricht dann im Dauerversuch stets der

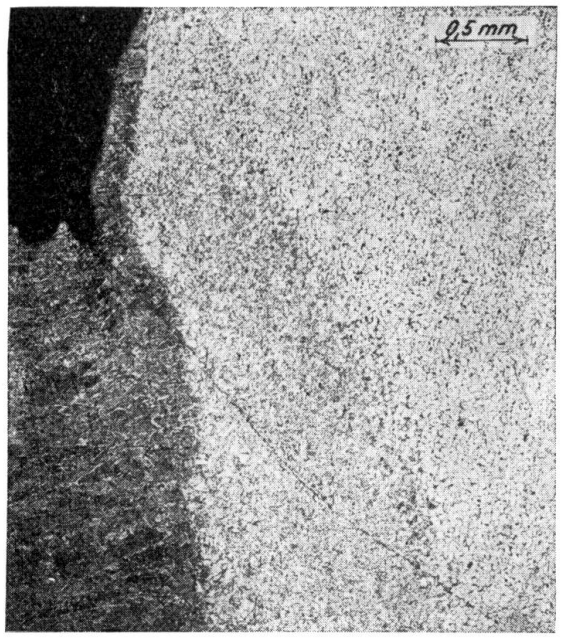


Fig. 14.

Stab. Auch die Versuche in der Schwingbrücke mit reinen Flankenkehlnahtverbindungen in Dahlem und Dresden bestätigen, daß bei einem Verhältnis[10] $\frac{F}{F_{Schw}} = 0{,}40$ bis $0{,}83$ nicht die Flankenkehlnähte, sondern stets der Stab oder die Laschen an den Nahtenden brachen.

Im Dauerversuch bildete der Bruch am Ende der Flankenkehlnähte die Regel, auch wenn statt der Flachstähle [-Stäbe genommen wurden (Fig. 12, 13 und 14 [Stuttgart]).

[10] Da $\frac{\rho}{\sigma} = \frac{\frac{S}{F_{Schw}}}{\frac{S}{F}} = \frac{F}{F_{Schw}}$ ist, so haben die Werte $\frac{F}{F_{Schw}}$ die gleiche Bedeutung wie die Werte $\rho : \sigma$.

f) Die Spannungsschwellen an den Flankenkehlnahtenden wurden um so größer, je größer die Laschenbreite B gewählt wird. Als Folge davon wird mit zunehmender Laschenbreite bei gleichbleibender Laschendicke ρ_U kleiner.

Laschenbreite B	25	40	70 mm
ρ_U	10	9	7 kg/mm²

siehe Stuttgarter Versuche.[11]

Es kann daher in Frage kommen, bei dynamisch beanspruchten Zugstäben statt einer sehr breiten Lasche mehrere schmale anzuordnen. Besser dürfte sein, von vornherein dickere Laschen zu wählen.

g) Um einen günstigeren Kräfteübergang zu erreichen, wurden bei der oben angeführten Laschenverbindung (B = 70 mm, ρ_U = 7 kg/mm²) die Stirnseiten der Laschen geschlitzt. Die Ursprungsfestigkeit war nur unwesentlich größer als bei der Anordnung ohne Schlitze, nämlich ρ_U = 8 kg/mm².

h) Es darf bei einem Laschenstoß mit Flankenkehlnähten niemals über die Stoßstelle hinweggeschweißt werden. Ebenso ist es für dynamisch beanspruchte Laschenverbindungen sehr ungünstig, wenn die einander zugekehrten Nahtenden an der Stoßlücke des Stabes nahe beieinander liegen, weil dadurch die Dauerfestigkeit der Laschen infolge größerer Spannungshäufung an den Laschenseiten über der Stoßlücke herabgesetzt wird. Als Beispiel seien einige Versuche in Dahlem-Dresden[12] (Zahlentafel 1) wiedergegeben.

Versuch Reihe Nr.	Abstand der Nahtenden über der Lücke des Stabes mm	ρ_u kg/mm²	ρ_o kg/mm²	Anzahl der ertragenen Lastwechsel 10^6
VI (St 37) VIa (S II)	5	i. M. 8	16	0,30 bis 0,51
VI E (St 37) VIa E (S II)	50	i. M. 8	17	1,06 bis 1,47
VI (St 37) Probe Da 4	5 Jedoch durch Anfräsen wurde ein allmählicher Übergang geschaffen	8	16	2,10

Bei dem Versuch VI (St 37 Da 4) machte sich der günstige Einfluß eines allmählichen Übergangs der Schweiße zum Blech deutlich bemerkbar.

Über einen gleichen Versuch berichtet *Bierett*.[13] Die Dauerfestigkeit war:

Probe unbearbeitet (Fig. 15) ρ_o = 8,5 kg/mm² bei 2 kg/mm² Vorspannung; Schwingweite ρ_W = 6,5 kg/mm²;

Nahtenden nachträglich abgefräst (Fig. 16) ρ_o = 12,5 kg/mm² bei 2 kg/mm² Vorspannung;

Schwingweite ρ_W = 10,5 kg/mm².

Bei einer Vorspannung von 10 kg/mm² ergab sich bei unbearbeiteten Nähten ρ_o = 16 kg/mm², also eine Schwingweite von ρ_W = 6 kg/mm². Da die Laschen

[11] Dauerfestigkeitsversuche mit Schweißverbindungen, Berlin 1935, VDI-Verlag.

[12] Wie vor.

[13] *G. Bierett*, Die Schweißverbindung bei dynamischer Beanspruchung. Die Elektroschweißung, April 1933, Heft 4.

mit der Schere geschnitten waren, für die Dauerfestigkeit also ungünstige Verhältnisse vorlagen, so stellen die letzteren Werte nur Vergleichswerte dar.

i) Bei geschweißten Verbindungen aus St 37 (Lichtbogen) ergab sich eine wesentliche Erhöhung der Ursprungsfestigkeit von $\rho_U = 9$ kg/mm² auf $\rho_U = 11$ kg/mm², wenn der lichte Abstand der gestoßenen Stabenden von 30 auf 200 mm erweitert wurde. Die Kraftlinien haben alsdann eine gestrecktere Form. Doch wird man von dieser baulichen Maßnahme nur wenig Gebrauch machen können.

k) Dauerfestigkeitsversuche mit geschweißten Blechträgern haben ergeben,[14] daß die Dauerfestigkeiten bei *unterbrochenen* Kehlnähten zwischen Stegblech

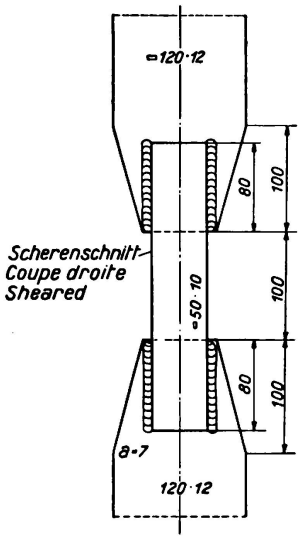


Fig. 15.

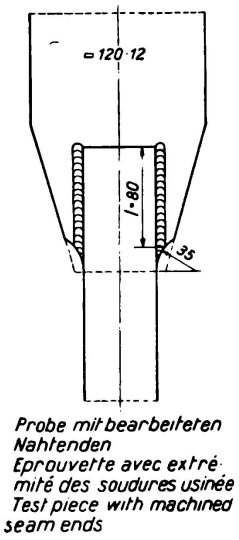


Fig. 16.

und Gurtung geringer sind als bei durchlaufenden Nähten. Dies ist leicht erklärlich, weil durch die plötzlichen Querschnittsänderungen am Anfang und am Ende der unterbrochenen Nähte Kerbwirkungen hervorgerufen werden. Bei *Brücken,* insbesondere wenn die Querschwellen unmittelbar auf den geschweißten Blechträgern liegen und ebenso bei geschweißten *Kranbahnträgern* wird man also durchlaufende *Kehlnähte* anordnen. Anders liegen die Verhältnisse im *Hochbau.* Hier wird man zwischen Stegblech und Gurtung ohne Bedenken auch unterbrochene Kehlnähte anordnen können, wenn nicht andere Gründe (z. B. Rostgefahr) auch hier durchlaufende Nähte angezeigt erscheinen lassen.

5. Stirnkehlnähte.

a) Bezüglich des zu tiefen Einbrandes gilt das unter 4b Gesagte gleichfalls, bezüglich des guten Einschweißens in der Wurzel gilt das unter 4c Gesagte; bezüglich der Festigkeit des Schweißwerkstoffs gilt das unter 3e Gesagte.

---

[14] *Hochheim,* Mitteilungen aus den Forschungsanstalten der Gute-Hoffnungshütte, 1932, 1, S. 225. Ein Träger mit unterbrochenen Schweißnähten und einer Randspannung von 1560 kg/cm² hielt nur 60 000 Lastwechsel aus, während der gleichartige Träger mit durchgehenden Kehlnähten und derselben Belastung bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln noch keinerlei Zeichen der Zerstörung zeigte.

b) Bei Stirnkehlnähten gemäß Fig. 17 und 18 begannen die Risse bei r, weitere Risse traten später bei s auf. Es wurden folgende Ursprungszugfestigkeiten erreicht:

Stirnkehlnähte	Gasschmelzschweißung	nach Fig. 17 und 18	$\rho_U = 11$ kg/mm²
	Lichtbogenschweißung	nach Fig. 17	$\rho_U = 7$ kg/mm².

Zum Vergleich seien die Werte für Flankenkehlnähte gegeben:

Flankenkehlnähte	Lichtbogenschweißung	nach Fig. 11	$\rho_U = 14{,}0$ kg/mm²
	Gasschmelzschweißung	nach Fig. 11	$\rho_U = 8{,}5$ kg/mm².

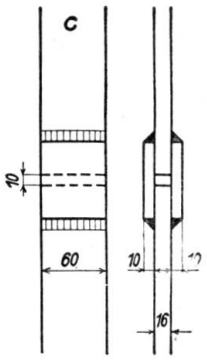


Fig. 17.

Dauerzugversuche mit Stirnkehlnahtverbindungen St 37.

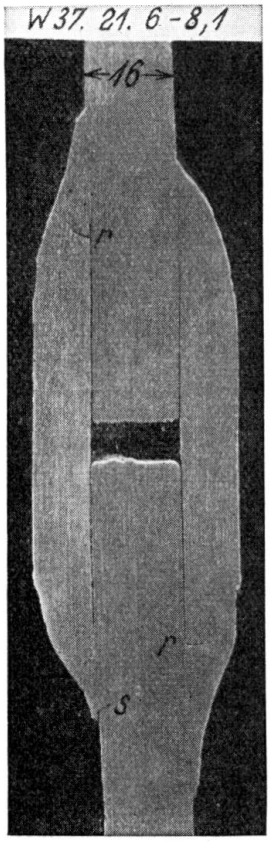


Fig. 18.

Stirnkehlnahtverbindung (Gasschmelzschweißverbindung St 37) nach oftmals wiederholter Zugbelastung.

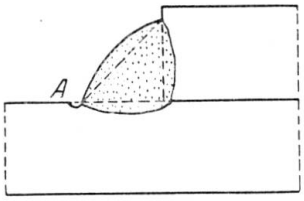


Fig. 19.

Sehr günstig hat sich bei der Gasschmelzschweißung der allmähliche Übergang der Schweißen zum Stab ausgewirkt. Unter 5c ist nachgewiesen, daß bei derselben Gestalt der Schweißraupen auch bei Lichtbogenschweißung höhere Werte erzielt werden. Bei zahlreichen Versuchen mit Stirnkehlnähten hat sich gezeigt, daß die Dauerfestigkeit wesentlich abgesunken ist, wenn bei A ein starker Einbrand mit unregelmäßiger Oberfläche (Vertiefung) entstanden ist (Fig. 19).

Bei dynamisch beanspruchten Bauteilen müssen die Ränder der Schweißraupen sorgfältig auf Fehler untersucht werden (Vergrößerungsglas); werden solche Fehler gefunden, so ist unbedingt ein Nachschweißen bei A zu verlangen. (Auch im *Hochbau* kann diese Maßnahme empfohlen werden, vgl. 5c). Hier liegt der

Fall vor, daß infolge des zu schroffen Übergangs der Schweiße zum Blech, aber auch durch unregelmäßige Oberfläche bei A eine ungünstige Kerbwirkung hervorgerufen wird. Dies ist nicht nur der Fall, wenn sich die Stirnnaht fast auf die ganze Breite des Zugstabes erstreckt, sondern auch wenn die Stirnnaht nur in eine Spitze ausläuft.

Stirnkehlnähte senkrecht zur Kraftrichtung bei Zugstäben, die stark dynamisch beansprucht sind, sollten daher möglichst vermieden werden, vgl. aber 5c (Verbesserung der Form). Im *Hochbau* braucht man nicht so ängstlich zu sein, doch sollten auch hier bei A, Fig. 20, keine Vertiefungen zugelassen werden.

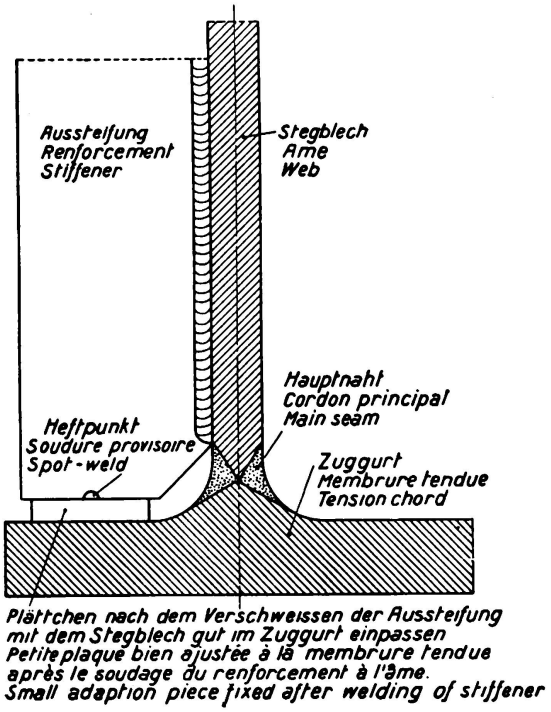


Fig. 20.

Wegen der Herabsetzung der Dauerfestigkeit durch Stirnkehlnähte rechtwinklig zur Kraftrichtung in Zugstäben soll man also z. B. im Brückenbau die Aussteifungen des Stegbleches nicht unmittelbar mit dem Zuggurt verschweißen. Da aber ein sattes Anliegen der Aussteifungen an beiden Gurtungen bei geschweißten Blechträgern sehr wichtig ist, so hilft man sich durch Einlegen von Plättchen zwischen Aussteifung und Zuggurt. Es genügt, wenn die gut eingepaßten Plättchen durch Heftschweißung mit den Aussteifungen gegen Herausfallen geschützt werden.

Die Aussteifungen werden an beiden Gurtungen bei der Hauptkehlnaht (zwischen Stegblech und Gurtung) ausgeschnitten, damit die bereits ausgeführte Hauptnaht beim Aufschweißen der Aussteifung nicht noch einmal beunruhigt und damit auch die Untersuchung dieser Nähte nicht erschwert wird. Im Druckgurt können die Aussteifungen unmittelbar mit der Gurtung verschweißt werden.

(Im Hochbau können die Ausgleichplättchen namentlich bei hohen Trägern ebenfalls zweckmäßig sein. Durch das Aufschweißen der Aussteifungen auf dem Stegblech schrumpfen die Anschlußnähte, und ein sattes Anliegen der Aussteifungen auch am Untergurt ist bei größerer Höhe der Stegbleche nicht zu

erwarten. Durch mehr oder weniger dicke Plättchen kann das gerade bei geschweißten Blechträgern wichtige satte Anliegen der Aussteifungen an beiden Gurtungen leicht erzielt werden.)

c) Nach Versuchen im staatlichen Materialprüfungsamt in Dahlem spielt bei der Dauerfestigkeit von Stirnkehlnahtverbindungen[15] die Form der Naht eine ausschlaggebende Rolle.

„Die Dauerfestigkeit an mit blanken Schweißdrähten geschweißten, unter etwas weniger als 45° geneigten Stirnkehlnähten hat sich bei 2 kg/mm² Vorspannung und bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln zu 10,8 kg/mm² ergeben. Der Dauerbruch erfolgte durch das gestoßene Blech am Ansatz der Naht.

Selbst bei Verwendung von Schweißdrähten mit größerer Dehnfähigkeit, im besten Fall bis zur vollen Übereinstimmung mit den mechanischen Eigenschaften des Mutterwerkstoffs, ist kein besseres Ergebnis zu erwarten, wenn die den Ver-

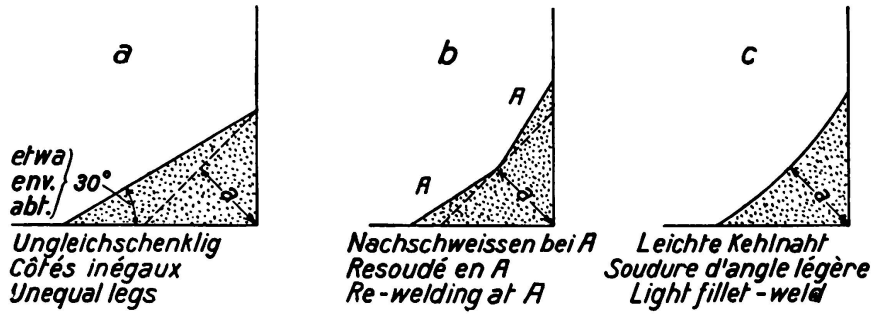


Fig. 21.

Zweckmäßige Form der Stirnkehlnähte bei dynamisch beanspruchten Bauteilen.

suchen zugrunde gelegte geometrische Form (gleichschenklige Kehlnaht mit Wulst) vorliegt. Wohl kann sich bei der Lichtbogenschweißung die Verwendung umhüllter Schweißdrähte empfehlen, da sie in der Regel größere Dehnfähigkeit der Schweiße gewähren, wenn infolge ihrer Eigenschaften beim Schweißen eine günstigere geometrische Form des Raupenquerschnitts, besonders ein allmählicher Auslauf der Nahtoberfläche in die Blechoberfläche, erzielt wird.

Bei entsprechender Gestaltung der Raupen muß deshalb die Stirnkehlnaht auch ohne anschließende Flankennähte, vielleicht aber in Verbindung mit Stumpfnähten, als ein wichtiges und hochwertiges Konstruktionselement der geschweißten Konstruktionen angesehen werden."

Während man also im Anfang die volle Kehlnaht für besser hielt, hat sich durch die Dauerfestigkeitsversuche diese Anschauung vollkommen geändert. Bei allen dynamisch beanspruchten Kehlnähten sind die oben angegebenen Formen, insbesondere die Hohlkehlnaht Fig. 21 besser.

Nach der Zahlentafel 2 des Gemeinschaftsberichts Dahlem-Dresden[16] ergaben sich folgende Dauerfestigkeitswerte bei einer Neigung der Nahtoberfläche zur Blechebene $< 45°$:

---

[15] *Bierett* und *Grüning*, Spannungszustand und Festigkeit von Stirnkehlnahtverbindungen. Stahlbau 1933, Heft 22.

[16] Siehe [11].

		ρ_u	ρ_o	ρ_U
Stirnkehlnähte	G IV (St 37) Gasschmelzschweißung .	2,0	12,5	11,0 kg/mm²
	IV (St 37) Lichtbodenschweißung .	2,0	10,8	9,3 kg/mm²
		(blanke Schweißdrähte)		

Die Dahlemer Versuche stimmen mit den unter 5b erwähnten Stuttgarter Versuchen bezüglich der Gasschmelzschweißung vollkommen überein. Vergleicht man den in Stuttgart gefundenen Wert von $\rho_U = 7$ kg/mm² einer unter 45° geneigten Stirnkehlnaht, die mit Lichtbogen geschweißt war, mit dem in Dahlem gefundenen obigen Wert $\rho_U = 9{,}3$ kg/mm², so ist die Verbesserung durch die schwächer geneigte Nahtform unverkennbar. Es ist nicht ausgeschlossen, daß durch die Verwendung umhüllter Schweißdrähte oder solcher mit Seele der Übergang noch besser gestaltet werden kann, so daß auch bei Lichtbogenschweißung noch höhere Ursprungsfestigkeiten erzielt werden.

d) Bei Stirnkehlnähten nach Fig. 22 (Kreuzstoß) konnte die Ursprungsfestigkeit bedeutend durch das Zuspitzen der Bleche gesteigert werden. Es handelt sich um Lichtbogenschweißungen mit Blechen aus St 52 und Verwendung eines besonderen Schweißdrahts. Es ergab sich:

Bei Ausführung		a	b	c
Beim statischen Zugversuch	σ_B	48,2	56,7	58,2 kg/mm²
Ursprungsfestigkeit	ρ_U	9,5[17]	11,0	15,0 kg/mm²

Der Kraftfluß ist im Fall 22c am günstigsten; bemerkenswert ist, daß auch beim *statischen Versuch* die Verhältnisse durch das Zuschärfen der Bleche günstiger wurden *(Hochbau)*.

Von dieser Maßnahme hat Dörnen beim Anschluß des Stegblechs an die Gurtung Gebrauch gemacht. Er ging schließlich dazu über, sich eigens geformte Gurtplatten walzen zu lassen (Peiner Walzwerk) und hat dadurch erreicht, daß die beiden Kehlnähte durch eine Stumpfnaht (X-Naht) ersetzt wurden (Fig. 23).

6. Verbindung von Stumpf- und Kehlnähten.

In der Materialprüfungsanstalt in Stuttgart wurde die Frage geprüft, ob denn durch die Verwendung von Laschen über den Stumpfnähten die Dauerzugfestigkeit gesteigert werden kann. An sich bilden die Laschen eine Verstärkung, allein durch die Kehlnähte entstehen an anderen Stellen Spannungsschwellen, die von der Form der Nähte und vom Verhältnis der Laschendicke zur Blechdicke abhängig sind. Fig. 24 zeigt, daß beim statischen Zugversuch die Stumpfnaht bei $\sigma_B = 30{,}4$ kg/mm² riß und daß nach Aufschweißen der Lasche die Zugfestigkeit $\sigma_B = 38{,}4$ kg/mm² betrug. Es riß der Stab bei der beim statischen Versuch üblichen Einschnürung. Für den *Hochbau* kann also

[17] Nach dem Gemeinschaftsbericht Dahlem-Dresden (vgl. Fußnote [11]) Zahlentafel 2 G II E (St 37) wurde bei 2 kg/mm² Vorspannung eine Dauerzugfestigkeit von 10,5 kg/mm² gefunden, was einer Ursprungszugfestigkeit $\rho_U = 9{,}5$ kg/mm² entspricht, die Übereinstimmung ist vollständig.

eine Verstärkung durch Laschen bis zur vollen Ausnutzung des Stabes erreicht werden.

Bei dem Dauerzugversuch war die Ursprungsfestigkeit der Stumpfnaht allein $\sigma_U = 9$ kg/mm², der Stumpfnaht mit aufgeschweißter Lasche $\sigma_U = 12$ kg/mm².

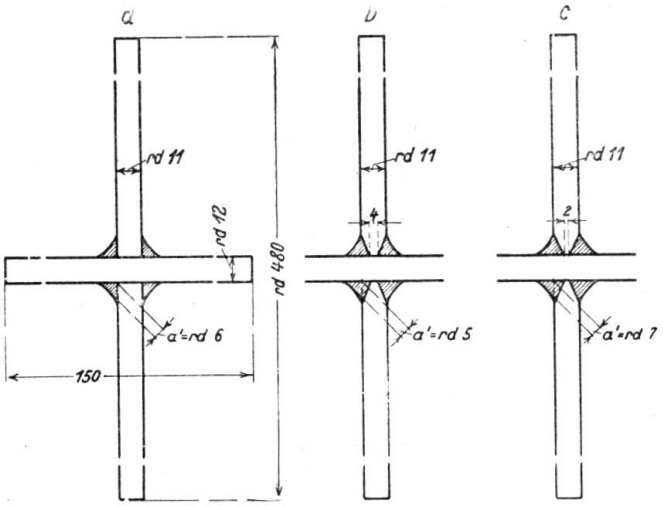


Fig. 22.

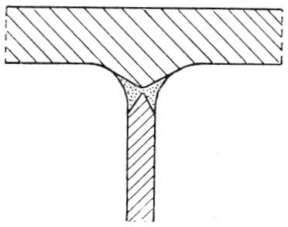


Fig. 23.

Geschweißte Kreuzstöße (Lichtbogenschweißung).

Da es sich bei einer Stumpfnaht mit $\sigma_U = 9$ kg/mm² um eine wenig gute Naht handelte, so konnte durch die Laschen tatsächlich eine Verbesserung erzielt werden, jedoch bei weitem nicht so viel, wie eine gute Stumpf-

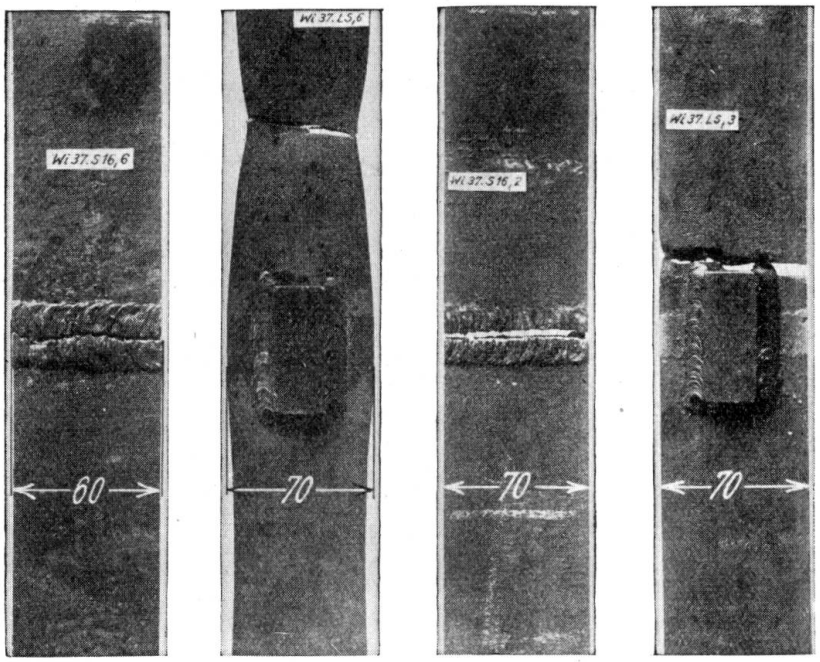


Fig. 24.

Statische Zugversuche		Dauerzugversuche	
σ_B 30,4	38,4 kg/mm²	σ_U 9	12 kg/mm²

Fig. 24. Stumpfnähte ohne und mit Decklaschen, St. 37, Lichtbogenschweißung.

naht hergeben würde. Fig. 25 zeigt, wie eine bessere Stumpfnahtverbindung mit $\sigma_U = 13$ kg/mm² durch die Laschen sogar verschlechtert wurde ($\sigma_U = 10$ kg/mm²). Der Stab brach am Ende der Laschen beim Beginn der Kehlnähte. Aus Fig. 26 geht hervor, daß eine Stumpfschweißnahtverbindung, bei der die Wurzel nicht nachgeschweißt war und eine Ursprungszugfestigkeit $\sigma_U = 12$ kg/mm² lieferte (26a), auf $\sigma_U = 18$ kg/mm² gebracht werden konnte, wenn die Laschen gemäß Bild 26d abgearbeitet waren. Dieser Wert wird auch von einer guten nachgeschweißten Stumpfnaht erreicht.

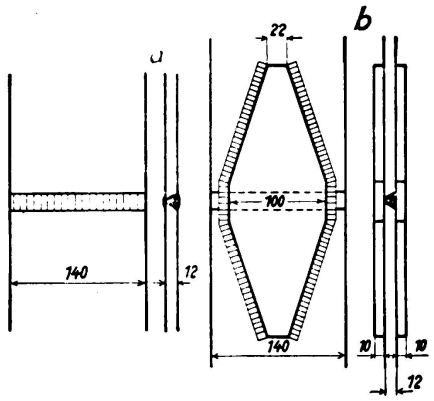


Fig. 25.

σ_U 13 10 kg/mm²

Dauerzugversuche mit Lichtbogenschweißungen, St 37,, Schweißnahtwurzel nachgeschweißt.

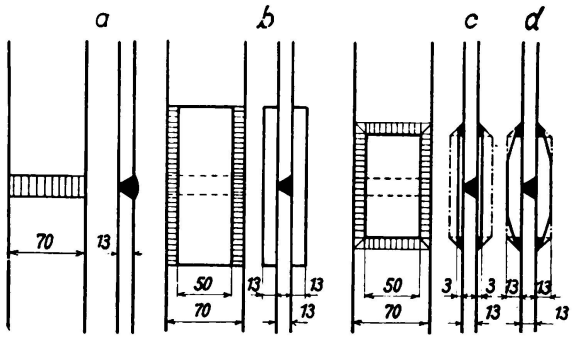


Fig. 26.

σ_U 12 13 17 18 kg/mm²

Dauerzugversuche mit Gasschmelzschweißungen, St 37, Schweißnahtwurzel nicht nachgeschweißt.

Man wird von dieser Erkenntnis z. B. beim Stoß von Gurtplatten Gebrauch machen, wenn nach den örtlichen Verhältnissen der Stumpfstoß nicht nachgeschweißt werden kann, in seiner Güte also zweifelhaft ist.

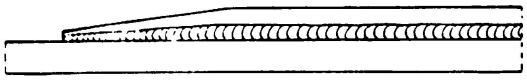


Fig. 27.

Aus diesem Versuch ergibt sich auch, daß es bei dynamisch beanspruchten Bauwerken zweckmäßig ist, Gurtplatten an ihrem Beginn abzuflachen (Fig. 27), um so die Kräfte allmählich überzuleiten."

Im *Hochbau* ist eine solche Maßnahme nicht notwendig.

7. Zusammenfassung[18] der Ergebnisse der Dauerfestigkeitsversuche.

a) Schweißverbindungen, die rein statisch beansprucht wurden, erreichten Zugfestigkeiten, die denjenigen des Mutterwerkstoffes entsprachen ($\sigma_B = 37$ bis 42 kg/mm²). Es zeigte sich bei den Versuchen die übliche Einschnürung.

b) Dieselben Schweißverbindungen in den Pulsatormaschinen oder in Schwingbrücken geprüft, ergaben bei 2 Millionen Lastwechseln Ursprungsfestigkeiten von nur

[18] Siehe *Kommerell*, Erläuterungen zu den Vorschriften für geschweißte Stahlbauten, 4. Auflage. Teil II: Vollwandige Eisenbahnbrücken.

σ_U = 13 bis 18 kg/mm² bei Stumpfnähten,
σ_U = 6,5 „ 10,3 „ „ Stirnkehlnähten,
σ_U = 8 „ 12 „ „ Flankenkehlnähten.

Es trat der bekannte Dauerbruch ein. Es haben sich also Stumpfnähte erheblich besser erwiesen als Kehlnähte.

c) Die Dauerbrüche gingen meist durch den Mutterwerkstoff hindurch und nahmen häufig ihren Ausgang von kleinen Oberflächenvertiefungen am Übergang der Schweißraupen zum Blech (Kerbwirkung) (Fig. 28).

d) Bei Stumpfnähten, die in der Wurzel nicht nachgeschweißt wurden, sank die Ursprungsfestigkeit auf etwa das 0,7fache der Verbindungen mit Nachschweißen der Wurzeln.

e) Werden beste Stumpfnähte in gezogenen Bauteilen unter 45° angeordnet, dann steigt bei St 37 die Ursprungsfestigkeit von σ_U = 18 kg/mm² auf σ_U = 22 kg/mm². Die Proben sind in der Mitte bei aa gebrochen (Fig. 29).

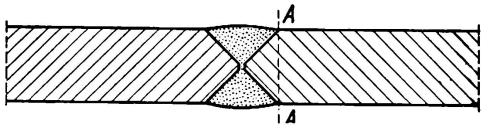


Fig. 28.

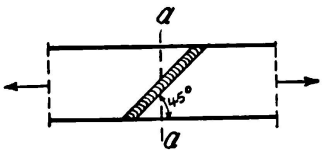


Fig. 29.
Stumpfnaht unter 45° aufs beste bearbeitet.

f) Bei einem Versuch, bei dem eine Stumpfnahtverbindung zusätzlich durch Laschen mit Kehlnähten gedeckt wurde, sank sogar die Ursprungsfestigkeit, die bei der (allerdings wenig guten) Stumpfnaht 13 kg/mm² war, auf 10 kg/mm². Die Verbindung brach am Beginn der Kehlnähte in der Nähe der Decklaschen.

g) Bei allen Kehlnähten sank die Dauerfestigkeit erheblich, wenn nicht bis in die Wurzel geschweißt wurde.

h) Bei Stirnkehlnähten haben sich im Gegensatz zu früheren Anschauungen leichte Kehlnähte mit allmählichem Übergang der Schweiße zum Blech als besser erwiesen als die vollen Kehlnähte.

i) An Stellen, an denen Stirnkehlnähte angeordnet sind, oder da, wo Bauteile durch Flankenkehlnähte an durchgehende Bauteile angeschlossen sind, also überall da, wo Flankenkehlnähte beginnen oder endigen, muß die zulässige Spannung im Bauteil selbst auf

$$\sigma = \alpha \sigma_{zul}$$

herabgesetzt werden. Der Wert α ist abhängig vom Verhältnis $\frac{\min M}{\max M}$ (s. Tafel 2V Zeilen 14 bis 17).

k) Wird an Stellen, an denen Kehlnähte beginnen oder endigen, der Übergang der Schweiße zum Blech und der neu angeschlossenen Bauteile sanft auslaufend gestaltet, so ergibt sich eine wesentlich höhere Ursprungsfestigkeit.

l) Die *Form* der Naht, insbesondere am Übergang der Schweiße zum Blech, spielt eine ausschlaggebende Rolle; sie ist viel wichtiger als das verwendete Schweißgut.

m) Die Ergebnisse der Dauerfestigkeitsversuche in den Schwingbrücken stimmten im wesentlichen mit denen in den Pulsatormaschinen überein.

n) ein wesentlicher Unterschied zwischen den Bauteilen aus St 37 und denen aus St 52 wurde bei den Dauerfestigkeitsversuchen nicht gefunden. Erst bei größerer Vorspannung kommen die höherwertigen Baustähle mehr zur Geltung.

o) Da nach den Dauerfestigkeitsversuchen die Ursprungsfestigkeiten oft sehr niedrig waren, während die rein statischen Versuche mit denselben Proben hohe Werte für die Zugfestigkeit σ_B ergaben, so müssen die Schweißdrähte für Brücken auch auf Dauerfestigkeit geprüft werden.

p) In letzter Zeit nach Erscheinen des Kuratoriumsberichts durchgeführte Dauerfestigkeitsversuche mit in der Längsrichtung beanspruchten, durchlaufenden Kehlnähten ergaben ebenso hohe Ursprungsfestigkeiten wie bei Stumpfnähten (σ_U = 16 bis 18 kg/mm²).

q) Während man früher namentlich bei dynamisch beanspruchten, gezogenen Bauteilen rein gefühlsmäßig Kehlnähte für die zuverlässigere Bauweise hielt, erwiesen sich bei den Dauerfestigkeitsversuchen richtig ausgeführte Stumpfnähte als wesentlich besser. Es rührt dies daher, daß bei den Stumpfnähten der Kraftfluß viel natürlicher ist, während bei Kehlnahtanschlüssen die Kräfte oft aus ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt werden müssen, wobei schon durch die plötzlichen Querschnittsänderungen Spannungsspitzen entstehen. Ganz besonders ist eben die Bedeutung eines ungestörten Kraftflusses bei dynamisch beanspruchten Schweißverbindungen hervorgetreten. Wenn also die zulässigen Spannungen bei Stumpfnähten wesentlich höher sein können als bei Kehlnähten und sich dies — wie später gezeigt wird — auf die Abmessungen der zu verbindenden Bauteile auswirken wird, so muß dies schon aus wirtschaftlichen Gründen dazu führen, bei dynamisch beanspruchten Bauwerken — wo irgend möglich — Stumpfnähte anzuordnen. Dies hat zugleich den Vorteil, daß ausgeführte Stumpfnähte leichter auf ihre Güte untersucht werden können (Röntgenverfahren) als Kehlnähte.

r) Während man bei der Berechnung geschweißter Brücken früher glaubte, daß man nur die Schweißraupen ausreichend bemessen müsse, um die Bauwerke einwandfrei ausführen zu können, wird man nach den Ergebnissen der Dauerfestigkeitsversuche sein Augenmerk ebensosehr auf den Bauteil selbst, der verschweißt werden soll, lenken müssen. Denn bei den Versuchen sind vielfach nicht die Schweißen gerissen, sondern die Bauteile, und zwar meist im Übergangsgebiet. Die zulässigen Spannungen in den Bauteilen dürfen also nicht höher sein als in den Schweißnähten selbst.

s) Aus den Versuchen hat sich auch ergeben, daß die Lichtbogen- und Gasschmelzschweißung bei dynamisch beanspruchten Bauteilen im allgemeinen als gleichwertig anzusehen sind. Wenn auch die unteren Werte der Ursprungsfestigkeiten in Stumpfnähten bei den gasgeschweißten Proben etwas höher lagen, so wurden doch bei beiden Schweißarten dieselben Höchstwerte, z. B. $\sigma_U = 18$ kg/mm², erreicht. Dasselbe trifft für Kehlnähte zu. Bei beiden Schweißverfahren brachen die Versuchskörper ausgehend von den Enden der Flankenkehlnähte. Das günstigere Verhalten der gasgeschweißten Stirnkehlnähte ist auf

die günstigere Querschnittsform der Nähte — allmählicher Übergang der Nahtoberfläche zum Blech — zurückzuführen. Bei gleicher Gestaltung der Nahtoberfläche wurden gleich gute Ergebnisse bei der Lichtbogenschweißung erzielt.

D. *Die mit Rücksicht auf die Dauerfestigkeit zulässigen Spannungen* $\sigma_{D\,zul}$.

1. Allgemeines.

Eine vernünftige und ungekünstelte Bauweise ist nur möglich, wenn auch auf Zug oder Biegung beanspruchte Bauteile stumpf zusammengeschweißt werden dürfen, ohne daß noch eine besondere Laschendeckung notwendig wird. Selbstverständlich muß der Stumpfstoß an einer Stelle liegen, an der auch im Bauteil die für solche Fälle zulässige Spannung nicht überschritten wird.

2. γ-Verfahren.[19]

Nach den „Berechnungsgrundlagen[20] für stählerne Eisenbahnbrücken der Deutschen Reichsbahn (BE)" „ist anzustreben, allen Einzelteilen eines Überbaues den gleichen Sicherheitsgrad zu geben." Dieser Grundsatz läßt sich am einfachsten und übersichtlichsten durchführen, wenn alle Spannungen auf den Wert σ_{zul} (zulässige Biegespannung ungestoßen durchgehender Bauteile) zurückgeführt werden. (Beispielsweise soll bei der Berechnung von Druckstäben der Wert

$$\sigma = \omega \cdot \frac{S}{F} \leqq \sigma_{zul}$$

sein: ω ist diejenige, die Knickverhältnisse berücksichtigende Zahl, mit der bei mittigem Kraftangriff die Druckkraft S zu vervielfältigen ist, damit der Stab hinsichtlich der zulässigen Spannung wie ein Zugstab behandelt werden kann.)

Ein ähnliches Verfahren (γ-Verfahren) wurde bei der Deutschen Reichsbahn sowohl bei genieteten, als auch bei geschweißten Brücken eingeführt, um die Dauerfestigkeit σ_D des Werkstoffs bei Teilen, die wechselnden oder schwellenden Spannungen unterliegen, zu berücksichtigen.

Ist $\sigma_{D\,zul}$ die zulässige Spannung bei Berücksichtigung der Dauerfestigkeit (im allgemeinen kleiner als σ_{zul}), so setzen wir bei vollwandigen Brücken

$$\sigma_{D\,zul} = \frac{\max M}{W} = \frac{\sigma_{zul}}{\gamma}, \tag{2}$$

daraus

$$\sigma = \gamma \cdot \frac{\max M}{W} = \sigma_{zul}. \tag{3}$$

Wenn also der Wert $\gamma \cdot \frac{\max M}{W}$ dem Werte σ_{zul} gegenübergestellt wird, so stellt γ diejenige Zahl ($\geqq 1$) vor, mit der das größte Biegemoment vervielfacht werden muß, damit der Träger so berechnet werden kann, wie wenn er nur ein

[19] Siehe *Kommerell*, γ-Verfahren zur Berechnung von Fachwerkstäben und auf Biegung beanspruchten Trägern bei wechselnder Belastung. „Bautechnik" 1933, S. 114.

[20] Berlin 1934, erhältlich im Reichsbahn-Zentralamt Berlin, Halle'sches Ufer.

Biegemoment max M herrührend von sich stets gleichbleibender Belastung (wie z. B. im Hochbau) aufzunehmen hätte.

Sind unter Berücksichtigung der Stoßzahl $\varphi \begin{matrix} \min M \\ \max M \end{matrix}$ die *Grenzwerte* der Biegemomente — also die ungünstigsten Grenzwerte, die bei einer Zugfahrt auftreten können — und ist min M das zahlenmäßig kleinste, max M das zahlenmäßig größte Biegemoment, so ergibt sich folgendes:

Bei Trägern mit stets gleichbleibender Belastung wäre

$$\sigma = \frac{\max M}{W} \leqq \sigma_{zul} \text{ zu machen.} \tag{4}$$

Dagegen wäre bei Brücken, wo unter dem Einfluß der Verkehrslast wechselnde Spannungen (Grenzspannungen mit verschiedenen Vorzeichen), oder schwellende Spannungen (Grenzspannungen mit gleichen Vorzeichen) hervorgerufen werden, nicht nur das größte Biegemoment max M, sondern auch noch ein Teil des kleinsten Biegemoments zu berücksichtigen. Das Maß des Einflusses soll durch die noch zu bestimmenden Beiwerte a und b nach folgender Formel festgelegt werden:

$$\sigma = \frac{a \cdot \max M + b \cdot \min M}{W} = \left(a + b \cdot \frac{\min M}{\max M}\right) \cdot \frac{\max M}{W} \leqq \sigma_{zul} \tag{5}$$

Der Klammerausdruck ist nichts anderes, als der γ-Wert der Formel (3), d. h. es ist

$$\gamma = a + b \cdot \frac{\min M}{\max M} \tag{6}$$

als geradlinige Funktion von $\frac{\min M}{\max M}$ angenommen worden.

So ist z. B. bei genieteten Brücken

$$\gamma = 1 - 0{,}3 \cdot \frac{\min M}{\max M}. \tag{7}$$

Wie in meinem zum 1. Kongreß in Paris erstatteten Bericht S. 332 dargelegt, wurden früher die Schweißnähte bei Brücken mit Hilfe der folgenden Formel berechnet:

$$M = \max M + \frac{1}{2}(\max M - \min M) = \max M\left(1{,}5 - 0{,}5\,\frac{\min M}{\max M}\right), \tag{8}$$

daraus

$$\gamma = 1{,}5 - 0{,}5\,\frac{\min M}{\max M}. \tag{9}$$

Wie schon aus Tafel 2 hervorgeht, sind die Dauerfestigkeiten bei den einzelnen Nahtarten und je nach der Güte der Ausführung der Schweißnähte sehr verschieden. Die Wechselfestigkeiten schwanken zwischen 4,2 und 13,0 kg/mm², die Ursprungsfestigkeiten zwischen 8,0 und 22,0 kg/mm².

Wenn ich zwar im Kuratoriumsbericht S. 46, Fig. 16** und 17**, auch für Kehlnähte, die nicht so hoch wie ungestoßen durchgehende Bauteile beansprucht werden dürfen, besondere γ-Werte vorschlug, so kam ich bei weiterer Durcharbeitung wieder davon ab, weil sonst noch für eine große Anzahl anderer Fälle

besondere γ-Werte hätten berechnet werden müssen, wenn in diesen Fällen die zulässigen Spannungen kleiner als in ungestoßen durchgehenden Bauteilen sind. Diese hätten die Vorschriften sehr unübersichtlich und verwickelt gemacht. Auch der Versuch, die Vorschriften möglichst einfach zu machen, indem man die γ-Werte für den ungünstigsten Fall festsetzt und nur *einen* Abminderungsbeiwert $\alpha = 0{,}65$ einführt, erwies sich nicht gangbar, weil sonst die γ-Werte so hoch geworden wären, daß statisch unbestimmte, geschweißte Träger mit genieteten nicht mehr wettbewerbsfähig geworden wären. Der Ausweg wurde in veränderlichen α-Werten *(Formzahlen)* gefunden (siehe Tafel 2 V u. 3 V).

Wenn unter Berücksichtigung der γ-Werte ungestoßen durchgehende Bauteile mit $\sigma_{zul} \begin{pmatrix} 1400 \text{ bei St } 37 \\ 2100 \text{ ,, St } 52 \end{pmatrix}$ beansprucht werden dürfen, so ist die zulässige Spannung in Fällen, in denen eine so hohe Spannung nicht zugelassen werden darf, nur

$$\sigma'' = \alpha \sigma_{zul},$$

wo α aus den Tafeln 2 V und 3 V zu entnehmen ist. Um nun alles auf einen einheitlichen Maßstab (nämlich σ_{zul}) zu bringen, wurde der Wert

$$\frac{\sigma''}{\alpha} \leqq \sigma_{zul}$$

eingeführt, was dann zu der Formel

$$\sigma_I = \frac{\gamma}{\alpha} \cdot \frac{\max M_I}{W_n} \leqq \sigma_{zul} \tag{5 V}$$

führte.

3. Die Spannungshäuschen.

Es ist klar, daß man mit den zulässigen Spannungen $\sigma_{W\,zul}$, $\sigma_{U\,zul}$ nicht bis an die Dauerfestigkeitswerte, wie sie in Pulsatormaschinen oder Schwingbrücken bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln gefunden werden, herankommen darf, wenn auch die schwingenden Belastungen der Festigkeitsberechnungen nur selten erreicht werden. Es können im Innern der Werkstoffe und in den Schweißverbindungen Ungleichmäßigkeiten vorkommen, die auch bei gründlichster Abnahme nicht gefunden werden. Bei Festsetzung der Spanne zwischen der Dauerfestigkeit in Pulsatormaschinen bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln und den zulässigen Spannungen von Schweißverbindungen ging der Arbeitsausschuß auf meinen Vorschlag hin von den guten Erfahrungen bei stählernen, genieteten Eisenbahnbrücken aus. Bei diesen ist nach den BE (Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken) bei Berücksichtigung der Hauptkräfte bei St 37

$$\sigma_{zul} = 1400 \text{ kg/cm}^2.$$

Mit Wind- und Zusatzkräften ist $\sigma_{zul} = 1600$ kg/cm². Die Wind- und Zusatzkräfte treten nicht bei jeder Zugfahrt auf, sie wirken vielmehr ähnlich wie die Vorlast (ruhende Last). Bei Berücksichtigung der Wind- und Zusatzkräfte ist es also etwa so, wie wenn die ruhende Last um 200 kg/cm² höher wäre. Da aber die Schwingweite σ_W innerhalb des in Frage kommenden Bereichs als gleich groß angenommen werden darf, so folgt, daß die Dauerfestigkeit bei Berücksichtigung

von Wind- und Zusatzkräften ebenfalls um 200 kg/cm² höher sein wird. Es genügt also, die Verhältnisse bei Berücksichtigung nur der Hauptkräfte zu klären. Zum Vergleich wurden die Dauerfestigkeitsversuche mit *genieteten* Versuchsstäben herangezogen. Die Ursprungsfestigkeit von Nietverbindungen (ähnlich in ihren Abmessungen wie die geschweißten Verbindungen) wurde zu $\sigma_{Uz} = 15$ kg/mm² gefunden (s. Wöhlerlinie S. 16, Abb. 34 im Kuratoriumsbericht). Solche Werte und manchmal sogar noch niedrigere wurden in Pulsatormaschinen öfters festgestellt, namentlich, wenn die sich überdeckenden Flächen vorher einen Grundanstrich mit Bleimennige erhielten. Die Spanne zwischen der Ursprungsfestigkeit und der zulässigen Spannung ist also

$$\sigma_U - \sigma_{zul} = 15 - 14 = 1 \text{ kg/mm}^2.$$

Richtig hergestellte Schweißverbindungen sind den genieteten Verbindungen durchaus gleichwertig, oft sogar überlegen. Es liegt also kein Grund vor, bei geschweißten Brücken ungünstigere Verhältnisse als bei genieteten Brücken anzunehmen. Der Arbeitsausschuß beschloß also, die σ_{zul}-Werte um die Spanne von mindestens 1 kg/mm² niedriger anzunehmen als die Dauerfestigkeitswerte bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln.

(Bei diesem Vorgehen erübrigen sich alle Erörterungen darüber, ob die in rascher Folge in den Pulsatormaschinen sich abspielenden Lastwechsel ohne weiteres auch Schlüsse auf die Beanspruchungen in Eisenbahnbrücken ziehen lassen, wo die Lastwechsel weit langsamer vor sich gehen.)

Die σ_{zul}-Werte können also durchweg um die Spanne von 1 kg/mm² niedriger als die Dauerfestigkeitswerte bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln angenommen werden.

Die wichtigsten Grundlagen für die Berechnung der geschweißten vollwandigen Eisenbahnbrücken sind die „Spannungshäuschen", die in

Fig. 1 V für St. 37

Fig. 2 V für St. 52

dargestellt und so endgültig vom Ausschuß beschlossen wurden. Im einzelnen verweise ich hierwegen auf meine „Erläuterungen Teil II", S. 30 und folgende. Die Art der Darstellung entspricht den Fig. 1 und 2.

4. Erläuterungen zu den einzelnen $\sigma_{D\,zul}$-Linien.

Wir gehen aus von den Dauerfestigkeiten σ_D des Kuratoriumsberichts (s. Tafel 2).

α) St 37.

1. *Linien Ia, Ib für ungestoßene Bauteile im Zug- und Druckgebiet.* Nach Tafel 2, Spalte 3, Zeile 1 ist es bei Stumpfnähten 1. Güte (Nahtwurzel nachgeschweißt, allmählicher Übergang von der Schweißraupe zum Blech) $\sigma_W = 11$ kg/mm², es wäre zulässig, bei $\min M = -\max M$, $\sigma_{W\,zul} = 11 - 1 = 10$ kg/mm². Auf Grund neuerer Versuche hielten es die im Arbeitsausschuß vertretenen Materialprüfanstalten für angängig, σ_{Wzul} wie bei genieteten Brücken auf

$$\sigma_{W\,zul}^{Ia,\,Ib} = \pm 10{,}8 \text{ kg/mm}^2$$

heraufzusetzen.

Für σ_U gibt Tafel 2 bei solchen Nähten $\sigma_U = 18$ kg/mm² an, so daß an sich

$$\sigma_{U\,zul} = 18 - 1 = 17 \text{ kg/mm}^2$$

sein könnte. Da man aber nicht über

$$\sigma_{U\,zul}^{Ia,\,Ib} = \pm 14 \text{ kg/mm}^2$$

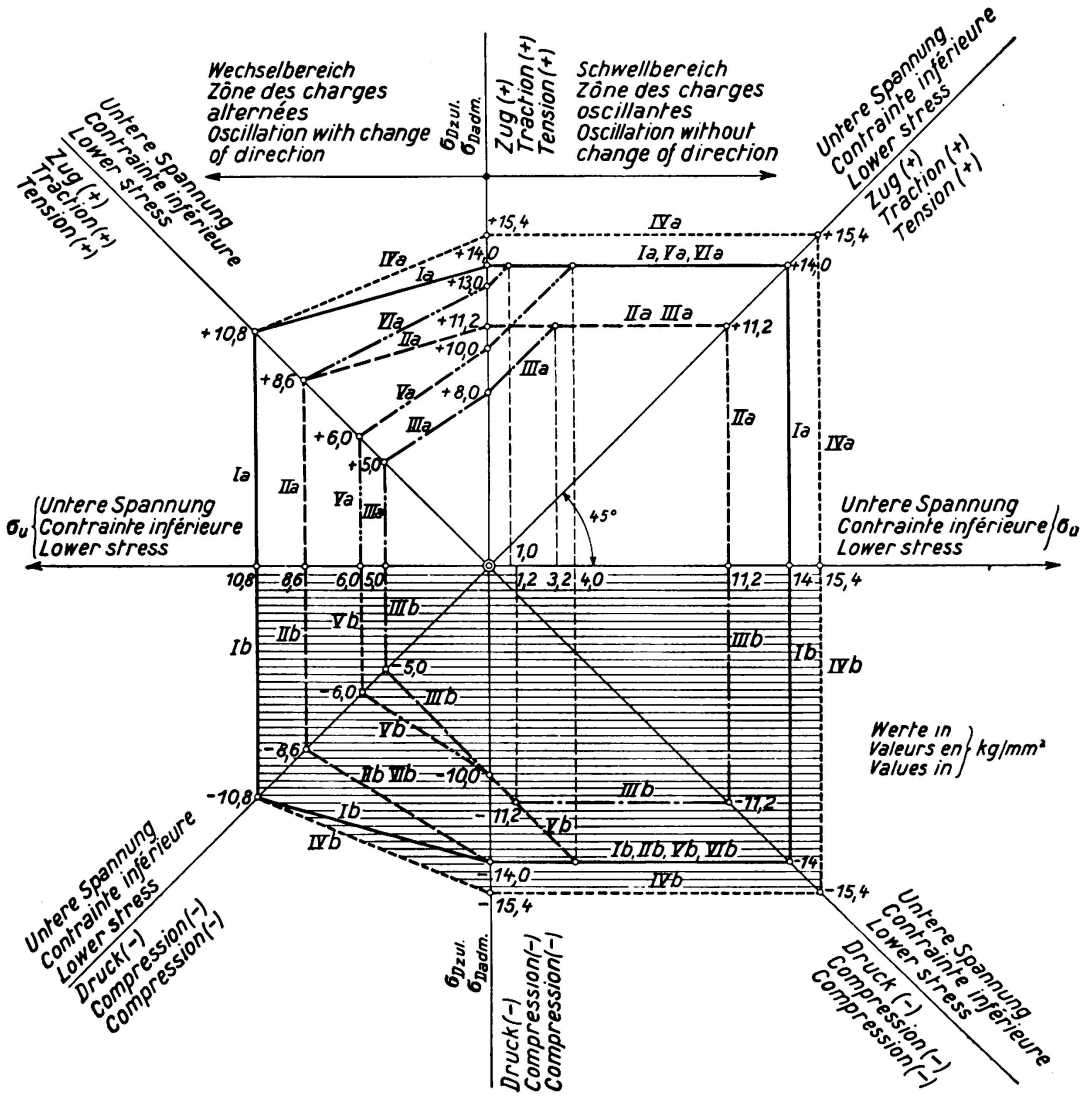


Fig. 1 V.

Schaubild der zulässigen Spannungen $\sigma_{D\,zul}$ bei geschweißten Brücken aus St 37. Die Zahlen sind in kg/mm² angegeben (Spannungshäuschen).

Ia, Ib Ungestoßene Bauteile im Zug- und Druckgebiet.

IIa Gestoßene Bauteile im Zuggebiet in der Nähte von Stumpfnähten und die Stumpfnähte selbst, wenn die Wurzeln nachgeschweißt und die Nähte bearbeitet sind.

IIb Dasselbe wie bei *IIa* im Druckgebiet.

IIIa, IIIb Dasselbe wie bei *IIa, IIb,* wenn die Wurzel nicht nachgeschweißt werden kann.

IVa, IVb Zulässige Hauptspannungen nach der Formel

$$\sigma = \frac{\sigma_1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\sigma_1^2 + 4\,\tau_1^2}\,.$$

Va, Vb Bauteile in der Nähe von Stirnkehlnähten und am Beginn von Flankenkehlnähten. Stirnnahtübergänge und Flankenkehlnahtenden unbearbeitet.

VIa, VIb Dasselbe wie bei *Va* und *Vb* bei bester Bearbeitung der Stirnnahtübergänge und der Flankenkehlnahtenden.

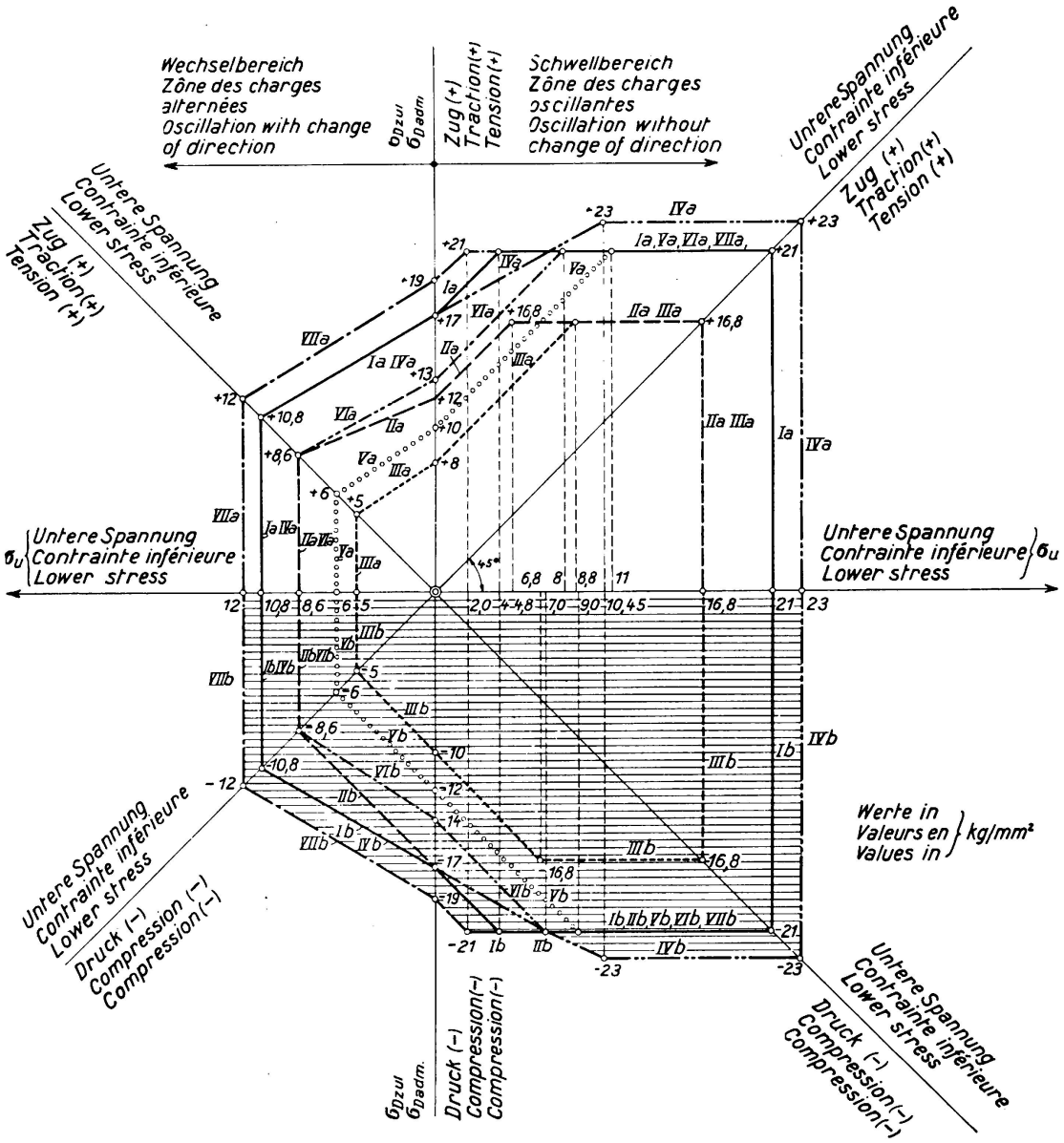


Fig. 2 V.

Schaubild der zulässigen Spannungen $\sigma_{D\,zul}$ bei geschweißten Brücken aus St 52. Die Zahlen sind in kg/mm² angegeben (Spannungshäuschen).

Ia, Ib Ungestoßene Bauteile im Zug- und Druckgebiet bei starkem Verkehr (mehr als 25 Züge am Tage auf jedem Gleis).

IIa Gestoßene Bauteile im Zuggebiet in der Nähe von Stumpfnähten und die Stumpfnähte selbst, wenn die Wurzeln nachgeschweißt und die Nähte bearbeitet sind.

IIb Dasselbe wie bei *IIa* im Druckgebiet.

IIIa, IIIb Dasselbe wie bei *IIa, IIb,* wenn die Wurzel nicht nachgeschweißt werden kann.

IVa, IVb Zulässige Hauptspannungen nach der Formel

$$\sigma = \frac{\sigma_1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\sigma_1^{\,2} + 4\tau_1^{\,2}}\,.$$

Va, Vb Bauteile in der Nähe von Stirnkehlnähten und am Beginn von Flankenkehlnähten. Stirnnahtübergänge und Flankenkehlnahtenden unbearbeitet.

VIa, VIb Dasselbe wie bei *Va* und *Vb* bei bester Bearbeitung der Stirnnahtübergänge und der Flankenkehlnahtenden.

VIIa, VIIb Dasselbe wie bei *Ia, Ib* bei schwachem Verkehr (bis zu 25 Zügen im Tage auf jedem Gleis).

hinausgehen wollte, so wurde für min M = 0 dieser Wert vom Arbeitsausschuß sowohl im Zug- als auch im Druckgebiet angenommen. Der Verlauf der Linie Ia, Ib ist dann bei geschweißten Brücken aus St 37 wie bei den genieteten. Die Linie Ia, Ib gelten jedoch nicht, wie ursprünglich beabsichtigt, auch für beste Stumpfnähte, sondern nur für ungestoßene Bauteile. Für Stumpfnähte wurden wegen der verschiedenartigen Ausführungsmöglichkeiten besondere Linien festgelegt (s. unter 2. und 3.).

2. *Linie IIa für gestoßene Bauteile im Zuggebiet in der Nähe von Stumpfnähten und die Stumpfnähte selbst, wenn die Wurzeln nachgeschweißt und die Nähte bearbeitet sind.*

Wenn auch die Dauerfestigkeiten der Tafel 2 von Zugversuchen abgeleitet sind, so beschloß doch der Arbeitsausschuß im Zuggebiet die σ_{zul}-Werte auf das 0,8fache der Linie Ia herabzusetzen, dann aber zuzulassen, *daß gezogene Teile ohne jede Laschendeckung stumpf gestoßen werden dürfen,* zur weiteren Erhöhung der Sicherheit sollen im Zuggurt die Stumpfnähte unter 45° angeordnet werden, außerdem die Nahtwurzeln nachgeschweißt und die Raupen durch Bearbeiten allmählich zum Blech übergeführt werden. Es ist also

$$\sigma_{W\,zul}^{IIa,\,IIb} = \pm 10{,}8 \cdot 0{,}8 = \sim \pm 8{,}6 \text{ kg/mm}^2,$$
$$\sigma_{U\,zul}^{IIa} = 14 \cdot 0{,}8 = 11{,}2 \text{ kg/mm}^2.$$

Im Druckgebiet wurde bei Linie IIb

$$\sigma_{U\,zul}^{UIIb} = -14 \text{ kg/mm}^2,$$

wie bei ungestoßenen Bauteilen (Linie Ib) angenommen.

3. *Linie IIIa für dasselbe wie bei IIa, wenn die Wurzel nicht nachgeschweißt werden kann.* Der Arbeitsausschuß beschloß für diesen selten vorkommenden Fall die Werte

$$\sigma_{W\,zul}^{IIIa} = 5{,}0 \text{ kg/mm}^2,$$
$$\sigma_{U\,zul} = 8{,}0 \text{ kg/mm}^2.$$

Sowohl im Zuggebiet als auch im Druckgebiet sollen die $\sigma_{D\,zul}$-Linien unter 45° ansteigen, da innerhalb des in Betracht kommenden schwellenden Bereichs die Schwingweite gleich groß angenommen werden darf. Damit erreicht die IIIa-Linie die Spannung 11,2 bei einer unteren Spannung von 11,2 — 8 = 3,2 kg/mm².

Für die Linie IIIb ist

$$\sigma_{U\,d\,zul}^{IIIb} = -10 \text{ kg/mm}^2.$$

Die Linie IIIb erreicht bei einer unteren Spannung von — (11,2 — 10,0) = — 1,2 kg/mm² den Wert — 11,2 kg/mm².

4. *Linien IVa, IVb für die zulässige Hauptspannung* nach der Formel

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

Bei min M = — max M wurde

$$\sigma_{W\,zul}^{IVa,\,IVb} = \pm 10{,}8 \text{ kg/mm}^2$$

wie bei Linien Ia, Ib angenommen. Da aber bei St. 37 bei min M = 0 die Dauerfestigkeiten nicht ausgenutzt werden, so hielt es der Ausschuß für vertretbar,

$$\sigma_{U\,zul}^{IVa,\,IVb} = 15{,}4\ \mathrm{kg/mm^2}\ \text{zu wählen}\ \left(14 + \frac{14}{10}\right).$$

Die Kuratoriumsversuche bezogen sich nur auf *Zugstäbe,* bei denen die Stäbe im Dauerversuch in der Regel bei A oder B, also *beim Beginn der Kehlnähte* (Querschnittsänderung), gerissen sind (Fig. 30).

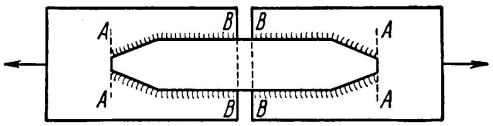


Fig. 30.

Da es sich aber bei den Nähten zur Verbindung des Stegblechs mit der Gurtung entweder um *durchgehende* Kehlnähte oder Stumpfnähte handelt, so wurden auf meine Veranlassung in Wittenberge und in der Mechanischen Versuchsanstalt des Reichsbahn-Zentralamts für Einkauf Dauerzugsversuche in Pulsatormaschinen mit durchgehenden längs beanspruchten Kehl- und Stumpfnähten gemäß den Fig. 31 und 32 durchgeführt.

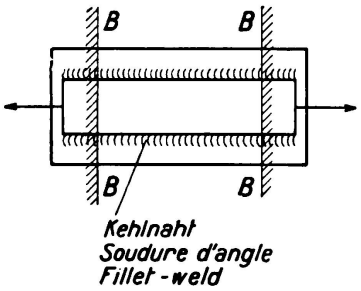


Fig. 31.

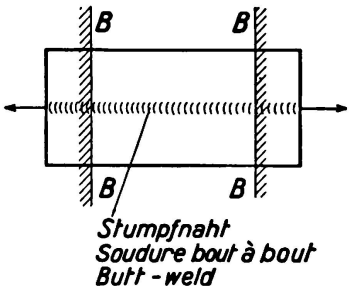


Fig. 32.

Diese Versuche zeitigten das erwartete Ergebnis, *daß nämlich solche durchgehende Kehl- und Stumpfnähte mindestens ebenso hoch beansprucht werden dürfen, wie Stumpfnähte senkrecht zur Kraftrichtung.* Tatsächlich wurden Ursprungsfestigkeiten von

$$\sigma_U = 18\ \mathrm{kg/mm^2}$$

ohne weiteres erreicht. (Zum Vergleich wurden entsprechend Fig. 31 statt der durchlaufenden Kehlnähte auch unterbrochene geprüft, wobei die Ursprungsfestigkeit wegen der Kerbwirkung wesentlich abgesunken war).

5. *Linien Va, Vb für Bauteile in der Nähe von Stirnkehlnähten und am Beginn von Flankenkehlnähten. Nahtenden unbearbeitet.*

Der Arbeitsausschuß hat in Goslar bei Kehlnähten nur bearbeitete ins Auge gefaßt, da man der Auffassung war, daß bei der an sich schon niedrigen Dauerfestigkeit nur beste Bearbeitung der Kehlnähte (an den Enden der Flankenkehlnähte) in Betracht kommt. Es wurde zuerst entsprechend der Tafel 2 Spalte 6

$$\sigma_{W\,zul}^{a,\,b} = \pm(6{,}3 - 1{,}0) = \pm 5{,}3\ \mathrm{kg/mm^2}$$

vorgeschlagen; diesen Wert erhöhte der Arbeitsausschuß auf $\pm$ 6,0 kg/mm² und setzte

$$\sigma_{U\,zul}^{a,\,b} = \pm 10 \text{ kg/mm}^2$$

fest. Im schwellenden Bereich soll die $\sigma_{D\,zul}$-Linie unter 45° bis zu $\pm$ 14 kg/mm² bei 4 kg/mm² untere Spannung sowohl im Zug- als auch im Druckbereich verlaufen.

Inzwischen wurden von Dr. *Dörnen* an Biegeträgern mit allmählich verlaufenden Kehlnähten und zugeschärften Gurtplatten Dauerfestigkeitsversuche gemacht, die es dem Arbeitsausschuß in Friedrichshafen zulässig erscheinen ließen, die so gefundene Linie für *unbearbeitete* Kehl- und Stirnnähte anzunehmen, so daß

$$\sigma_{W\,zul}^{Va,Vb} = \pm\ 6 \text{ kg/mm}^2$$
$$\sigma_{U\,zul}^{Va,Vb} = \pm 10 \quad ,,$$
$$\sigma_{D\,zul}^{Va,Vb} = \pm 14 \quad ,, \quad \text{bei 4 kg/mm}^2 \text{ unterer Spannung}$$

angenommen wurde.

6. *Linien VIa, VIb für Bauteile in der Nähe von Stirnkehlnähten und am Beginn von Flankenkehlnähten. Nahtenden bearbeitet.*

In Friedrichshafen wurde auf Grund der neueren Versuche beschlossen

$$\sigma_{W\,zul}^{VIa,VIb} = \pm\ 8{,}6 \text{ kg/mm}^2$$
$$\sigma_{U\,zul}^{VIa} = +\,13{,}0 \quad ,,$$
$$\sigma_{U\,zul}^{VIb} = -\,14{,}0 \quad ,,$$

β) St 52

Die Dauerfesitgkeitsversuche haben nach dem Kuratoriumsbericht ergeben, daß die Ursprungsfestigkeiten bei St 52 (und also auch die Wechselfestigkeiten) nicht wesentlich höher als bei St 37 liegen. Man erhält dann folgendes:

1. *Linien Ia, Ib für ungestoßene Bauteile im Zug- und Druckgebiet (starker Verkehr).*

$$\sigma_{W\,zul}^{Ia,\,Ib} = \pm 10{,}8 \text{ kg/mm}^2.$$

Nach Tafel 2, Zeile 1, wurde bei Stumpfnähten, Nahtwurzel nachgeschweißt, $\sigma_U = 18$ kg/mm² gefunden, so daß

$$\sigma_{U\,zul}^{Ia,\,Ib} = \pm(18 - 1) = \pm 17 \text{ kg/mm}^2$$

beschlossen wurde. Ferner wurde der Verlauf der $\sigma_{D\,zul}$-Linie im schwellenden Bereich wieder überall unter 45° angenommen, so daß

$$\sigma_{D\,zul}^{Ia,\,Ib} = \pm 21 \text{ kg/mm}^2$$

bei 4 kg/mm² unterer Spannung wird.

2. *Linien IIa, IIb für gestoßene Bauteile im Zug- und Druckgebiet und die Stumpfnähte selbst, wenn die Wurzeln nachgeschweißt und die Nähte bearbeitet* sind.

Es ergab sich im Zuggebiet

$$\sigma^{II\,a}_{W\,zul} = 0{,}8 \cdot 10{,}8 = \sim +8{,}6 \text{ kg/mm}^2 \text{ (wie bei St 37)}$$
$$\sigma^{II\,a}_{U\,zul} = +12 \text{ kg/mm}^2$$
$$\sigma^{II\,a}_{D\,zul} = +0{,}8 \cdot 21 = +16{,}8 \text{ kg/mm}^2 \text{ bei } +4{,}8 \text{ kg/mm}^2 \text{ unterer Spannung.}$$

Im Druckgebiet ist

$$\sigma^{II\,b}_{W\,zul} = -8{,}6 \text{ kg/mm}^2$$
$$\sigma^{II\,b}_{U\,zul} = -2 \cdot 8{,}6 = \sim -17 \text{ kg/mm}^2$$
$$\sigma^{II\,b}_{D\,zul} = -21 \text{ kg/mm}^2 \text{ bei } -4 \text{ kg/mm}^2 \text{ unterer Spannung.}$$

3. *Linien VII a, VII b für ungestoßene Bauteile im Zug- und Druckgebiet bei schwachem Verkehr.*

Wie bei genieteten Brücken (s. BE, Tafel 17) soll bei Brücken aus St 52 zwischen starkem Verkehr (mehr als 25 Züge im Tag) und zwischen schwachem Verkehr (bis zu 25 Zügen im Tag auf jedem Gleis) unterschieden werden.

Der Arbeitsausschuß in Friedrichshafen hat dementsprechend folgende Werte festgesetzt:

$$\sigma^{VII\,a,\,b}_{W\,zul} = \pm 12 \text{ kg/mm}^2,$$
$$\sigma^{VII\,a,\,b}_{U\,zul} = \pm 19 \quad ,,$$
$$\sigma^{VII\,a,\,b}_{D\,zul} = \pm 21 \quad ,,$$
$$\text{bei } \pm (21 - 19) = \pm 2 \quad ,, \quad \text{unterer Spannung.}$$

4. Die übrigen „Spannungshäuschen" für St 52 wurden nach denselben Grundsätzen wie bei St 37 festgelegt. Ich verweise hierwegen auf meine „Erläuterungen" Teil II S. 34 u. f.

E. *Die Querschnittsermittlung.*

1. Allgemeines.

a) Bauteile mit wechselnder oder schwellender Beanspruchung sind nach folgenden Richtlinien zu berechnen:

Es sei $\max M_I$ der zahlenmäßig größte Grenzwert
und $\min M_I$ der zahlenmäßig kleinste Grenzwert

der Biegemomente aus ständiger Last und Verkehrslast mit Stoßzahl φ, — bei Brücken in Gleisbögen auch aus den Fliehkräften mit Stoßzahl φ —; positive Biegemomente sind dabei stets mit +-Zeichen, negative Biegemomente (Druckkräfte) mit —-Zeichen in die Formeln einzusetzen.

Ist z. B.
$$M_g = +200 \text{ tm},$$
$$\varphi M_p = +400 \text{ tm},$$
und
$$\varphi M_p = -600 \text{ tm},$$
dann ist
$$\max M_I = +200 + 400 = +600 \text{ tm},$$
$$\min M_I = +200 - 600 = -400 \text{ tm}.$$

Man spricht von

wechselnder Beanspruchung, wenn max M_I und min M_I verschiedene,

von schwellender Beanspruchung, wenn max M_I und min M_I gleiche Vorzeichen haben.

b) Wenn es nicht erforderlich wäre, die Schweißnahtverbindungen je nach der Art der Schweißnaht und ihrer Lage unterschiedlich zu behandeln, so könnten die Einflüsse wechselnder oder schwellender Belastung wie bei genieteten Brücken nach dem γ-Verfahren (BE § 36) berücksichtigt werden. Es wäre also

$$\sigma' = \frac{\gamma \max M_I}{W_n}, \tag{4 V}$$

wobei γ derjenige den Einfluß einer wechselnden oder schwellenden Beanspruchung (Dauerbeanspruchung) berücksichtigende Beiwert ist, mit dem der zahlenmäßig größte Grenzwert der Biegemomente usw. aus ständiger Last und Verkehrslast (und Fliehkraft) mit Stoßzahl φ vervielfacht werden muß, damit die Bauteile wie solche behandelt werden können, die keine wechselnde oder schwellende Beanspruchung erhalten.

c) Die unterschiedliche Dauerfestigkeit der verschiedenen Schweißnahtverbindungen wird nun durch einen Beiwert α (Formzahl) berücksichtigt, der aus den „Spannungshäuschen" der Bilder 1 V und 2 V abgeleitet ist und aus den Tafeln 2 V und 3 V hervorgeht. Es muß sein:

$$\sigma_I = \frac{\gamma \max M_I}{\alpha W_n} \leqq \sigma_{zul} \tag{5 V}$$

(1400 bei St 37, 2100 bei St 52).

(Querkräfte sind sinngemäß mit $\frac{\gamma}{\alpha}$ vervielfacht in die Rechnung einzuführen, wobei für die γ-Werte an Stelle von $\frac{\min M_I}{\max M_I}$ der Wert $\frac{\min Q_I}{\max Q_I}$ tritt.)

d) Die γ-*Werte* wurden aus den „Spannungshäuschen" abgeleitet, und zwar für den Fall $\alpha = 1$, der z. B. vorliegt, wenn im schwellenden Bereich im Druckgurt eine Stumpfnaht bester Ausführung (Güte I) angeordnet wird.

e) Die γ-Werte sind vom Verhältnis $\frac{\min M_I}{\max M_I}$ und von den Vorzeichen von von min M_I und max M_I abhängig.

Die Methode mit den α-Werten (Formzahl α) hat den großen Vorteil, daß alles auf denselben Maßstab bezogen wird, nämlich σ_{zul}, und daß dem Entwerfenden stets vor Augen geführt wird, wann und um wieviel er die zulässige Spannung herabmindern muß. Es hat dies zugleich einen erzieherischen Wert, weil der Entwerfende ganz von selbst bei niedrigen α-Werten auf einen wirtschaftlichen Weg gedrängt wird. (Z. B. daß er darauf abzielen muß, an Stelle von beginnenden Kehlnähten andere Bauweisen anzuwenden.) Will man umgekehrt die rechnungsmäßigen Spannungen σ_r haben, die die Teile ohne die γ- und

α-Werte bekommen, so braucht man nur den aus Formel (5 V) gewonnenen Wert σ mit $\frac{\alpha}{\gamma}$ zu vervielfachen. Beispiel:

$$\sigma = \frac{1{,}2}{0{,}65} \cdot \frac{\max M_I}{W} = 1380\ \mathrm{kg/cm^2}, \text{ also } \sigma_r = 1380 \cdot \frac{0{,}65}{1{,}2} = 750\ \mathrm{kg/cm^2}.$$

2. Die Beiwerte γ.

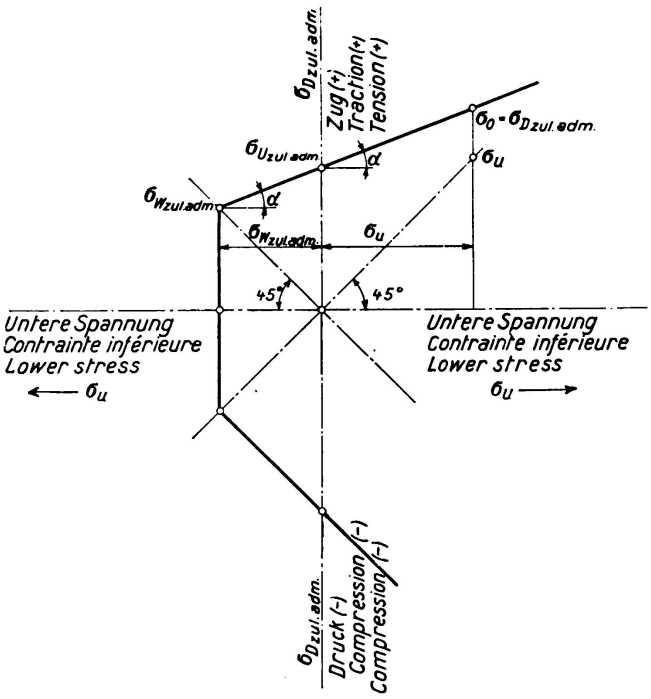


Fig. 33.

Nach Fig. 33 ist

(10) $$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma_{U\,zul} - \sigma_{W\,zul}}{\sigma_{W\,zul}}.$$

Für einen beliebigen Punkt (σ_o, σ_u) ist

11) $$\sigma_o - \sigma_{U\,zul} = \sigma_u \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

daraus

$$\sigma_o - \sigma_u \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{\sigma_o}{\sigma_o} = \sigma_{U\,zul}$$

oder

(12) $$\sigma_o = \frac{\sigma_{U\,zul}}{1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{\sigma_u}{\sigma_o}};$$

nun ist

(13) $$\sigma_u = \frac{\min M_I}{W},$$

(14) $$\sigma_o = \sigma_{D\,zul} = \frac{\max M_I}{W},$$

also

(15) $$\frac{\sigma_u}{\sigma_o} = \frac{\min M_I}{\max M_I},$$

somit

(16) $$\sigma_o = \sigma_{D\,zul} = \frac{\sigma_{U\,zul}}{1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{\min M_I}{\max M_I}}.$$

Ist nun σ_{zul} die nach den BE zulässige Spannung $\begin{pmatrix}1400 \text{ bei St } 37\\ 2100 \text{ bei St } 52\end{pmatrix}$ und wollen wir $\sigma_{D\,zul}$, das im allgemeinen kleiner als σ_{zul} ist, mit σ_{zul} vergleichen (damit wir alles auf den einheitlichen Wert σ_{zul} beziehen können), so setzen wir

(17) $$\gamma \cdot \sigma_{D\,zul} = \sigma_{zul},$$

woraus

(18) $$\gamma \cdot \frac{\max M_I}{W} = \sigma_{zul}.$$

Aus (16) und (17) wird

(19) $$\gamma = \frac{\sigma_{zul}}{\sigma_{D\,zul}} = \frac{\sigma_{zul}}{\sigma_{U\,zul}} \left(1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{\min M_I}{\max M_I}\right).$$

Es ist also γ eine geradlinige Funktion von $\frac{\min M_I}{\max M_I}$. Die γ-Werte können aus den $\sigma_{U\,zul}$- und $\sigma_{W\,zul}$-Werten für beliebige Verhältnisse $\frac{\min M_I}{\max M_I}$ berechnet werden. Am einfachsten kann man wie folgt vorgehen:

Bei Brücken aus St 37 ergab sich

für $\min M_I = -\max M_I$, $\qquad \gamma_{-1} = \frac{14}{10{,}8} = \sim 1{,}3$,

für $\min M_I = 0$ wird $\sigma_{U\,zul}^{Ia} = 14\ \mathrm{kg/mm^2}$, also $\gamma_0 = \frac{14}{14} = 1$.

Allgemein ist $\quad \gamma = a + b \cdot \frac{\min M_I}{\max M_I}$,

mit $\min M_I = 0$ wird

$$a = 1$$

und mit $\frac{\min M_I}{\max M_I} = -1$ wird

$$1{,}3 = 1 + b\ (-1),$$

also $b = -0{,}3$, also für St 37

$$\gamma = 1 - 0{,}3 \cdot \frac{\min M_I}{\max M_I} \quad \text{(wie bei genieteten Brücken).} \tag{20}$$

In ähnlicher Weise wurden die γ-Werte für Stahl St 52 abgeleitet. Es ergab sich

bei starkem Verkehr (21) $\qquad \gamma = 1{,}235 - 1{,}237 \cdot \frac{\min M_I}{\max M_I}$,

bei schwachem Verkehr (22) $\qquad \gamma = 1{,}105 - 1{,}102 \cdot \frac{\min M_I}{\max M_I}$.

Die γ-Linien sind in Fig. 34 und 35 dargestellt.

Aus der Begriffserklärung von γ [Gl. (17) und (18)] folgt, daß γ nie kleiner als 1 sein darf, auch wenn die Rechnung dies ergeben würde (schwellender Bereich).

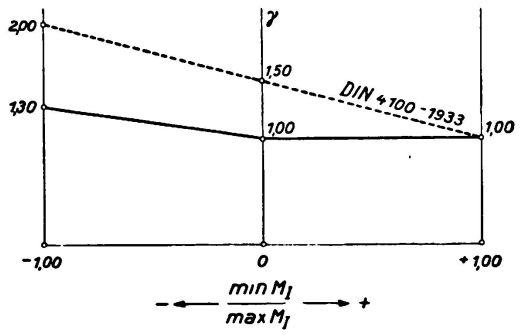


Fig. 34.

γ-Linien bei St 37.

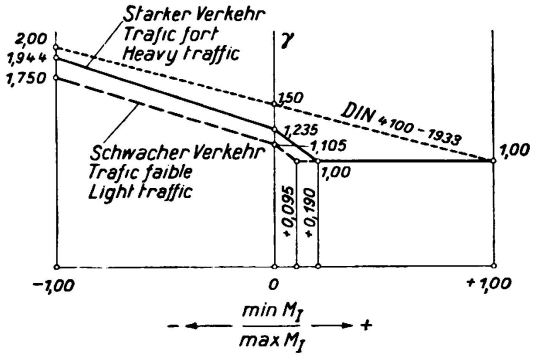


Fig. 35.

γ-Linien bei St 52.

3. Die Beiwerte α.

Bei Biegeträgern ist die tatsächlich zulässige Spannung (nicht die gedachte)

$$\sigma_{D\,zul} = \frac{\max M_I}{W_n} \tag{7 V}$$

(nach den Spannungshäuschen).

Setzt man diesen Wert in Gl. (5 V) ein, so ergibt sich

$$\alpha = \gamma \cdot \frac{\sigma_{D\,zul}}{\sigma_{zul}}. \tag{8 V}$$

An Stelle der sich nach genauer Rechnung ergebenden, leicht gekrümmten Linien für die α-Werte, die vom Verhältnis $\frac{\min M_I}{\max M_I}$ abhängig sind, ist mit ausreichender Genauigkeit ein geradliniger Verlauf zwischen den Grenzwerten angenommen, z. B.

zwischen α_{-1} für $\frac{\min M_I}{\max M_I} = -1$,

und α_0 „ $\frac{\min M_I}{\max M_I} = 0$.

Es ist also allgemein

$$\alpha = a + b \cdot \frac{\min M_I}{\max M_I}$$

angenommen.

Hiernach sind die α-Werte der Tafel 2 V für St. 37 berechnet. (Die Tafel für St 52 ist ähnlich.)

Es soll dies nur an einem Beispiel gezeigt werden:

Die Stumpfnähte können in der Wurzel sorgfältig nachgeschweißt werden. Die größten Spannungen sind Zugspannungen (Linie IIa).

Die früheren Vorschriften verlangten unter allen Umständen auch dann eine zusätzliche Laschendeckung im Zuggurt, wenn die Gurtplatten stumpf gestoßen sind. Die Laschen konnten entweder durch Kehlnähte oder durch Niete angeschlossen werden. Da, wie aus Tafel 2 hervorgeht, sowohl bei Stirnkehlnähten als auch bei beginnenden oder endigenden Flankenkehlnähten die Dauerfestigkeit erheblich niedriger (fast nur die Hälfte) als bei Stumpfnähten sind, und da die Gurtungen selbst am Beginn der Laschen auch nicht höher beansprucht werden dürfen als die Kehlnähte, so ergeben sich, namentlich bei statisch unbestimmten Trägern, sehr ungünstige und unwirtschaftliche Bauweisen. Aber auch beim Nieten ergeben sich keine befriedigenden Lösungen wegen der zu berücksichtigenden Lochschwächung. Man entschloß sich daher zu einer Lösung, die einen ungeheuren Fortschritt bedeutet: *Stumpfstoß auch im Zuggurt ohne jede Laschendeckung.* Selbstverständlich kommen hier nur beste Stumpfnähte in Betracht: wenn irgendmöglich, Nachschweißen der Wurzeln und sorgfältiges Bearbeiten des Überganges von der Schweißraupe zum Blech, so daß ein allmählicher Übergang entsteht. (Die Raupen dürfen auch ganz abgearbeitet werden.) Löcher an der Oberfläche dürfen nicht geduldet

werden. Die Gesamtschwächung des Blechs (beim Abschmirgeln) darf nicht mehr als 5 % der Blechdicke betragen. Da, wie aus Tafel 2, Zeile 3, hervorgeht, die Dauerfestigkeit bei Lage der Stumpfnaht unter 45° wesentlich höher liegt ($\sigma_{Uz} = 22$ kg/mm² gegen 18 kg/mm²), so sollen die Stumpfnähte im Zuggurt grundsätzlich unter 45° gelegt werden.

Bei der $\sigma_{D\,zul}$-Linie IIa — Gestoßene Bauteile im *Zuggebiet* in der Nähe von Stumpfnähten und die Stumpfnähte selbst — ist bei St 37

$$\gamma_{-1} = 1{,}30 \text{ (Fig. 34)},$$
$$\sigma^{IIa}_{W\,zul} = 8{,}6 \text{ kg/mm}^2,$$

also nach Formel (8 V)

$$\alpha_{-1} = \frac{\gamma\,\sigma_{D\,zul}}{\sigma_{zul}} = \frac{1{,}30 \cdot 8{,}6}{14} = \sim 0{,}8,$$
$$\gamma_0 = 1,$$
$$\sigma^{IIa}_{U\,zul} = 11{,}2 \text{ kg/mm}^2 \text{ (Fig. 1 V)}$$

also
$$\alpha_0 = 1 \cdot \frac{11{,}2}{14} = 0{,}8;$$

es ist also in beiden Bereichen

$$\alpha = 0{,}8 \text{ (s. Tafel 2 V, Zeile 4).}$$

(Die rechnungsmäßige Spannung ist höchstens $\sigma_r = \frac{\alpha}{\gamma} \cdot \sigma_{zul} = \frac{0{,}8}{1{,}30} \cdot 1400 = 860$ kg/cm², während die Wechselfestigkeit nach Tafel 2, Zeile 3, zu $\sigma_W = 1300$ kg/cm² angenommen werden darf.)

Im *Druckgebiet* ist für die Linie IIb

$$\gamma_{-1} = 1{,}30,$$
$$\sigma^{IIb}_{W\,zul} = -8{,}6 \text{ kg/mm}^2 \text{ (Fig. 1 V)},$$

also
$$\alpha_{-1} = \frac{1{,}30 \cdot 8{,}6}{14} = \sim 0{,}8 \text{ wie bei IIa.}$$

Ferner ist
$$\gamma_0 = 1{,}0,$$
$$\sigma^{IIb}_{U\,zul} = -14{,}0 \text{ kg/mm}^2,$$

also
$$\alpha_0 = 1{,}0 \cdot \frac{14}{14} = 1 \text{ (im ganzen schwellenden Bereich; siehe Tafel 2 V, Zeile 5).}$$

Allgemein ist
$$\alpha = a + b \cdot \frac{\min M_I}{\max M_I},$$
$$\text{für } \min M_I = 0 \quad \text{ist} \quad \alpha_0 = 1,$$
$$\text{für } \frac{\min M_I}{\max M_I} = -1 \text{ ist } \alpha_{-1} = 0{,}8,$$

also
$$0{,}8 = 1 + b\,(-1), \text{ woraus } b = +0{,}2,$$

also

(23)
$$\alpha = 1 + 0{,}2 \cdot \frac{\min M_I}{\max M_I} \text{ (Wechselbereich, s. Tafel 2 V, Zeile 5).}$$

Zur Tafel 2 V, Zeile 18. Da die zum Anschluß der durchschießenden Platten der Längsträger dienenden Kehlnähte an den Querträgern unterbrochen sind bzw. durch die Lücke zwischen Längs- und Querträger eine starke Kerbwirkung ausgeübt wird, so muß die zulässige Spannung in den durchschießenden Platten wie bei Zeile 14—17 herabgesetzt werden.

Die Bearbeitung der Stegblechstumpfstöße in denjenigen Teilen, in denen der Unterschied der oberen und unteren Spannung (ohne γ-Wert) größer als 11,2 kg/mm² ist, ist notwendig, weil unbearbeitete Nähte nicht höher beansprucht werden sollen.

Die α-Werte sind bei Brücken aus St 52 und schwachem Verkehr ebenso groß wie bei starkem Verkehr. Nur die γ-Werte sind verschieden.

F. *Die bauliche Durchbildung und Ausführung.*

1. Schon bei der Entwurfsbearbeitung ist darauf zu achten, daß die Schweißnähte gut zugänglich sind und daß beim Schweißen das Schweißgerät gut gehalten werden kann.

Überkopfschweißungen sind nach Möglichkeit zu vermeiden. Es ist anzustreben, das Schweißen in waagrechter Lage auszuführen.

Die Forderung, daß das Schweißen in waagrechter Lage auszuführen ist, ist im Brückenbau besonders wichtig, weil eine tadellose Ausführung bedingt, daß dem Schweißer alle nur möglichen Erleichterungen gegeben werden müssen. Daher bei Stahlbauanstalten, die Brücken schweißen wollen, die Forderung auf Beschaffung von Drehvorrichtungen, damit die Werkstücke in schweißgerechte Lage gebracht werden können.

2. Stöße sind nach Möglichkeit zu vermeiden, soweit es wirtschaftlich vertretbar ist.

Zu 2. Neuerdings verzichtet man oft auf die peinlich genaue Abstufung der Gurtplattenlängen nach dem erforderlichen Widerstandsmoment und ordnet lieber in einer Dicke durchgehende Gurtplatten an, bei denen dann weniger Stöße erforderlich sind. Dicke Platten verwerfen sich auch nicht so leicht wie dünne. Man hat jetzt schon Platten von 15 t Gewicht verwendet, ohne daß die Gesamtkosten erheblich höher geworden sind.

3. Die Schweißnähte sollen sich an einzelnen Stellen nicht zu sehr häufen.

4. Unterbrochene Nähte und Schlitznähte dürfen bei Brücken nicht ausgeführt werden.

Bei den unterbrochenen Kehlnähten wird die Dauerfestigkeit infolge der Kerbwirkung am Beginn und am Ende der Nähte erheblich herabgemindert.[21] Schlitznähte sind wie unterbrochene Kehlnähte zu betrachten.

5. Im allgemeinen sollen Kehlnähte gleichschenklig und nicht dicker ausgeführt werden als die Berechnung erfordert, falls nicht schweißtechnische Gründe dagegen sprechen. Bei Stirnkehlnähten kann eine ungleichschenklige Ausführung wegen des günstigeren Kraftflusses vorteilhaft sein.

6. An allen Stellen, an denen Kehlnähte beginnen oder endigen, sollen nach Möglichkeit allmähliche Übergänge geschaffen, d. h. die Enden bearbeitet

---

[21] Siehe Fußnote [14].

Tafel 2V. Beiwerte α bei St 37.

1	2	3	4	5		6
Lfd. Nr.	Bauteil und Nahtart	Art der Beanspruchung	α-Werte Wechselbereich	α-Werte schwellender Bereich		Bemerkungen
1	Ungestoßen durchgehende Bauteile und Decklaschen*)	Zug	1,0	1,0		Schaubild Ia
2		Druck	1,0	1,0		Schaubild Ib
3		Abscheren	0,8	0,8		*) s. Zeile 18
4	Gestoßene Bauteile, da wo Stumpfnähte angeordnet sind, wenn ein Nachschweißen der Wurzel möglich ist	Größte Spannung Zug (+)	0,8	0,8		Schaubild IIa
5		Größte Spannung Druck (—)	$\alpha = 1 + 0{,}2 \frac{\min M_I}{\max M_I}$	1,0		Schaubild IIb
6	nicht möglich ist	Größte Spannung Zug (+)	$\alpha = 0{,}57 + 0{,}11 \frac{\min M_I}{\max M_I}$	für $\frac{\min M_I}{\max M_I} \geq 0 \leq 0{,}29$ $\alpha = 0{,}57 + 0{,}79 \frac{\min M_I}{\max M_I}$	für $\frac{\min M_I}{\max M_I} > 0{,}29$ $\alpha = 0{,}8$	Schaubild IIIa
7		Größte Spannung Druck (—)	$\alpha = 0{,}71 + 0{,}25 \frac{\min M_I}{\max M_I}$	für $\frac{\min M_I}{\max M_I} \geq 0 \leq 0{,}11$ $\alpha = 0{,}71 + 0{,}82 \frac{\min M_I}{\max M_I}$	für $\frac{\min M_I}{\max M_I} > 0{,}11$ $\alpha = 0{,}8$	Schaubild IIIb
8	Durchlaufende Stumpf- oder Kehlnähte zur Verbindung des Stegblechs mit den Gurten	Hauptspannung $\sigma = \frac{1}{\alpha}\left[\frac{\sigma_I}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\sigma_I^2 + 4\tau_I^2}\right] \leq \sigma_{zul}$	$\alpha = 1{,}1 + 0{,}1 \frac{\min M_I}{\max M_I}$	1,1		Schaubild IVa, IVb
9	Schweißnähte und Stegblech am Übergang zwischen Stegblech und Gurt	Abscheren $\tau_I' = \frac{\gamma \max Q_{Ix} S}{\alpha J t} < \sigma_{zul}$	0,65	0,65		

10	Stumpfnaht am Stegblechstoß		Hauptspannung (Formel wie Zeile 8)	1,0	1,0		
11			Scherspannung $\tau_I' = \frac{\gamma \max Q_{Ix}}{\alpha\, t\, h_s} < \sigma_{zul}$	0,65	0,65		
12	Kehlnähte am biegefesten Anschluß eines Trägers		Hauptspannung $\sigma = \frac{1}{\alpha} \sqrt{\sigma_I^2 + \tau_I^2} < \sigma_{zul}$	0,75	0,75		
13			Scherspannung $\tau_I' = \frac{\gamma \max A_I}{\alpha \Sigma (a\, l)} < \sigma_{zul}$	0,65	0,65		
14 u. 15	Bauteile in der Nähe von Stirnkehlnähten und an Stellen, an denen Flankenkehlnähte beginnen oder endigen. Kehlnähte selbst sind nach Zeile 19 zu berechnen	Stirnnähte und Flankenkehlnahtenden unbearbeitet	Größte Spannung Zug (+) oder Druck (—)	$\alpha = 0{,}71 + 0{,}15 \frac{\min M_I}{\max M_I}$	für $\frac{\min M_I}{\max M_I} \geq 0 < 0{,}29$ $\alpha = 0{,}71 + 1{,}0 \frac{\min M_I}{\max M_I}$	für $\frac{\min M_I}{\max M_I} \geq 0{,}29$ $\alpha = 1{,}0$	Schaubild Va, Vb
16		wie vor, aufs beste bearbeitet	Größte Spannung Zug (+)	$\alpha = 0{,}93 + 0{,}13 \frac{\min M_I}{\max M_I}$	für $\frac{\min M_I}{\max M_I} \geq 0 < 0{,}07$ $\alpha = 0{,}93 + 1{,}0 \frac{\min M_I}{\max M_I}$	für $\frac{\min M_I}{\max M_I} \geq 0{,}07$ $\alpha = 1{,}0$	Schaubild VIa
17			Größte Spannung Druck (—)	$\alpha = 1 + 0{,}2 \frac{\min M_I}{\max M_I}$	1,0		Schaubild VIb
18	Decklaschen und durchschießende Platten an den Fahrbahnlängsträgern, wenn die Flankenkehlnähte nicht durchgehend geschweißt sind		wie Zeilen 14 bis 17	wie Zeilen 14 bis 17	wie Zeilen 14 bis 17		
19	Kehlnähte		Jede Beanspruchungsart mit Ausnahme der Hauptspannungen (Zeile 8) und Zug und Druck in der Nahtlängsrichtung	0,65	0,65		
20	Die Stegblechstumpfstöße sollen durchstrahlt werden; sie müssen in denjenigen Teilen bearbeitet werden (sodaß ein allmählicher Übergang von der Raupe zum Blech entsteht), in denen der Unterschied der oberen und unteren Spannung $\sigma_o - \sigma_u > 0{,}8 \cdot 1400 \geq 1120$ kg/cm² ist Hierin ist: $\sigma_o = \frac{\max M_I}{W_n}$ $\sigma_u = \frac{\min M_I}{W_n}$						

Die Tafel für St 52 ist ähnlich.

werden, so daß von den größeren α-Werten der Tafeln 2V und 3V, Zeilen 16 und 17, Gebrauch gemacht werden kann (Linien VIa und VIb der Spannungshäuschen, Fig. 1V und 2V).

7. Die Aussteifungen und Trägeranschlüsse dürfen an Gurtungen, die *nur Druck* bekommen, unmittelbar angeschweißt werden (Ausnahme gegen die Tafel 2V und 3V), an Gurtungen, die *auch* Zug bekommen, nur dann, wenn unter Berücksichtigung der α-Werte nach Tafel 2V und 3V, Zeilen 14 und 16, die zulässigen Biegespannungen in der Gurtung nicht überschritten werden; andernfalls sind zwischen dem Zuggurt und der Aussteifung Plättchen scharf

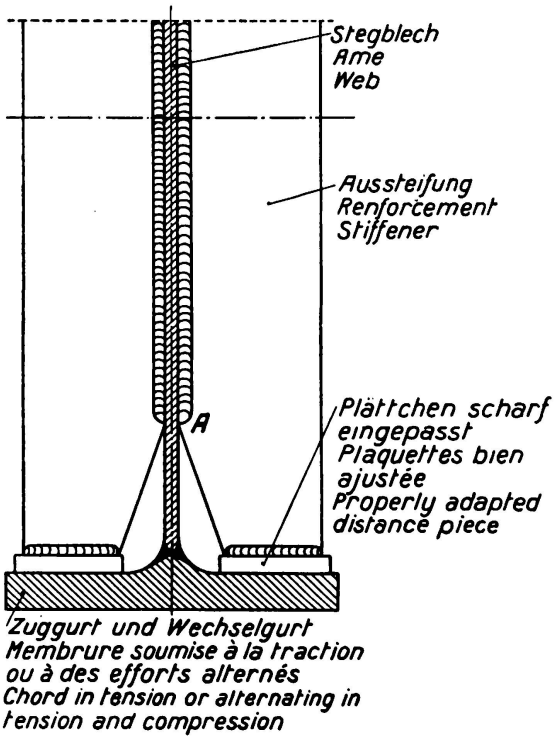


Fig. 12 V.

einzupassen, die nicht mit der Gurtung verschweißt werden dürfen (Fig. 12V). Unter allen Umständen müssen die Gurtungen gegenseitig spaltlos abgestützt werden.

Auch wenn die Aussteifungen und Anschlüsse an die Gurtung angeschweißt werden dürfen, sind diese so auszuscheiden, daß die Hauptnaht zwischen Stegblech und Gurtung frei bleibt und gut untersucht werden kann.

Bei Blechträgern mit Stegblechhöhen > 1,0 m und bei Trägern mit großen Querkräften sind die Stegbleche auf Ausbeulen zu untersuchen.[22] Bei Trägern, die nicht hierauf untersucht werden, soll der Abstand der Aussteifungen nicht größer als 1,30 m sein.

Bei hohen Trägern kann, wenn das Einhalten der Vorschrift unter Punkt 7 zu Unannehmlichkeiten führt, auch beim Trägeranschluß die Nietbauweise in Frage kommen. (Das Nieten soll also an geschweißten Brücken nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden, vielmehr soll die Nietbauweise da angewendet werden, wo sie Vorteile bietet.)

[22] Siehe *Schaper*, Grundlage des Stahlbaus, S. 98, Berlin 1933, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn.

8. An allen Stellen, an denen Einzellasten übertragen werden müssen, sollen Aussteifungen angeordnet werden.

9. Die Mindestdicke für tragende Kehlnähte ist a = 3,5 mm (bei Aussteifungen wird a = 3,0 mm zugelassen). Die Nahtdicke bei Kehlnähten soll im allgemeinen nicht größer sein als $a = 0{,}7\ t_1$, wobei t_1 die Dicke des dünnsten

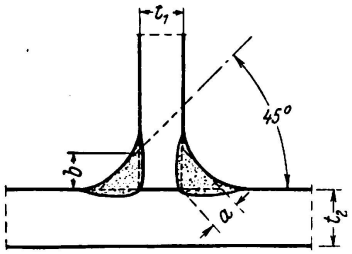


Fig. 13 V.

$t_1 < t_2$, $\alpha \leqq 0{,}7\ t_1$
(ausnahmsweise $\alpha = t_1$).

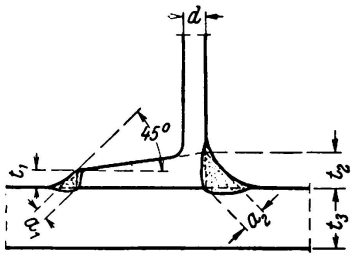


Fig. 14 V.

(Schrägflansch).
Bei $t_1 < t_3$, bei $t_2 < t_3$
$\alpha \leqq 0{,}7\ t_1$, $\alpha_2 \leqq 0{,}7\ t_2$.

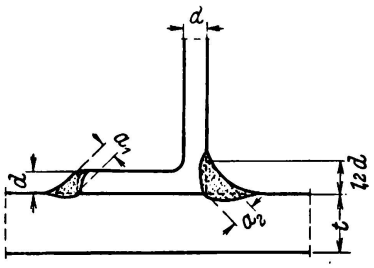


Fig. 15 V.

(Parallelflansch).
Bei $d < t$, bei $1{,}2\,d < t$
$\alpha_1 \leqq 0{,}7\ d$, $\alpha_2 \leqq 0{,}7 \cdot 1{,}2\ d$.

Bleches, Profilflansches oder -schenkels am Anschluß ist (Fig. 13 V, 14 V und 15 V). Hiervon darf nur abgewichen werden, wenn auf andere Weise der volle Anschluß nicht erreicht werden kann.

10. Bei dicken Gurtplatten können beim Stoß der Platten auch U-Nähte verwendet werden (Fig. 16 a V und 16 b V).

Versuche auf Pulsatormaschinen mit U-Nähten bei Blechen von etwa 100 mm Dicke haben ebenso gute Ergebnisse gezeitigt wie bei dünneren Blechen mit V- oder X-Nähten (Beispiel s. Fig. 36).

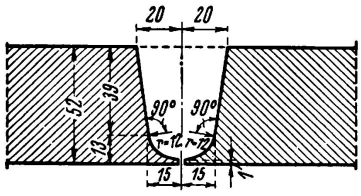


Fig. 36.
Nachschweißen. Beispiel einer U-Naht bei einem 52 mm dicken Blech.

11. Die Stumpfnähte in Gurten sollen möglichst zur Gurtschwerlinie symmetrischen Querschnitt haben (Fig. 16 a V, 16 b V und 17 V).

Die U-Nähte können zu den Nähten mit symmetrischem Querschnitt gerechnet werden.

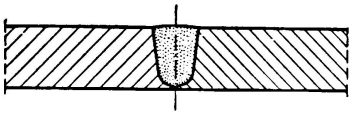


Fig. 16 a V.

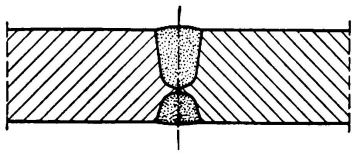


Fig. 16 b V.

Fig. 17 V.

12. Müssen gleichzeitig zwei miteinander verschweißte Gurtplatten gestoßen werden, so ist der Stoß an dieselbe Stelle zu legen (Fig. 18 V und 19 V), damit die Wurzel nachgeschweißt werden kann.

Zu 12. Wichtig ist auch, daß beim Versetzen des Stoßes die Gefahr bestände, daß die untere Platte beim Schweißen der Wurzel verletzt werden könnte.

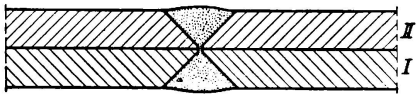


Fig. 18 V.

Zwei V-Nähte.

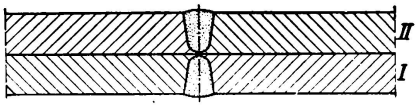


Fig. 19 V.

Zwei U-Nähte.

13. Gedrückte Gurtplatten, die nicht durch Nähte unmittelbar mit dem Steg (durchlaufend) verbunden sind, dürfen nicht breiter als ihre 30fache Dicke sein. Läßt sich eine größere Breite nicht umgehen, so sind die Gurtplatten gegen Ausbeulen durch Vernieten oder Verbolzen zu sichern. (Im Druckgurt kein Lochabzug.)

14. Wechselt bei den Gurtplatten die Dicke, so soll der Übergang zur dickeren Platte ein allmählicher sein (Fig. 20 V). Ebenso soll der Übergang von einem dünneren Stegblech zu einem dickeren ein allmählicher sein.

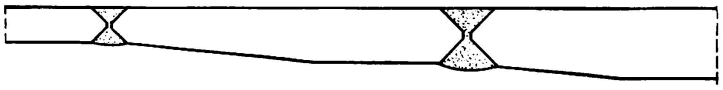


Fig. 20 V.

Gurtplatten mit Wechsel in der Dicke.

15. Beim Stumpfstoß des Stegblechs muß die Nahtwurzel nachgeschweißt werden, auch muß der Übergang von der Schweißraupe zum Blech nach Maßgabe der Tafeln 2 V und 3 V, Zeile 20, bearbeitet werden.

16. Montagelöcher sind in den Zeichnungen anzugeben; die Löcher sind so anzuordnen, daß hochbeanspruchte Querschnittsteile möglichst nicht geschwächt werden.

Im gezogenen Gurt sollen nach Möglichkeit keine Stirnkehlnähte senkrecht zur Kraftrichtung angeordnet werden; wo dies unvermeidbar ist oder da, wo Flankenkehlnähte beginnen oder endigen, sollen, wenn irgend möglich, die Nähte bearbeitet werden, so daß sich ein allmählicher Übergang von der Schweißraupe zum Blech bildet. Wegen der α-Werte vgl. unter 6.

Wenn auch vorläufig Fachwerkbrücken nicht geschweißt werden sollen, so kann doch bei der Verstärkung von genieteten Fachwerkträgern Schweißung in Frage kommen. Dies hat den Vorteil, daß die Träger nicht abgestützt zu werden brauchen. Bei der Berechnung ist anzustreben, daß die Niete die gesamte ruhende Last einschließlich der Verstärkungsteile tragen und daß die Schweißanschlüsse die ganze Verkehrslast aufnehmen. Ist dies nicht möglich, so müssen die Schweißverbindungen mindestens zwei Drittel der Verkehrslast aufnehmen können, wobei der Rest der Verkehrslast noch den Nieten zuzuweisen ist.[23] Bei solchen

[23] Diese Vorschrift ist durch statische und Dauerfestigkeitsversuche im Staatlichen Materialprüfungsamt in Dahlem als angängig bestätigt worden. Vgl. *Kommerell* und *Bierett*. Über die statische Festigkeit und die Dauerfestigkeit genieteter, vorbelasteter und unter Vorlast durch Schweißung verstärkter Stabanschlüsse. Stahlbau 1934, S. 81.

Verstärkungsarbeiten ist ganz besonders auf die durch das Schweißen auftretenden Schrumpfspannungen zu achten.

17. Bei allen *Gurtplattenstößen* und bei den *Stegblechstößen,* soweit gemäß den Tafeln 2V und 3V, Zeile 20, der Unterschied der größten und kleinsten Biegespannung $\sigma_o - \sigma_u \geqq 11{,}2$ kg/mm² ist, ferner bei sonstigen *wichtigen Stumpfnähten,* bei denen es ausdrücklich in der Zeichnung vorgeschrieben ist, muß bei A und B ein allmählicher Übergang von der Schweiße zum Blech durch Abschmirgeln oder dgl. geschaffen werden. Rillen quer zur Kraftrichtung dürfen nicht entstehen, vielmehr muß die Oberfläche an diesen wichtigen Stellen glatt und ohne Vertiefungen sein. Entstehen beim Einbrand Löcher im Blech oder in der Schweiße, so muß die Schweiße sachgemäß beseitigt, nachgeschweißt und aufs neue nachbearbeitet werden. Es ist unwesentlich, wenn hierbei der Mutterwerkstoff links und rechts von A und B durch einwandfreies Schweißgut ersetzt werden muß. Die Hauptsache ist, daß der Übergang allmählich und glatt wird. Vorhandene Ausschleifungen im Blech bis 5 % der vorhandenen Blechdicke werden nicht beanstandet. Statt der Ausschleifungen bei A und B unter Belassung des Wulstes kann auch vollständiges Abschleifen

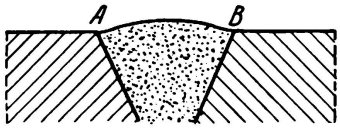


Fig. 25 V.

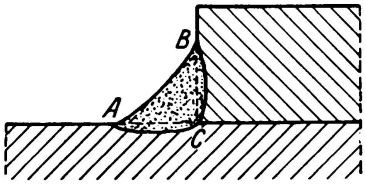


Fig. 26 V.

in der Kraftrichtung angeordnet werden. An der Oberfläche dürfen keine Löcher verbleiben (Fig. 25 V).

18. In den Zeichnungen muß die Art der Ausführung vorgeschrieben werden. Z. B. „Stumpfnaht I. Güte, Schweißraupe bearbeiten".

19. Bei längs *durchlaufenden* Stumpf- und Kehlnähten ist eine Schweißraupenbearbeitung im allgemeinen nicht notwendig.

20. Bei allen *Kehlnähten* muß der Einbrand sicher bis in die Wurzeln C reichen (Fig. 26 V). Zu tiefer Einbrand unter die Blechoberfläche ist zu vermeiden. Bei Stirnkehlnähten ist besonders wichtig, daß der Schweißer die vorgeschriebene Form und die Maße der Schweißraupen genau einhält. *Kerben* bei A und B dürfen unter keinen Umständen geduldet werden. (Beseitigen der schlechten Stellen, Nachschweißen und Nacharbeiten örtlich.)

21. *Alle Kehlnähte, die beginnen und endigen, müssen,* soweit dies unter Anwendung der α-Werte der Tafeln 2V und 3V, Zeile 16 und 17, vorgeschrieben ist, so *nachgearbeitet werden,* daß ein allmählicher Übergang von der Naht zum Blech entsteht (vgl. Fig. 27 V). Dies ist in den Zeichnungen zu vermerken. Z. B. „Anfang der Kehlnaht nacharbeiten".

22. Schweißstellen, die den vorstehenden Bestimmungen nicht entsprechen, sind vorsichtig und mit nicht zu groben Werkzeugen sachgemäß zu entfernen und durch einwandfreie zu ersetzen. Flickstellen und deren Umgebung sind nach dem Ausbessern mit dem Brenner leicht zu erwärmen.

23. An tragende Bauteile dürfen bloß zur Erleichterung der Aufstellung keine Teile angeschweißt werden, die nicht in den genehmigten Zeichnungen vorgesehen sind, auch wenn sie nur vorübergehend benutzt und später wieder beseitigt werden sollen. Wo nötig, sind kleine Löcher (möglichst in den Teilen, die nicht hoch beansprucht sind) zu bohren. Die Löcher sind später durch Niete — nicht durch Zuschweißen — zu schließen.

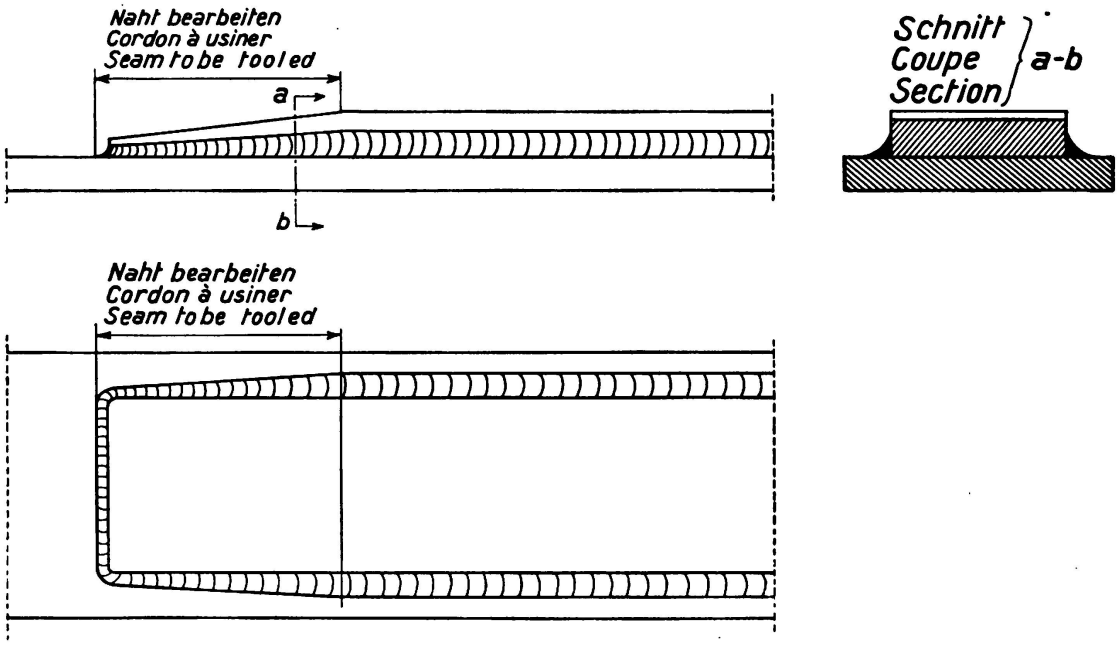


Fig. 27 V.

Schaffen eines allmählichen Übergangs durch Abschmirgeln oder Abfräsen.

24. Es ist peinlich zu verhüten, daß das Tragwerk durch Schweißspritzer oder Schweißtropfen beschädigt wird, auch darf der Lichtbogen nur an solchen Stellen gezündet werden, an denen Schweißraupen ohnedies aufgelegt werden sollen. Sollten trotzdem solche, eine große Kerbwirkung verursachende Beschädigungen an tragenden Teilen vorgekommen sein, so ist der Schaden durch Nachschweißen zu beseitigen. Die Oberfläche muß an solchen Stellen glatt geschliffen werden.

Zu 23 und 24. Durch solche Anschweißungen und Schweißbeschädigungen an tragenden Bauteilen entstehen Kerbwirkungen, welche die Dauerfestigkeit erheblich herabsetzen. Bei einem Dauerfestigkeitsversuch in Dahlem ging ein Dauerbruch von einer Stelle am Blech aus, das der Schweißer zum Zünden mit der Schweißzange berührt hatte.

25. Die Schweißarbeiten sind, soweit irgend möglich, in der Werkstatt auszuführen. Hält es der Unternehmer für zweckmäßig, an Stellen, an denen geschweißt werden soll, die Nietbauweise anzuwenden, so hat er seine Vorschläge rechtzeitig der Reichsbahndirektion zur Genehmigung vorzulegen.

26. Um wichtige Schweißnähte in waagerechter Lage schweißen zu können, sind geeignete Drehvorrichtungen sowohl in der Werkstatt als auch möglichst auf der Baustelle zu verwenden.

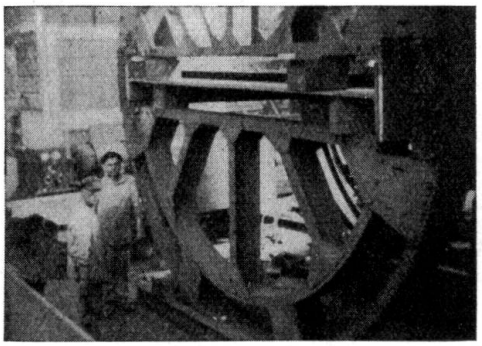


Fig. 37.

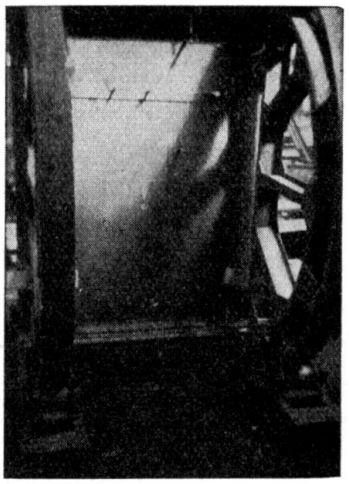


Fig. 38.

Zu 26. Aus den beiden Fig. 37 und 38 sind solche Drehvorrichtungen zu erkennen.

27. Besonders wichtig ist, daß die beim Schweißen unvermeidlichen Schrumpfungen sich soweit wie möglich auswirken können, damit in den Bauteilen nur möglichst kleine Schrumpfspannungen entstehen. Die zusammenzuschweißenden Teile dürfen daher nicht zu starr vorher festgelegt werden, damit die zu verschweißenden Teile dem Schrumpfen folgen können.

Zu 27. Das gilt besonders auch bei Baustellenstößen. Muß z. B. ein Hauptträger bei A und B gestoßen werden, so wird man das Stegblech bei C und D stoßen, aber noch nicht verschweißen (Fig. 39). Auch die Gurtnähte EC, DF GC, DH wird man zunächst noch offenlassen.

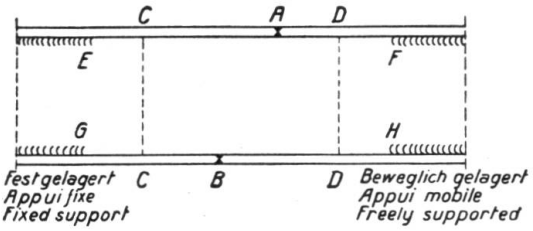


Fig. 39.

Den Brückenteil links könnte man fest lagern, den Brückenteil rechts dagegen beweglich, natürlich so, daß keine Unfälle entstehen können. Dann können zunächst die Schweißnähte bei A und B gezogen werden, ohne daß in den Gurtungen erhebliche Schrumpfspannungen auftreten werden. Jetzt wird man das Stegblechstück CC DD einbauen, das so lang und etwas ausgebaucht gemacht wird, daß es nach dem Schweißen der Stoßfuge CC gerade bei DD paßt. Zuerst wird die Naht CC in einem Stück gezogen. Durch das Schrumpfen entstehen zwischen EC und GC hierbei zunächst noch keine Schrumpfspannungen. Beim Schweißen der Stegblechstoßfuge DD streckt sich das vorher etwas gekrümmte Stegblech. Erst wenn die Nähte EF und GH zur Verbindung der Gurtungen mit dem Stegblech gezogen werden, entstehen Schrumpfspannungen in den Gurtungen und im Stegblech. Um diese auf größere Länge zu verteilen, war es zweckmäßig, die Nähte EC, FD usw. zunächst noch nicht zu schweißen. Erst wenn alle Nähte am Baustellenstoß gezogen sind, werden sie bearbeitet.

G. *Zusammenfassung.*

1. Es wird zunächst dargelegt, wie sich in Deutschland seit dem Pariser Kongreß 1932 ein neues Berechnungsverfahren für geschweißte Bauwerke, die häufig wechselnde Belastungen zu ertragen haben, entwickelt hat. In der Hauptsache dienten die vom Verfasser aus den zahlreichen Dauerversuchen mit Schweißverbindungen des „Kuratoriums für Dauerfestigkeitsversuche" gezogenen Schlüsse als Grundlage für die Abschnitte Berechnung und bauliche Durchbildung der 1935 eingeführten „Vorläufigen Vorschriften für geschweißte, vollwandige Eisenbahnbrücken".

2. Es werden die bei dynamischen Versuchen mittels Pulsatormaschinen und Schwingbrücken vorkommenden Begriffe: Ursprungsfestigkeit σ_U, Wechselfestigkeit σ_W Schwingweite σ_W an Hand der Linie der Dauerfestigkeiten erläutert. Da mit genügender Genauigkeit diese Linie der Dauerfestigkeiten als eine Gerade angenommen werden kann (Fig. 3), läßt sich mit Hilfe des aus Versuchen gewonnenen Neigungswinkels, $\sphericalangle \alpha$, die Wechselfestigkeit nach der Formel

$$\sigma_W = \frac{\sigma_U}{1 + \operatorname{tg} \alpha} \text{ ableiten.} \tag{1}$$

3. Unter Punkt C sind die hauptsächlichsten Ergebnisse der Kuratoriumsversuche zusammengestellt.

a) Schweißverbindungen, die bei rein statischer Prüfung gute Ergebnisse ihrer Festigkeit lieferten, ergaben bei Dauerbeanspruchung bedeutend niedriger liegende Festigkeitswerte.

b) Stumpfnähte schnitten wegen des günstigeren Kraftflusses besser ab als Kehlnähte.

c) Die Dauerbrüche gingen meist durch den Mutterwerkstoff hindurch und nahmen ihren Ausgang von kleinen Oberflächenvertiefungen am Übergang der Schweißraupen zum Blech (Kerbwirkung).

d) Bei Stumpfnähten mit nicht nachgeschweißter Wurzel betrugen die Ursprungsfestigkeiten nur das 0,7fache der in der Wurzel nachgeschweißten Nähte.

e) Stumpfnähte bester Ausführung unter 45° zur Kraftrichtung zeigten im Dauerzugversuch Ursprungsfestigkeiten von $\sigma_U = 22$ kg/mm² gegenüber $\sigma_U = 18$ kg/mm² guter Stumpfnähte, die rechtwinklig zur Kraftrichtung gelegt waren.

f) Die Festigkeiten von Stumpfnähten, die noch zusätzlich mit Laschen gedeckt wurden, lagen nicht höher als die von guten Stumpfnähten allein. Durch Laschendeckung können dynamisch beanspruchte Stumpfnähte verschlechtert werden.

g) Bei allen Kehlnähten sank die Dauerfestigkeit erheblich, wenn nicht bis in die Wurzel geschweißt wurde.

h) Leichte Stirnkehlnähte mit allmählichem Übergang der Schweiße zum Blech haben sich besser erwiesen als die vollen Kehlnähte.

i) An Stellen, an denen Stirnkehlnähte angeordnet sind, oder da, wo Bauteile durch Flankenkehlnähte an durchgehende Bauteile angeschlossen sind,

also überall da, wo Flankenkehlnähte beginnen oder endigen, wird die Festigkeit des Bauteils herabgemindert. Höhere Ursprungsfestigkeiten ergeben sich, wenn der Übergang der Schweiße zum Blech sanft auslaufend gestaltet wird.

k) Sowohl bei Stumpfnähten, als auch bei Kehlnähten spielt die Form der Naht, insbesondere am Übergang der Schweiße zum Blech, eine ausschlaggebende Rolle. Die Nahtform ist viel wichtiger als das verwendete Schweißgut.

l) Die Ergebnisse der Dauerfestigkeitsversuche in den Schwingbrücken stimmten im wesentlichen mit denen in den Pulsatormaschinen überein.

m) Zwischen den Schweißverbindungen aus den Baustählen St 37 und St 52 wurden keine wesentlich verschiedenen Dauerfestigkeiten gefunden. Erst bei größeren Vorspannungen kam der höherwertigere Baustahl mehr zur Geltung.

n) Dauerversuche mit in der Längsrichtung beanspruchten, durchlaufenden Kehlnähten ergaben ebenso hohe Ursprungsfestigkeiten wie bei Stumpfnähten (σ_u = 16 bis 18 kg/mm²).

o) Schweißdrähte für Brücken müssen auf ihre Eignung für Dauerbeanspruchung geprüft werden.

4. Die aus den zahlreichen Versuchen gefundenen Dauerfestigkeitswerte der einzelnen Schweißnahtarten und Schweißverbindungen wurden, so weit nötig, mit Hilfe der Linie der Dauerfestigkeiten ergänzt, so daß die Dauerfestigkeitswerte der hauptsächlich vorkommenden Verbindungen im wechselnden und schwellenden Beanspruchungsbereich als bekannt angesehen werden können. Unter Berücksichtigung einer Sicherheitsspanne wurden diese Werte in den „Schaubildern der zulässigen Spannungen $\sigma_{D\,zul}$ bei geschweißten Brücken" (Spannungshäuschen, Fig. 1 V und 2 V) festgelegt. In diesen Darstellungen ist die zulässige obere Spannung σ_o in Abhängigkeit von der unteren Spannung σ_u aufgetragen.

5. Um nun nicht eine große Anzahl zulässiger Spannungen einführen zu müssen, die zudem noch für jede Schweißnahtart und deren Ausführungsmöglichkeiten vom Verhältnis $\sigma_\mu : \sigma_o$ oder min M : max M abhängig sein würden, werden alle in den Festigkeitsberechnungen nachzuweisenden Spannungen einheitlich den zulässigen Spannungen der Baustähle, σ_{zul} (1400 kg/cm² bei St. 37 und 2100 kg/cm² bei St 52) gegenübergestellt.

Für die Querschnittsbemessung muß die gedachte Spannung

$$\sigma = \gamma \cdot \frac{\max M}{W} \leq \sigma_{zul} \tag{3}$$

(z. B. 1400 kg/cm² bei St. 37) nachgewiesen werden. Darin ist

$$\gamma = a + b \cdot \frac{\min M}{\max M} \geq 1 \tag{6}$$

derjenige dynamische Beiwert, mit dem das größte Biegemoment max M vervielfacht werden muß, damit der Träger berechnet werden kann, wie ein nur

statisch beanspruchter mit dem größten Biegemoment max M. Die Werte a und b werden aus den zulässigen Spannungen $\sigma_{D\,zul}$ der Linien Ia, Ib für ungestoßen durchgehende Bauteile (Spannungshäuschen, Fig. 1V, 2V) abgeleitet. Es ergab sich

$$\gamma = 1{,}0 - 0{,}3\,\frac{\min M}{\max M} \tag{20}$$

bei geschweißten Brücken aus St 37 (Bild 34).

Zur Berücksichtigung der Wertigkeit der Schweißnähte selbst und der Bauteile in unmittelbarer Nähe der Schweißnähte wurden die Abminderungsbeiwerte (Formzahlen) α eingeführt. Diese α-Werte sind aus den Spannungshäuschen so abgeleitet, daß für die ungestoßen durchgehenden Bauteile, auch für Bauteile mit durchlaufenden Längsnähten, der α-Wert = 1,0 ist (Tafel 2V, Zeile 1 und 2). Allgemein gilt daher für die Berechnung geschweißter Brücken die Formel

$$\sigma = \frac{\gamma}{\alpha} \cdot \frac{\max M}{W} \leqq \sigma_{zul} \tag{5 V}$$

(1400 kg/cm² bei Baustahl St 37).

Die α-Werte können aus den Tafeln (für St 37, Tafel 2V) nach Ermittlung der Verhältnisse $\frac{\min M}{\max M}$ entnommen oder berechnet werden.

6. Unter Punkt F ist die sich aus den Versuchen ergebende bauliche Durchbildung erläutert. Ganz besonders tritt die Bedeutung eines ungestörten Kraftflusses bei dynamisch beanspruchten Schweißverbindungen hervor, wie das bei guten Stumpfnähten der Fall ist. *Auf Zug beanspruchte Gurtplatten dürfen jetzt ohne jede Laschendeckung stumpf gestoßen werden.* Die weiteren aus den Dauerversuchen gewonnenen Erkenntnisse, wie die Bearbeitung von Nähten und Bauteilen, z. B. wo Flankenkehlnähte beginnen oder endigen oder das Verbot, von bestimmten Spannungen an quer zur Kraftrichtung Kehlnähte an gezogene Bauteile zu legen, wurden ebenso in die neuen „Vorschriften für geschweißte, vollwandige Eisenbahnbrücken" übernommen. Mit diesen Vorschriften ist dem Ingenieur eine Handhabe gegeben, mit Sicherheit und in schweißgerechter Bauweise geschweißte Brücken zu entwerfen, zu berechnen und auszuführen.

Zusammenfassung.

In Deutschland hat sich seit dem Pariser Kongreß 1932 ein neues Berechnungsverfahren für geschweißte vollwandige Eisenbahnbrücken entwickelt, wobei die Ergebnisse von Dauerfestigkeitsversuchen in Pulsatormaschinen und mittels Schwingbrücken berücksichtigt wurden. Für die Berechnung geschweißter Eisenbahnbrücken gilt die Formel

$$\sigma = \frac{\gamma}{\alpha} \frac{\max M}{\min M} \leqq \sigma \text{ zul, wo}$$

$\gamma = a + b \cdot \frac{\min M}{\max M} \geqq 1$ derjenige dynamische Beiwert ist, mit dem das größte Biegemoment max M vervielfacht werden muß, damit der Träger wie ein nur statisch mit max M beanspruchter berechnet werden kann.

Zur Berücksichtigung der Wertigkeit der Schweißnähte selbst und der Bauteile in unmittelbarer Nähe der Schweißnähte wurden Abminderungsbeiwerte α eingeführt, die aus den Versuchen abgeleitet sind. Die α-Werte sind unter anderem abhängig von der Art der Naht (Stumpfnaht oder Kehlnaht), von der Lage der Naht (z. B. beginnende Kehlnaht oder durchlaufende Naht) und bei Stumpfnähten davon, ob die Wurzel nachgeschweißt ist oder nicht. Auch die bauliche Durchbildung der geschweißten vollwandigen Eisenbahnbrücken ist durch die erwähnten Versuche stark beeinflußt worden.

Leere Seite
Blank page
Page vide

IIIa 2

Ermüdungsfestigkeit und Sicherheit geschweißter Konstruktionen (Brücken- und Hochbauten und Druckrohre).

Résistance à la fatigue et sécurité des constructions soudées (Ponts, charpentes, conduites forcées).

Fatigue Strength and Safety of Welded Structures (Bridges, Structural Steel Work and Pressure Pipes).

Dr. Ing. h. c. M. Roš,
Professor an der Eidg. Techn. Hochschule und Direktor der Eidg. Materialprüfungsanstalt, Zürich.

I. Einleitung.

Das Schweißgut ist das Erzeugnis einer Stahlgießerei im Kleinen, es muß daher grundsätzlich wie Stahlguß behandelt und beurteilt werden.

Zufolge praktisch unvermeidlicher Schlackeneinflüsse, Einbrandkerben, nicht ganz einwandfrei gebundener Stellen, sehr feiner Spannungsrisse und durch thermische Beeinflussung veränderten Gefüges, insbesondere in der Übergangszone (Einbrandzone) sind geschweißte Verbindungen gegen Ermüdungsbeanspruchungen empfindlicher als die durch Schweißung zu verbindenden Konstruktionsstähle selbst oder deren Nietverbindungen.

Die Ermüdungsprüfung innerhalb verschieden hoher Spannungsgrenzen ist eine besonders geeignete Prüfmethode für die Güte der Schweißnähte vom metallurgischen und konstruktiven Standpunkte aus.

Für höher gekohlte, gegen thermische und mechanische Einflüsse empfindlichere Stähle ($C \geqq 0{,}15\%$) sind, auf Grund metallurgischer Erkenntnisse und je nach Möglichkeit und Zweckbestimmung, nachfolgende Vorkehrungen gerechtfertigt: Verwendung geeigneter Sonderelektroden, Vorwärmen des Werkstückes, Nachglühen mit dem Brenner, spannungsfreies Glühen oder Ausglühen des ganz fertig geschweißten Stückes.

Die Berücksichtigung all dieser Erkenntnisse, gemeinsam mit den bisherigen Erfahrungen, hat sich äußerst fruchtbringend ausgewirkt auf

die Entwicklung der Elektroden,
die Art der Ausführung von Schweißverbindungen,
die Durchbildung der konstruktiven Einzelheiten,
die Berechnungsweise geschweißter Verbindungen und
die Abnahmeprüfung fertig geschweißter Bauwerke.

II. Versuche der Eidg. Materialprüfungsanstalt 1927—1935.

Die Ergebnisse der wichtigsten, seit 1927 in der E.M.P.A. ausgeführten statischen und Ermüdungsversuche sind im Berichte Nr. 86 der E.M.P.A. niedergelegt.[1] Die Ermüdungsversuche wurden in drei Pulsatoren von 10, 30 und 60 t Leistung, und vier Dauerbiegemaschinen von *Alfr. J. Amsler & Co.*, Schaffhausen, sowie der großen Torsions- und Biege-Schwingungsmaschine von *C. Schenck*, Darmstadt, durchgeführt.

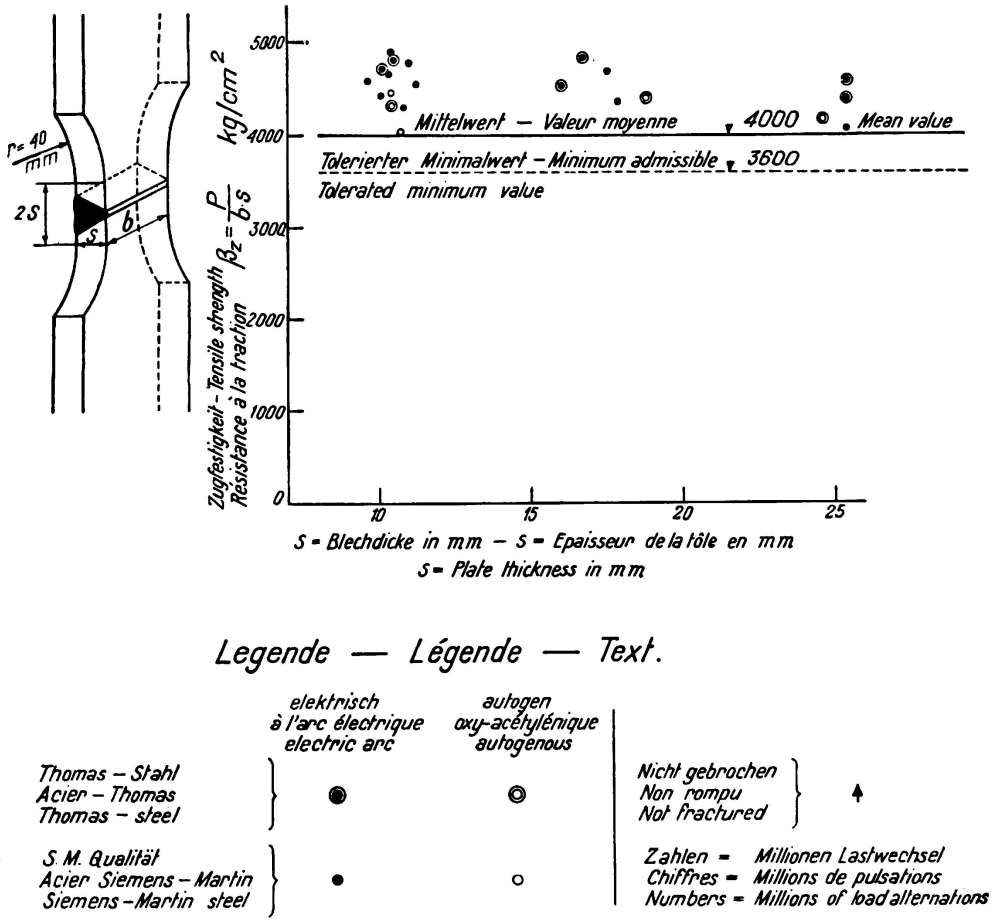


Fig. 1.

Stumpfschweißung. Zugfestigkeit.

Sämtliche Festigkeitswerte beziehen sich auf Schweißungen von *normalem Konstruktionsstahl* mit einer mittleren Zugfestigkeit von $\beta_z \cong 4000$ kg/cm², einem Kohlenstoffgehalt von $C \cong 0{,}1\,\%$ und möglichst geringen Mengen an Phosphor und Schwefel ($P + S \leq 0{,}1\,\%$), technisch frei von Schlackeneinschlüssen, Seigerungen, Doppelungen und Oberflächenfehlern (feine Anrisse). Die Schweißungen wurden mit *ummantelten Elektroden* und Gleichstrom ausgeführt; das Schweißgut war auf die Festigkeitsgüte des Stahles abgestimmt.

Die interessantesten dieser Ergebnisse sind in den Fig. 1 bis 14 dargestellt. Die nachfolgenden tabellarischen Zusammenstellungen geben die jeweiligen Mittel-

[1] *M. Roš* und *A. Eichinger:* „Festigkeit geschweißter Verbindungen", Bericht Nr. 86 der Eidg. Materialprüfungsanstalt Zürich, März 1935.

werte der statischen Zugfestigkeiten sowie verschiedenen Ermüdungsfestigkeiten an; es bedeuten:

$$\text{Ermüdungs-Festigkeiten}\begin{cases} \sigma_D = \text{Schwingungsfestigkeit} \begin{cases} \sigma\,\max = +\sigma_D \\ \sigma\,\min = -\sigma_D \end{cases} \\ \sigma_U = \text{Ursprungsfestigkeit} \begin{cases} \sigma\,\max = +\sigma_U \\ \sigma\,\min = -0 \end{cases} \\ {}^1/_2\,\sigma_W = \text{Wechselfestigkeit} \begin{cases} \sigma\,\max = +\sigma_W \\ \sigma\,\min = +{}^1/_2\,\sigma_W \end{cases} \end{cases}$$

sichtbare Störung des molekularen Gleichgewichtes . . . σ_f = Fließgrenze
größte Zugkraft, bezogen auf den ursprünglichen Querschnitt β_z = Zugfestigkeit

Zusammenstellung 1.

	Ermüdungsfestigkeiten Mittelwerte in kg/cm²	
Zugbeanspruchung	σ_U	${}^1/_2\,\sigma_W$
Stumpfnaht		
Schweißung (Anschlußfläche)	1400	2000
Einbrandzone	1600	2300
	— Fig. 2 und 13 —	
Kehlnaht		
Schweißung (Anschlußfläche)	600	800
Einbrandzone	1000	1500
	— Fig. 4 und 14 —	
Flankennaht		
Schweißung (Anschlußfläche)	800	1200
Einbrandzone	1000	1500
	— Fig. 6 und 14 —	
Stirnnaht		
Schweißung (Anschlußfläche)	800	1200
Einbrandzone	1000	1500
	— Fig. 8 und 14 —	

Da Kehl-, Flanken- und Stirnnähte vorläufig als praktisch gleichwertig in eine gemeinsame Gruppe eingereiht wurden, können für letztere nachfolgende Gesamtmittelwerte angegeben werden:

Schweißnaht (Anschlußfläche) . . .	~ 700	1100
Einbrandzone	~ 1000	1500

Die Spannungen für Kehl-, Flanken- und Stirn-Nähte wurden stets auf die Anschlußfläche bezogen, weil der Ermüdungsbruch in der Regel in diesen den Ausgang nimmt. Da der Dauerbruch entweder entlang der Naht-Anschlußfläche oder in der Einbrandzone erfolgen kann, müssen beide Stellen untersucht und das Ergebnis berücksichtigt werden.

Da die Ermüdungsfestigkeit der Kehlnähte (Gruppe) von den Abmessungen der Bleche und Nähte und den dadurch bedingten Verformungsmassen abhängt,

sind die angegebenen Ermüdungsfestigkeiten — Zusammenstellung 1 — sowie Festigkeitsverhältnisse — Zusammenstellung 7 — nur als vorläufig verbindliche Richtlinien zu werten. Eingehendere Versuche müßten noch den Einfluß der Nahtlänge, Nahthöhe, Laschenbreite, sowie Blechdicke abklären.

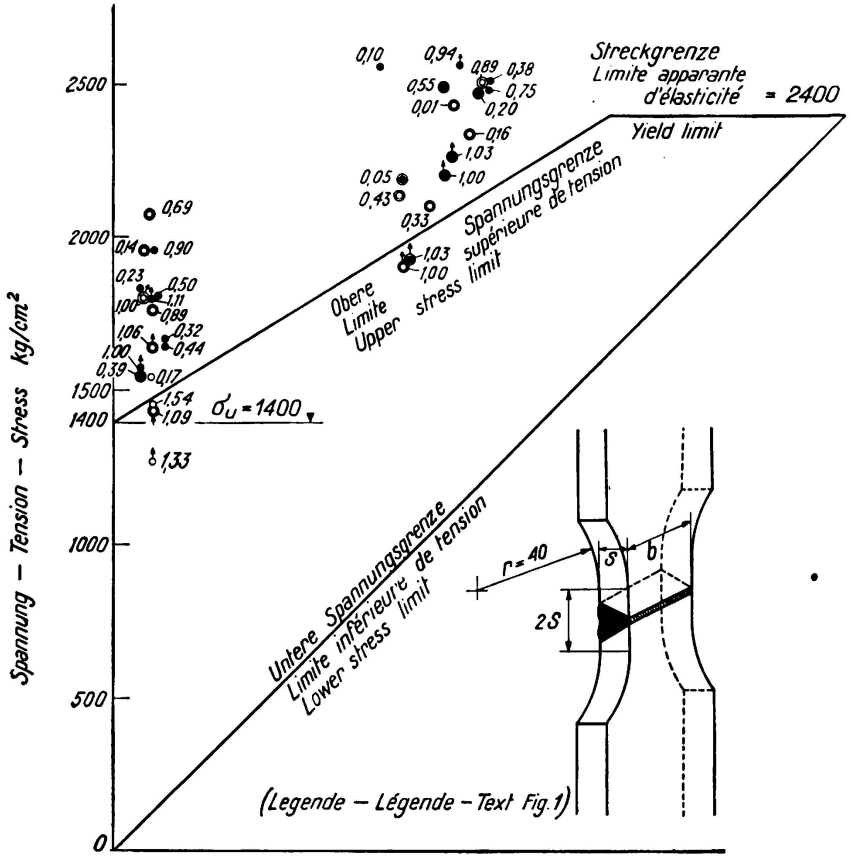


Fig. 2.
Stumpfschweißung. Zug-Ermüdungsversuche.

Die Gesamtmittelwerte der Ermüdungsfestigkeiten von Stumpfnähten und der Gruppe der Kehlnähte sind für die Anschlußflächen und die Einbrandzonen in den Fig. 13 und 14 in Form von Diagrammen dargestellt.[2]

---

[2] Die Schwingungsfestigkeiten für Zug und Druck (Volumen) konnten nicht unmittelbar durch Versuche ermittelt werden. Die in der *Schenck*'schen Ermüdungsmaschine ermittelten Ermüdungsfestigkeiten auf Biegung und Verdrehung (Randfaser) ergaben Verhältniswerte für

$$\text{Biegung von } \frac{\sigma_D}{\sigma_U} = 0{,}7 \qquad \text{— Abb. 9 und 10 —}$$

$$\text{Verdrehung (Torsion) von } \frac{\tau_D}{\tau_U} = 0{,}6 \qquad \text{— Abb. 12 —}$$

somit im Mittel von 0,65. Dieser Mittelwert von 0,65 wurde der Bestimmung der Zug-Druck-Schwingungsfestigkeit zugrunde gelegt; letztere ergibt sich für den Stumpfstoß dementsprechend zu $\sigma_D = 0{,}65 \cdot 1400 \cong 90$ kg/cm². Der so ermittelte σ_D -Wert stimmt mit dem von *Haigh* in seiner Zug-Druck-Schwingungsmaschine für den Stumpfstoß ermittelten Verhältniswert von

$$\frac{\sigma_D}{\sigma_U} = \frac{930}{1470} = 0{,}64$$

sehr gut überein.

Die Mittelwerte der *statischen Zugfestigkeiten*[3] von sachgemäß ausgeführten Stumpf- und Kehlschweißungen sowie der *Biegezahlen*[3] gehen aus der nachfolgenden Zusammenstellung 2 hervor. Die Ergebnisse der Zugfestigkeiten sind in den Fig. 1, 3, 5 und 7 dargestellt.

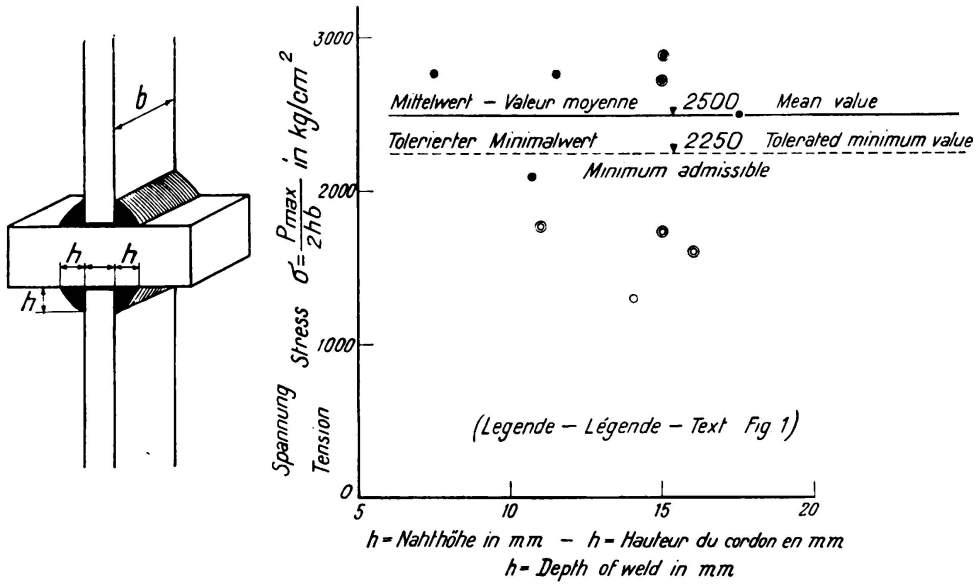


Fig. 3.

Kehlschweißung. Zugfestigkeit.

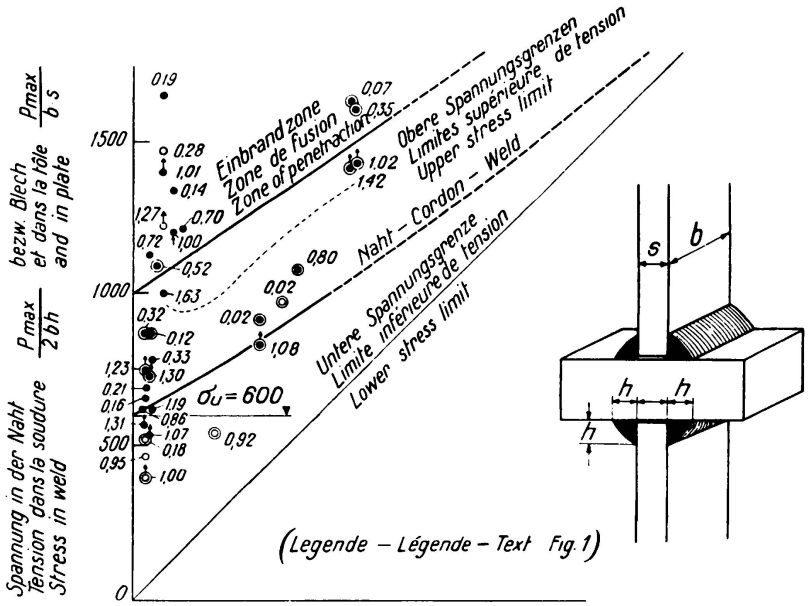


Fig. 4.

Kehlschweißung. Zug - Ermüdungsversuche.

[3] Die in den Zusammenstellungen 2 — statische Festigkeiten — und 3 — zulässige Spannungen — angegebenen Werte stützen sich auf die in der Eidg. Materialprüfungsanstalt in den Jahren 1927—1935 durchgeführten Versuche und wurden unverändert in die „*Neue Eidg. Verordnung über die Berechnung, die Ausführung und den Unterhalt der der Aufsicht des Bundes unterstellten Bauten aus Stahl*" vom 14. Mai 1935 aufgenommen.

Zusammenstellung 2.

Zugbeanspruchung	Statische Festigkeit in kg/cm² Mittelwert	Mindestwert
Stumpfnaht	4000	3600
Kehlnaht	2500	2250
Flankennaht	2500	2250
Stirnnaht	3500	3150

Dicke der Schweißung	Biegezahl $K = 50 \cdot \frac{s}{r}$ Druckzone	Zugzone
	Wurzel in der	
< 12 mm	28	20
12—20 mm	20	16
> 20 mm	16	12.

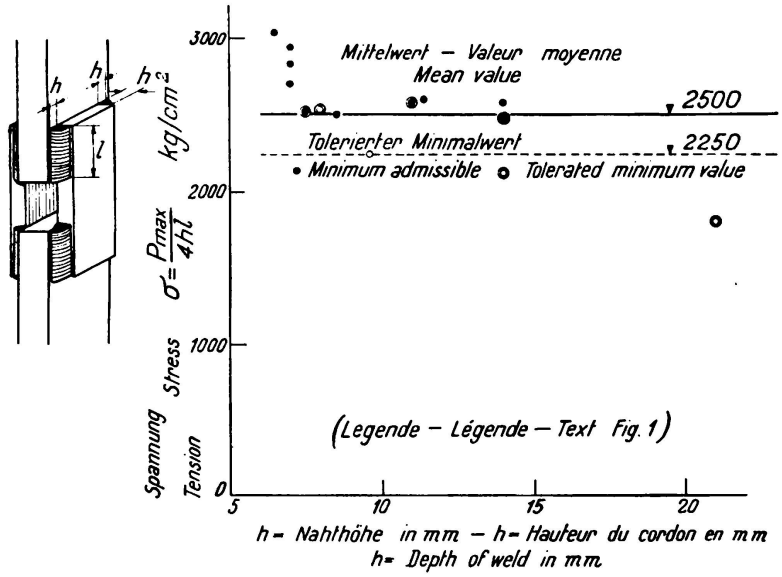


Fig. 5.

Flankenschweißung. Zugfestigkeit.

Mit steigendem Kohlenstoffgehalt, zum Zwecke der Erhöhung der Festigkeitseigenschaften nehmen die Vorsichtsmaßnahmen bzw. Schwierigkeiten beim Schweißen und Schneiden mit der Flamme zu. Zu diesen Maßnahmen gehören:

Vorwärmen, Wärmen während des Schweißens, Schweißen mit dicken Elektroden und in dickeren Schichten (letzteres bei Überkopfschweißungen undurchführbar),

sodann nach erfolgter Schweißarbeit: Ausglühen über die obere Umwandlungstemperatur (Normalisieren, bei Stahlguß mit Totglühen verbunden), spannungsfreies Glühen (bis unter die untere Umwandlungstemperatur) und gegebenenfalls Nachglühen mit dem Brenner.

Die Beachtung dieser Maßnahmen ist bei Druckrohren und Stahlgußkörpern möglich, bei Brücken und Hochbauten jedoch nur in äußerst seltenen Fällen durchführbar (Verziehen, Verwinden, Kosten).

III. Zulässige Spannungen.

Für Schweißverbindungen in normalem Konstruktionsstahl ($\beta_z \cong 4000$ kg/cm²) sind nachfolgende Spannungen in kg/cm² zulässig:

Zusammenstellung 3.

	Brücken		Hochbauten[4]	
Stumpfnähte				
Zug	$850\left(1+0{,}4\,\frac{A}{B}\right)$	— Fig. 16 —	$1000\left(1+0{,}4\,\frac{A}{B}\right)$	— Fig. 16 —
Druck	$1200\left(1+0{,}3\,\frac{B}{A}\right)$	— Fig. 15 —	$1400\left(1+0{,}3\,\frac{A}{B}\right)$	— Fig. 15 —
Schub	$660\left(1+0{,}4\,\frac{A}{B}\right)$		$770\left(1+0{,}4\,\frac{A}{B}\right)$	
Kehlnähte				
Zug	$425\left(1+0{,}4\,\frac{A}{B}\right)$	— Fig. 17 —	$500\left(1+0{,}4\,\frac{A}{B}\right)$	— Fig. 17 —
Druck	$600\left(1+0{,}3\,\frac{A}{B}\right)$		$700\left(1+0{,}3\,\frac{A}{B}\right)$	
Schub	$480\left(1+0{,}4\,\frac{A}{B}\right)$		$560\left(1+0{,}4\,\frac{A}{B}\right)$	

worin A = unterer, absolut kleinster Grenzwert der äußeren Kraft (Moment-, Längs- oder Querkraft),
B = oberer, absolut größter Grenzwert der gleichen äußeren Kräfte;
das Vorzeichen (+) ändert sich in (—) wenn die Grenzwerte entgegengesetzten Sinnes sind.

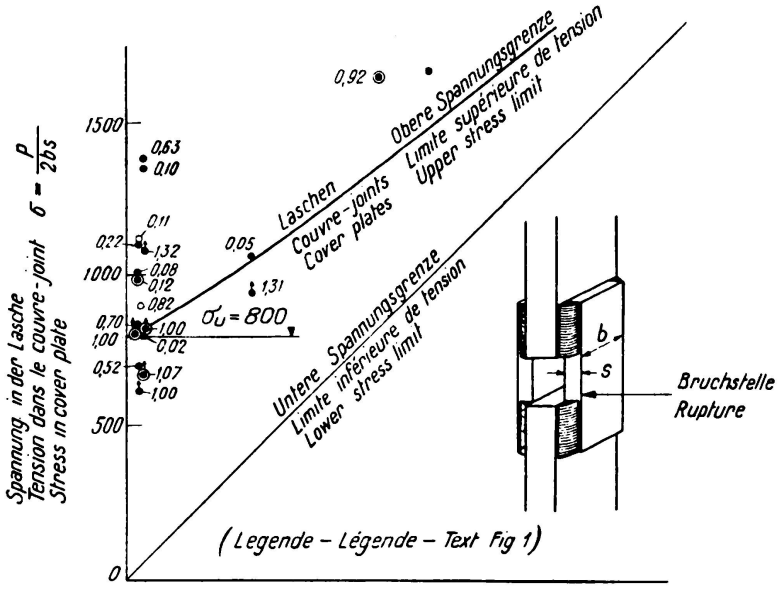


Fig. 6.
Flankenschweißung. Zug-Ermüdungsversuche.

[4] Gültig auch für Brücken, wenn alle Nebeneinflüsse aus Brems- und Reibungskräften, Temperaturänderungen usw. berücksichtigt werden. Gleichzeitig dürfen aber für die Haupteinflüsse — Eigengewicht, Nutz- und Verkehrslast, Fliehkräfte dynamische Wirkungen — die zulässigen Spannungen der Kolonne „Brücken" nicht überschritten werden.

Im Vergleich zur Nietung betragen die Verhältniszahlen der zulässigen Spannungen von Schweißung zu Nietung für den Fall A = 0 (Ursprungsfestigkeit):

Zusammenstellung 4.

— Verhältniszahlen [5] —

Beanspruchung auf	Nietung	Schweißung Stumpfnähte	Schweißung Kehlnähte
Zug	1,00	0,70	0,35
Druck	1,00	1,00	0,50
Schub	0,58	0,55	—
Scherung	0,80	—	0,40

Die Verhältniszahlen für die übrigen Werte von $\frac{A}{B}$ sind praktisch von gleicher Größenordnung.

[5] Die angegebenen Verhältniszahlen entsprechen den jeweiligen Verhältniswerten der Ermüdungsfestigkeiten von Schweißung zur Nietung. Für die Wahl der Ermüdungsfestigkeits-Verhältnisse war, abgesehen davon, daß im Betriebe stärkere oder schwächere Schwankungen der Beanspruchungen (Spannungswechsel, Betriebsstöße, Betriebsunterbrüche, Druckschwankungen, Wärmewechsel usw.) innerhalb gewisser, verschieden großer Grenzen auftreten können, noch die wichtige Tatsache maßgebend, daß die Ergebnisse der Ermüdungsfestigkeiten richtige Schweißverbindungen von unrichtigen, durch starke Unterschiede in den Festigkeitswerten viel ausgeprägter charakterisieren als die Ergebnisse der statischen Festigkeitsversuche. Mit größeren Materialfehlern und feinen Anrissen behaftete Schweißnähte verhalten sich selbst bei vorwiegend ruhender Dauerbelastung ähnlich wie praktisch fehlerfreies Material unter wiederholtem Lastwechsel; der Riß pflanzt sich mit der Zeit fort bis schließlich der Bruch erfolgt.

Auf Grund der Versuche der Eidg. Materialprüfungsanstalt ergeben sich nachfolgende Festigkeitsverhältnisse für die Ursprungsfestigkeiten von Schweißungen auf Nietungen bezogen.

	Zug	Druck	Schub
Stumpfer Stoss			
ungeglüht	$\alpha_1 = \frac{1400}{1900} = 0{,}7$	$\alpha_1 = 1{,}0$	$\alpha = \frac{1100}{1900} = 0{,}55$
	$\alpha_2 = \frac{1600}{1900} = 0{,}85$	$\alpha_2 = 1{,}0$	
geglüht	$\alpha_1 = \frac{1500}{1900} = 0{,}8$		
	$\alpha_2 = \frac{1800}{1900} = 0{,}95$		— Abb. 13 —
Kehl-, Flanken- und Stirn-Nähte			
	$\alpha_1 = \frac{700}{1900} = 0{,}35$	$\alpha_1 = 0{,}5$	$\alpha = \frac{750}{1900} = 0{,}4$
	$\alpha_2 = \frac{1600}{1900} = 0{,}85$	$\alpha_2 = 1{,}0$	— Abb. 14 —
Einbrandzone Stumpfnäthe			
	$\alpha_1 = \frac{1600}{1900} = 0{,}85$	$\alpha_1 = 1{,}0$	$\alpha = 0{,}58$
	$\alpha_2 = \frac{1610}{1900} = 0{,}85$	$\alpha_2 = 1{,}0$	
Kehlnähte (Gruppe)			
	$\alpha_1 = \frac{1100}{1900} = 0{,}6$	$\alpha_1 = 0{,}9$	$\alpha = 0{,}53$
	$\alpha_2 = \frac{1600}{1900} = 0{,}85$	$\alpha_2 = 1{,}0$	— Abb. 14 und 15 —

Bei reinen *Druckbeanspruchungen* des geschweißten stumpfen Stoßes, ohne Knickgefahr, liegt die Ermüdungsfestigkeit wesentlich höher als für reine Zugbeanspruchungen; die Fließgrenze, zufolge thermischen Einflusses nur unwesentlich tiefer ($\sigma_f = 2400$ kg/cm² gegenüber $\sigma_f = 2600$ kg/cm²), so daß es

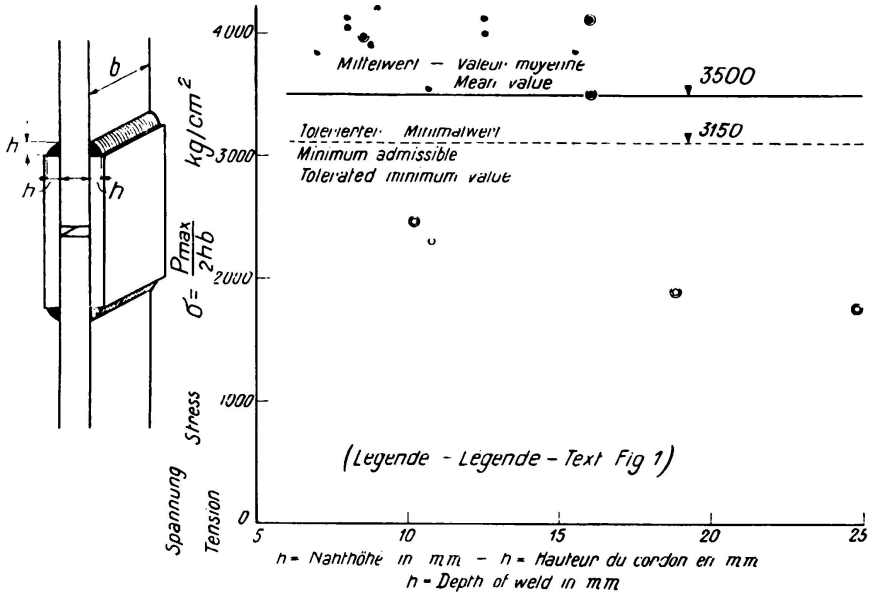


Fig. 7.

Stirnschweißung. Zugfestigkeit.

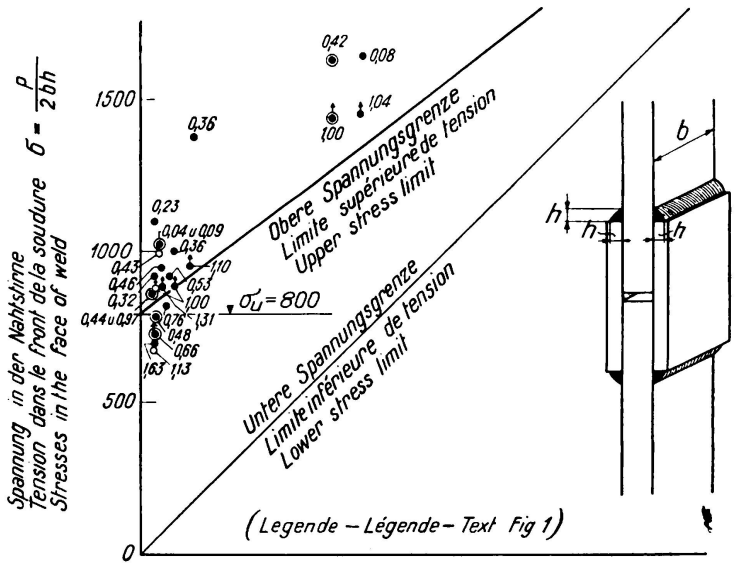


Fig. 8

Stirnschweißung. Zug-Ermüdungsversuche.

gerechtfertigt ist, die zulässigen Druckspannungen für die genieteten Verbindungen des normalen Konstruktionsstahles ($\beta_z = 4000$ kg/cm²) zuzulassen.

Bei ausschließlicher *Schubbeanspruchung* konnten Stumpfnähte nur in der *Schenck*'schen Ermüdungsmaschine auf Verdrehungs-Ermüdung geprüft werden. Die so ermittelten rechnerischen Ermüdungsfestigkeiten auf Verdrehung sind zu-

folge günstigerer Spannungsverteilung über den beanspruchten Querschnitt zu hoch. Ähnlich verhält es sich mit den auf Biegung beanspruchten Stäben. Legt man die Verhältniszahlen der Ermüdungsfestigkeiten auf Verdrehung und Biegung auch den auf Schub und Zug beanspruchten geschweißten Stumpfnähten zugrunde, so erhält man

Zusammenstellung 5.

	Beanspruchung auf Schub τ_s Fig. 12	Beanspruchung auf Biegung σ_B Fig. 9 u. 10	Verhältniswerte $\frac{\tau_s}{\sigma_B}$
Schwingungsfestigkeit σ_D	11	15	0,74
Ursprungsfestigkeit σ_U	18	21	0,86
Wechselfestigkeit $^1/_2\ \sigma_W$	29	40	0,73
		Mittelwert	$\sim$ 0,78

Nimmt man das Verhältnis der zulässigen Spannung auf Schub zur zulässigen Spannung auf Zug gleich groß an, so folgt entsprechend Zusammenstellung 4

$$\frac{\tau_{zul}}{\sigma_{zul}} = \frac{0{,}55}{0{,}70} \simeq 0{,}78$$

somit übereinstimmend.

Das Verhältnis der zulässigen Spannungen von *geschweißten Kehlnähten* wurde für Zug und Druck gleich der Hälfte (0,5) der zulässigen Spannungen von Stumpfnähten auf Zug, entsprechend dem praktisch gleichen Verhältnis der Ermüdungsfestigkeiten selbst, gewählt.

Zusammenstellung 6.

	Ermüdungsfestigkeiten kg/cm² σ_U	$^1/_2\ \sigma_W$
Stumpfnähte (Fig. 13)	1400	2000
Kehlnähte (Gruppe) (Fig. 14) . .	700	1100
Verhältniszahl	0,5	0,55

Auf Scherung beanspruchte Kehlnähte (z. B. Flankennähte) weisen höhere Ermüdungsfestigkeiten der Anschlußstellen selbst auf als auf Zug beanspruchte Kehlnähte. Dieser Tatsache wurde durch eine gegenüber Zug um

$$\left(\frac{0{,}40 - 0{,}35}{0{,}35}\right) = \frac{1}{7}$$

höhere zulässige Spannung auf Scherung Rechnung getragen.

Bei Kehlnähten Fig. 4 ist stets zu beachten, daß das Stahlmaterial dann in sehr ungünstiger Weise beansprucht ist, wenn Schlackenzeilen und Doppelungen vorhanden sind, die zum Aufreißen des Stahlmaterials quer führen können. Aus diesem Grunde muß in allen wichtigeren Fällen möglichst schlackenreines und doppelungsfreies Material vorgeschrieben werden, dessen Überprüfung durch makroskopische Gefügeuntersuchungen und gegebenenfalls auch Röntgendurchleuchtung erfolgen kann.

* * *

Die zulässigen Spannungen der *Einbrandzonen* wurden, entsprechend den größeren Werten der Ermüdungsfestigkeiten — Fig. 13 und 14 — auch höher als für die Nähte selbst gewählt, so daß auch die Verhältniszahlen der zulässigen Spannungen von Einbrandzone zu Nietung — Zusammenstellung 7 — höher sind.[6]

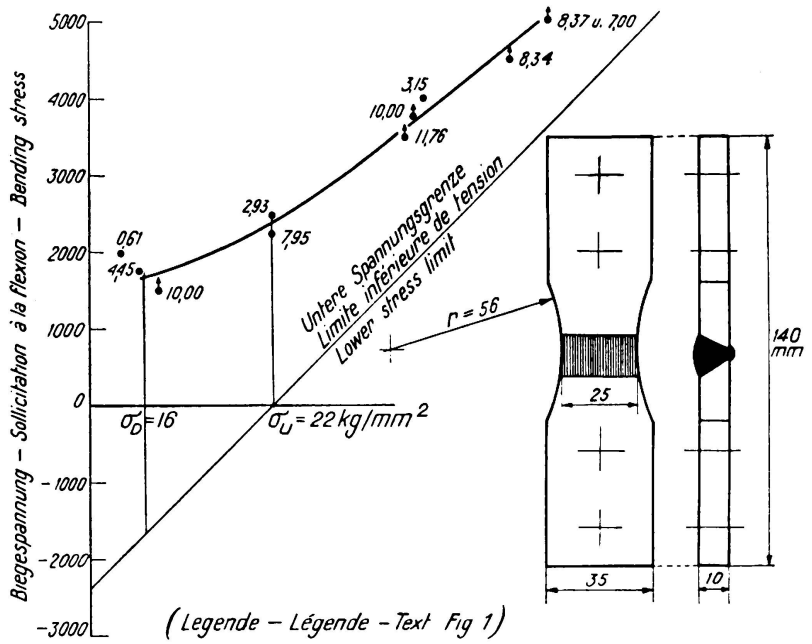


Fig. 9.

Stumpfschweißung mit Wulst. Dauerbiegeversuche.

Zusammenstellung 7.

— Verhältniszahlen[5] A = O —

Beanspruchung auf	Nietung	Einbrandzone Stumpfnaht	Einbrandzone Kehlnähte
Zug	1,0	0,85	0,60
Druck	1,0	1,0	0,90
Schub	0,58	0,58	—
Scherung	0,80	—	0,53

IV. Sicherheitsgrad.

Auf Grundlage der in den Abschnitten II — Versuche der E.M.P.A. — und III — Zulässige Spannungen — angegebenen Werte folgen nachfolgende *rechnerische Sicherheitsgrade* n_r.

[6] Hohe Beanspruchungen in den Kehlnähten können einen sehr ungünstigen Einfluß auf die Ermüdungsfestigkeit der Einbrandzone ausüben. Dies wird verständlich, wenn man beachtet, wie sehr die Spannungsverhältnisse hier verwickelt sind. Je schwächer die Kehlnaht, umso stärker ist die Spannungsanhäufung unmittelbar am Übergange vom Stahlmaterial zur Kehlnaht, weil auch die seitliche Schubbeanspruchung τ größer wird und diese ist auf die Anstrengung von Einfluß, indem für die nach der Konstanz der Gestaltänderungsenergie maßgebende Vergleichsspannung

$$\sigma_g = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} = 3\,(\tau^2 + \tau'^2)$$

τ für die Größe der Anstrengung mitbestimmend ist.

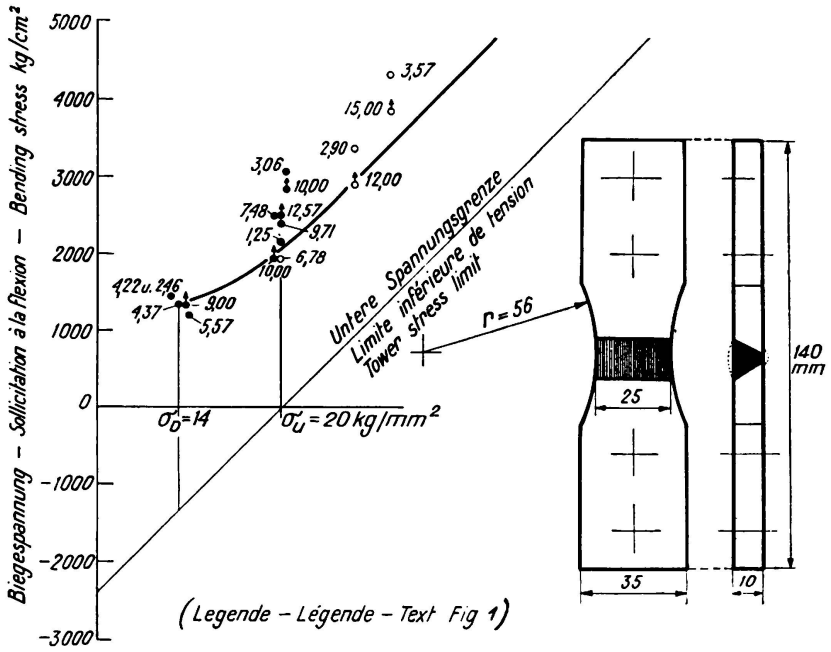


Fig. 10.

Stumpfschweißung, Wulst abgehobelt. Dauerbiegeversuche.

Zusammenstellung 8.

Brückenbau.

— Stumpfnähte auf Zug —

(Fig. 16 und 17)

Beanspruchung auf	Spannungen in kg/cm²		Sicherheitsgrad
	σ zulässig	σ-Ermüdung	n_r
Schwingungsfestigkeit σ_D .	500	900	1,80
Ursprungsfestigkeit σ_U . .	850	1400	1,65
Wechselfestigkeit $^1/_2\ \sigma w$.	1020	2000	1,95
$\frac{A}{B} = 1$ (Fließen) σ_f . . .	1200	2400	2
		Mittelwert	1,85
			~ 1,8

Hochbau.

— Stumpfnähte auf Zug —

(Fig. 16 und 17)

Beanspruchung auf	Spannungen in kg/cm²		Sicherheitsgrad
	σ zulässig	σ-Ermüdung	n_r
Schwingungsfestigkeit σ_D .	600	900	1,50
Ursprungsfestigkeit σ_U . .	1000	1400	1,40
Wechselfestigkeit $^1/_2\ \sigma w$.	1200	2000	1,65
$\frac{A}{B} = 1$ (Fließen) σ_f . . .	1400	2400	1,72
		Mittelwert	1,57
			~ 1,5

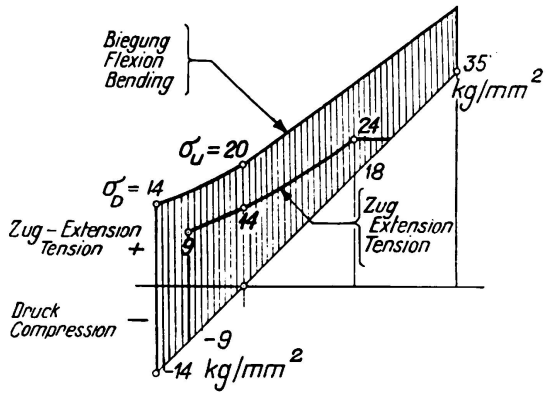


Fig. 11.
Stumpfnähte.
Ermüdungsfestigkeit.

Für die Übergangszonen (Einbrandzonen) sind die rechnerischen Sicherheitsgrade von praktisch gleicher Größenordnung.

Vergleichsweise betragen die rechnerischen Sicherheitsgrade n_r für die Nietung:

Zusammenstellung 9.

Brückenbau.

(Fig. 15)

Beanspruchung auf	Spannungen in kg/cm² σ zulässig	σ-Ermüdung	Sicherheitsgrad n_r
Schwingungsfestigkeit σ_D .	840	1300	1,55
Ursprungsfestigkeit σ_U . .	1200	1900	1,58
Wechselfestigkeit $^1/_2\,\sigma w$.	1380	2400	1,75
$\frac{A}{B} = 1$ (Fließen) σ_f . . .	1560	2600	1.67
		Mittelwert	1,64
			~ 1,6

Hochbau.[4]

(Fig. 15)

Schwingungsfestigkeit σ_D .	980	1300	1,33
Ursprungsfestigkeit σ_U . .	1400	1900	1,36
Wechselfestigkeit $^1/_2\,\sigma w$.	1610	2400	1,50
$\frac{A}{b} = 1$ (Fließen) σ_f . . .	1820	2600	1,43
		Mittelwert	1,41
			~ 1,4

Aus dem Vergleich der rechnerischen Sicherheitsgrade für Nietung und Schweißung geht hervor, daß für Schweißung dieselben nur unwesentlich, um im Mittel ~ 10% höher, somit praktisch gleich zu bewerten sind.

* * *

Der Unterschied zwischen dem *wirklichen* Sicherheitsgrad und dem *rechnerischen* ist abhängig

vom Grad der Übereinstimmung zwischen den Voraussetzungen

der statischen oder dynamischen Berechnung und den wirklichen Verhältnissen (äußere Kräfte, System, Spannungen),

der konstruktiven Gestaltung der Details,
der festigkeitstechnischen Güte der verwendeten Baustoffe,
der Schärfe der Kontrolle während der Ausführung und
der Güte der Ausführung selbst.

Die Beurteilung der *wirklichen Sicherheit* hat daher in jedem Einzelfalle individuell zu erfolgen.

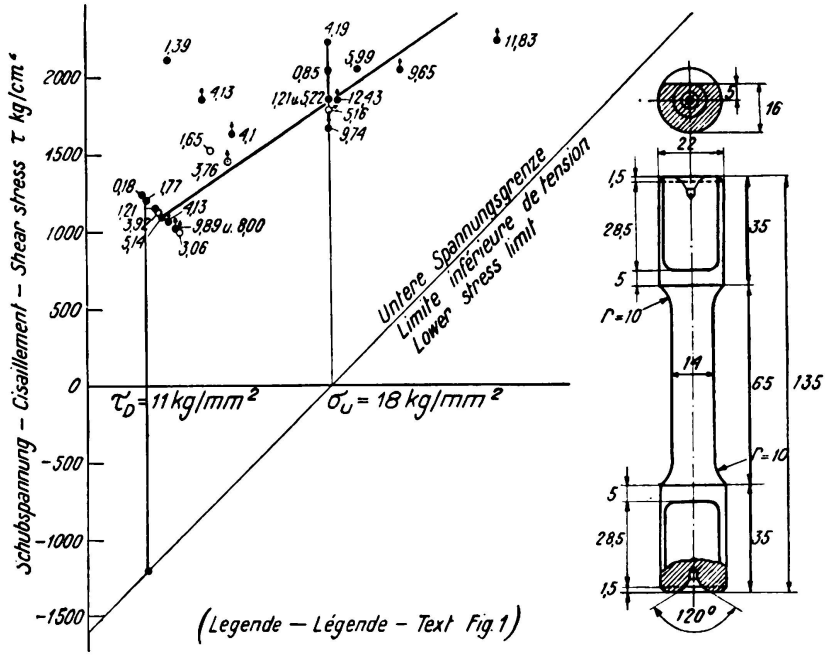


Fig. 12.

Verdrehung. Ermüdungsversuche.

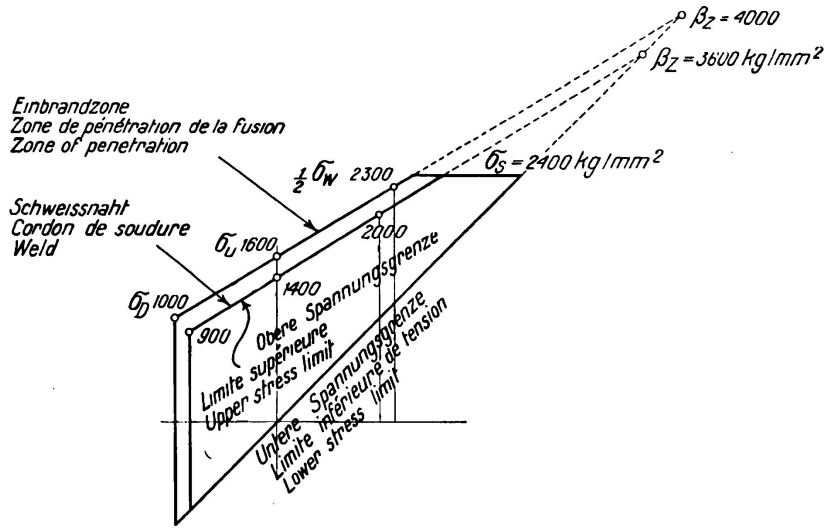


Fig. 13.

Stumpfnähte. Ermüdungsgrenzen.

V. Berechnungsverfahren.

Für mehrachsig beanspruchte Körperelemente z. B. bei einer Schrägnaht eines Druckrohres oder Kessels — Fig. 18 — wird ein Berechnungsverfahren ange-

geben, welches die zufolge einzelner Spannungskomponenten (σ_1, σ_2 und τ) erzeugte Anstrengung zutreffend zu berechnen gestattet.

Für praktisch homogenen, inbezug auf Festigkeits- und Verformungseigenschaften quasiisotropen Flußstahl, welcher somit nach zwei Hauptrichtungen gleiche Festigkeit besitzt, gilt, wie durch Versuche ausgewiesen, für Beanspruchungen bis nahe an die Bruchfestigkeit die Theorie der konstanten Gestaltänderungsenergie.[7]

Die Vergleichsspannung, welche die Anstrengung eines zweiachsig beanspruchten Elementes (σ_1, σ_2 und τ) (Fig. 18) angibt, wird durch die Beziehung

$$\sigma_g = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + 3\,\tau^2} \tag{1}$$

ausgedrückt.[8]

Bei einer Schweißverbindung sind aber die Festigkeiten winkelrecht zur Naht und in der Nahtlängsrichtung nicht einander gleich und es muß daher, im

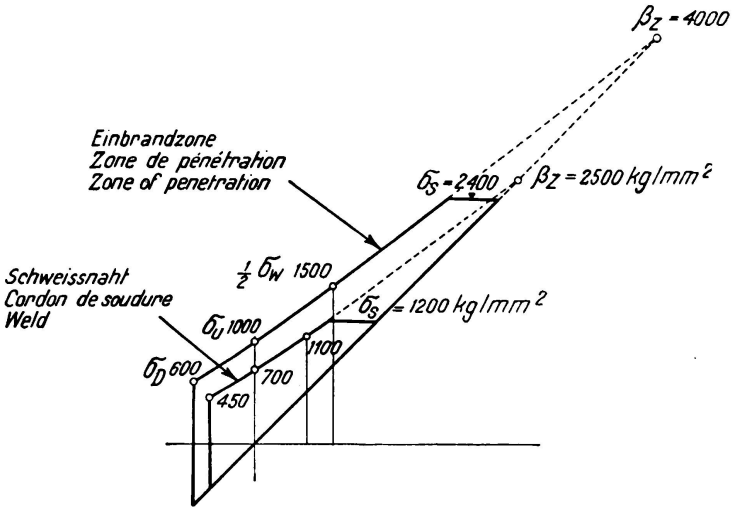


Fig. 14.

Kehl-, Flanken- und Stirnnähte. Ermüdungsgrenzen.

Bestreben nach Wahrung einheitlicher Grundsätze, der für quasiisotrope Körper gültige Ausdruck für die Vergleichsspannung derart umgeformt werden, daß er der Anisotropie der Schweißverbindungen Rechnung trägt. Am einfachsten und richtigsten läßt sich dies durch die Einführung des Festigkeitsverhältnis-Wertes α erreichen, wobei

$$\alpha = \frac{\text{Festigkeit der Schweißnaht}}{\text{Festigkeit des Stahles (Nietung)}}$$

ist und die gleichzeitige Berücksichtigung von durch Versuche ermittelten Ziffern β und γ, welche den Gliedern $\sigma_1 \cdot \sigma_2$ und τ vorzusetzen sind.

[7] *M. Roš* und *A. Eichinger:* „Versuche zur Klärung der Frage der Bruchgefahr, III Metalle". Bericht Nr. 34 der Eidg. Materialprüfungsanstalt, Zürich, Februar 1929.

[8] Die Theorie der konstanten Gestaltänderungsenergie von *Huber-Mises-Hencky*, welche durch die Versuche der Eidg. Materialprüfungsanstalt Zürich als die erweiterte Theorie von *Mohr* ausgewiesen wurde, liegt der Berechnung der Anstrengung, ein- oder mehrachsig beanspruchter Körper-Elemente nach der neuen „Eidg. Verordnung über die Berechnung, die Ausführung und den Unterhalt der der Aufsicht des Bundes unterstellten Bauten aus Stahl" vom 14. Mai 1935 zugrunde.

Stumpfnähte.

Fall 1.

Die winkelrecht zu einander wirkenden Normalspannungen σ_1 und σ_2 sind beide Zug- oder beide Druckspannungen, dann gelten die Beziehungen

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{\alpha_1}\right)^2 + \gamma \cdot \tau^2} \tag{2}$$

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_2}\right)^2 + \gamma \cdot \tau^2} \tag{3}$$

(Fig. 19)

maßgebend ist der größere der beiden Werte.

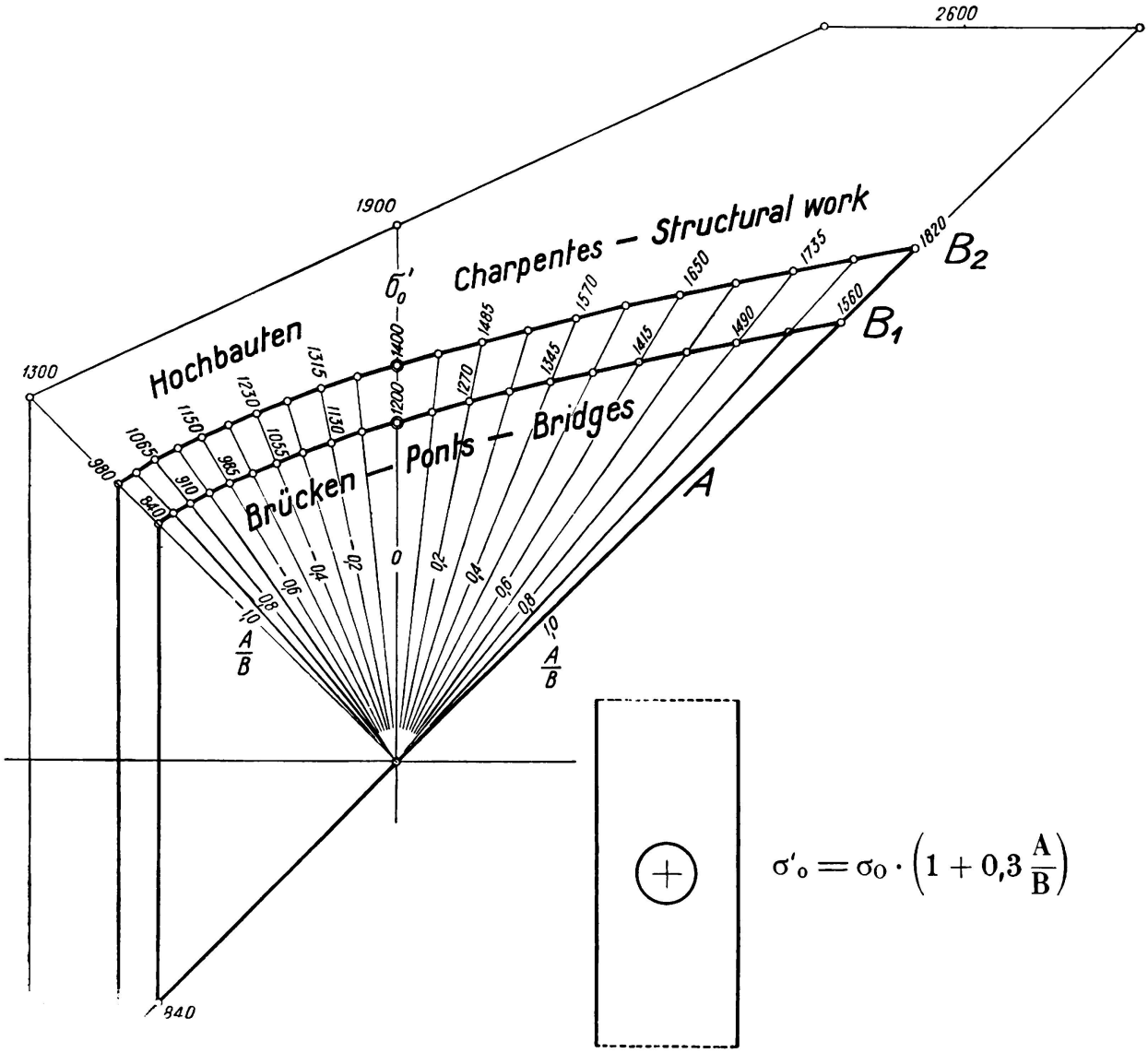


Fig. 15.

Nietung. Zulässige Spannungen.

Fall 2.

Die Normalspannungen σ_1 und σ_2 sind nicht gleichen, sondern entgegengesetzten Vorzeichens, dann gilt

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{\alpha_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\alpha_2}\right)^2 + \beta \cdot \left(\frac{\sigma_1\,\sigma_2}{\alpha_1\,\alpha_2}\right) + \gamma \cdot \tau^2} \tag{4}$$

(Fig. 19)

Es betragen für die Beanspruchung auf Ursprungsfestigkeit

	Zug	Druck	
$\alpha_1 =$	0,7	1,0	— siehe Zusammenstellung 4 —
$\alpha_2 =$	0,85	1,0	
$\beta =$		$^1/_2$	
$\gamma =$		3	

$\alpha_2 = 0{,}85$ für Zug folgt aus Versuchen der E.M.P.A.; für in Längsrichtung beanspruchte stumpfgeschweißte Nähte beträgt die Ursprungsfestigkeit im Mittel 1600 kg/cm² und für die Nietung wurde dieselbe zu 1900 kg/cm² festgestellt, somit

$$\alpha_2 = \frac{1600}{1900} \cong 0{,}85.$$

Die so ermittelten Vergleichsspannungen dürfen höchstens gleich den zulässigen Ursprungsbeanspruchung für Nietverbindungen nämlich

$\sigma_{o\,zul} = 1200$ kg/cm² für Brücken bzw.

$\sigma_{o\,zul} = 1400$ kg/cm² für Hochbauten[9]

sein. — Zusammenstellung 9 —.

Die genau gleichen Überlegungen auf die Kehlnähte und Einbrandzone übertragen, jedoch unter Berücksichtigung der jeweiligen α-Werte — siehe Zusammenstellungen 4 und 7 — führen zu den nachfolgenden Beziehungen:

Kehlnähte.

Fall 3.

Die Normalspannungen σ_1 und σ_2 sind beide Zug- oder beide Druckspannungen. Die Vergleichsspannung ist dann gleich

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{\alpha_1}\right)^2 + \gamma \cdot \tau^2} \leq \sigma_{o\,zul} \tag{5}$$

und

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\sigma_2}{\alpha_2}\right)^2 + \gamma \cdot \tau^2} \leq \sigma_{o\,zul} \tag{6}$$

(Fig. 20)

der größere Wert von σ_g ist maßgebend.

[9] Für Druckleitungen gelten für den stumpfgeschweißten Stoß und für Beanspruchungen infolge Betriebsdruck, vermehrt um 10 % für Stoßzuschlag nachfolgende zulässige Spannungen $\sigma_{o\,zul}$:

		Stahlqualität	
		M I	M II
		$\beta_z = 3500$—4400 kg/cm²	$\beta_z = 4100$—4700 kg/cm²
Druckleitungen:	Längsnähte . . .	900	1050
	Spiralnähte . . .	1050	1230
Verteilleitungen:	Längsnähte . . .	800	930
	Spiralnähte . . .	930	1080

Fall 4.

Die Normalspannungen σ_1 und σ_2 sind entgegengesetzten Vorzeichens. Als Vergleichsspannung gilt

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{\alpha_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\alpha_2}\right)^2 + \beta \cdot \left(\frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\alpha_1 \cdot \alpha_2}\right) + 8 \cdot \xi^2} \leqq \sigma_{\text{o zul}} \tag{7}$$

(Fig. 20)

Es betragen

	Zug	Druck	
$\alpha_1 =$	0,35	0,5	— Zusammenstellung 4 —
$\sigma_2 =$	0,85	1,0	
$\beta =$		$^1/_4$	
$\gamma =$		6	

Völlige Klarheit und ausreichende Erfahrungen über die Höhe der höchstzulässigen Anstrengung und das Verhalten von gleichzeitig auf Längsspannung und Schub beanspruchten Kehlnähten (z. B. Kehlnähte zwischen dem Steg und

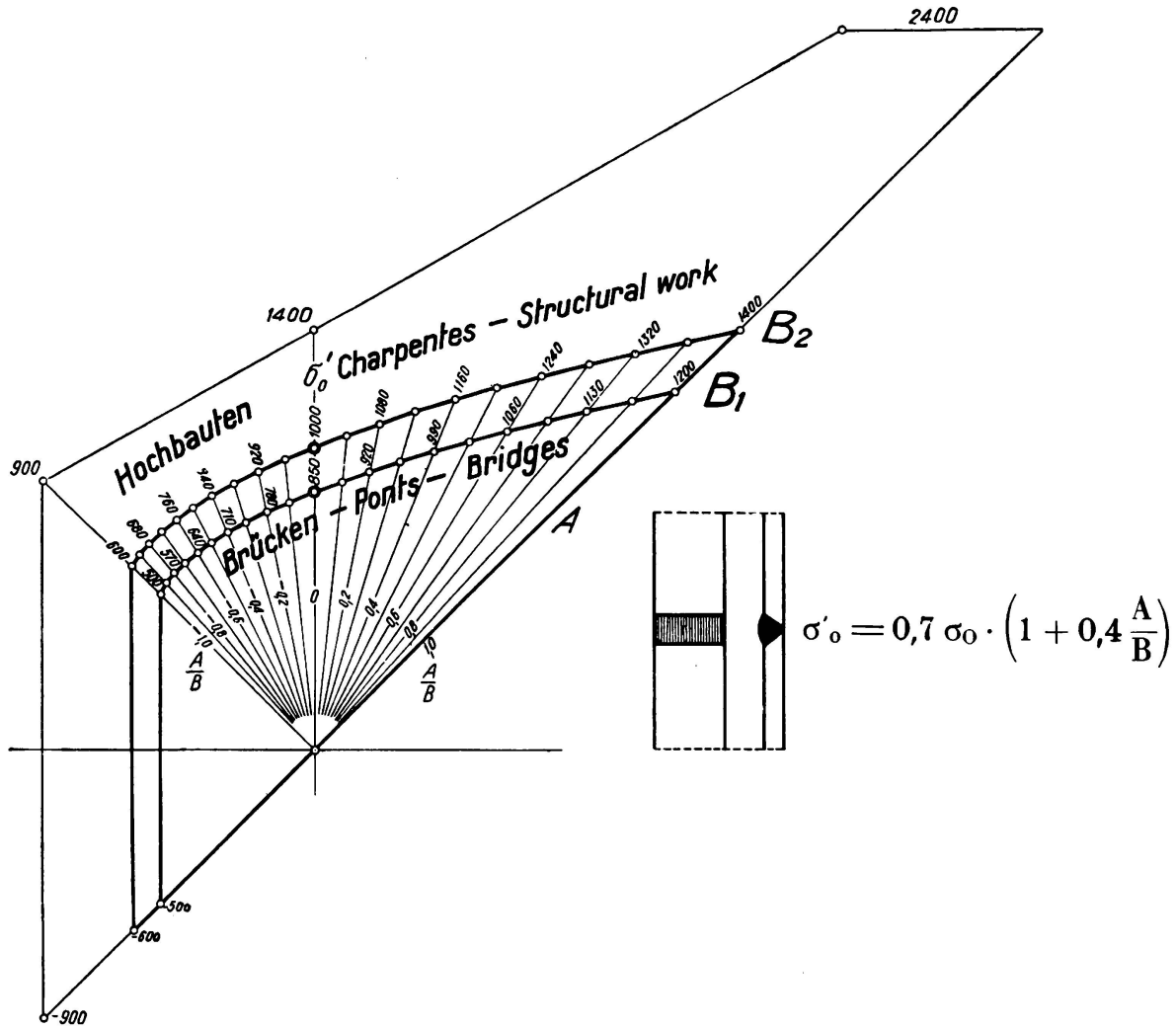


Fig. 16.

Stumpfnaht. Zulässige Spannungen.

den Gurtungen von auf Biegung beanspruchten geschweißten Trägern) liegen zurzeit nicht vor. Versuche zur Abklärung der Größe des Einflusses der entlastenden Wirkung des an die Schweißung angrenzenden Stahlmaterials sind unumgänglich.

Einbrandzone.

Fall 5 und 6. — Stumpfnaht.

Sieht man von dem verhältnismäßig geringen Unterschied von $\alpha_1 = 0{,}8$ statt $\alpha_1 = 0{,}7$ ab, so können die für die Stumpfnaht selbst gültigen Beziehungen benutzt werden. — Fall 1 und 2, Fig. 19 —.

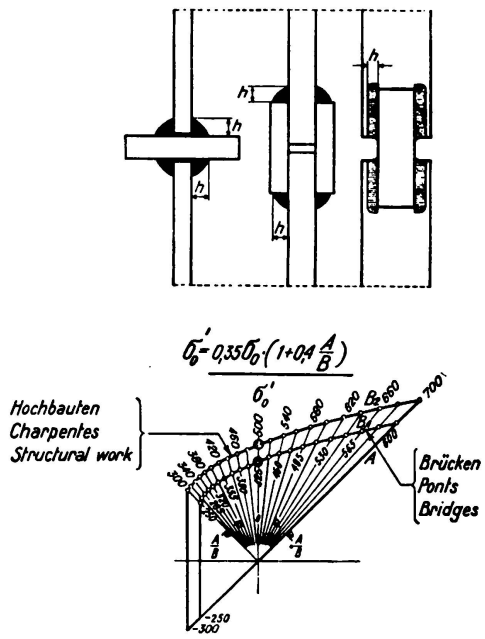


Fig. 17.

Kehl-. Flanken- und Stirnnähte.
Zulässige Spannungen.

Fall 7. — Kehlnaht.

Für σ_1 und σ_2 beide Zug- oder Druckspannungen gilt

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{\alpha_1}\right)^2 + \gamma \cdot \tau^2} \leqq \sigma_{o\,zul} \tag{8}$$

und

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\sigma_2}{\alpha_1}\right)^2 + \gamma \cdot \tau^2} \leqq \sigma_{o\,zul} \tag{9}$$

(Fig. 21)

Fall 8. — Kehlnaht.

σ_1 und σ_2 sind entgegengesetzten Vorzeichens, es gilt

$$\sigma_g = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{\alpha_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\alpha_2}\right)^2 + \gamma\left(\frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\alpha_1 \cdot \alpha_2}\right) + \gamma \cdot \tau^2} \leqq \sigma_{o\,zul} \tag{10}$$

(Fig. 21)

Es betragen für

	Zug	Druck	
$\alpha_1 =$	0,6	0,9	— Zusammenstellung 7 —
$\alpha_2 =$	0,85	1,0	
$\beta =$	$^1/_3$		
$\gamma =$	3,5		

Die Vorteile des Berechnungsverfahrens der E.M.P.A. seien an einigen Beispielen dargelegt:

Schräg verlaufende Stumpfnaht — Hauptspannung σ_1, einachsig.

Die praktisch günstigste Lage der Naht verläuft unter 45° gegen die Kraftwirkung. Es ist

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \tau = \frac{\sigma_e}{2}$$

somit entsprechend Gleichung (5)

$$\sigma_e \sqrt{\left(\frac{0{,}5}{0{,}7}\right)^2 + 3 \cdot 0{,}5^2} = 1{,}12\, \sigma_e \leqq \sigma_{o\,zul}$$

$$\sigma_e = 0{,}89\, \sigma_{o\,zul}$$

Vorteil gegenüber winkelrecht verlaufendem stumpfen Stoß: $\frac{0{,}89}{0{,}70} \cong 1{,}27$ rund 27 %. Die Gewinne betragen

für Naht unter	30°	45°	60°
Gewinn	8 %	28 %	23 %.

gegen Winkelrechte zur Kraftrichtung

Schräg angeordnete Kehlnaht — Hauptspannung $\frac{P}{h}$, einachsig.

Die praktisch günstigste Richtung der Naht folgt unter einem Winkel von 60° gegen die Winkelrechte zur Kraftrichtung von P (P auf die Einheit der Breite bezogen).

Es ist

$$\sigma_h = \frac{P}{h} - \sigma_1 = 0{,}25\, \sigma_h - \tau = 0{,}433\, \sigma_h - \alpha_1 = 0{,}35$$

$$h = \text{Nahthöhe.}$$

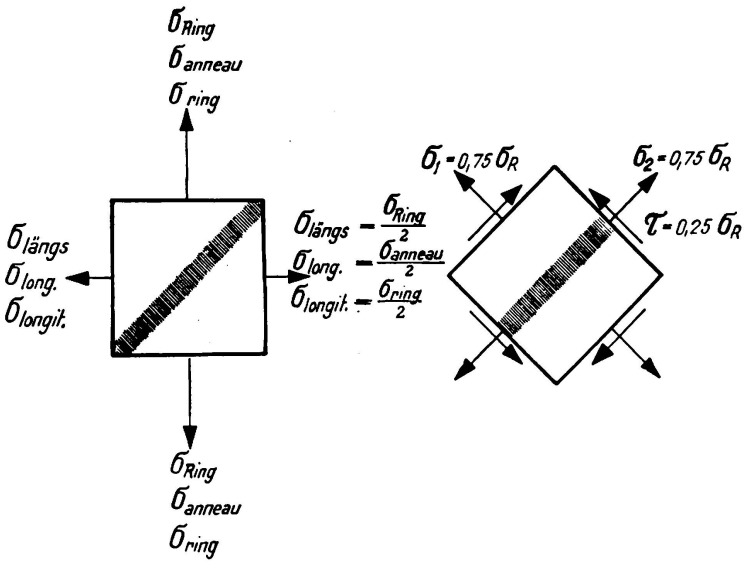


Fig. 18.

Spiralnaht. Spannungszustand.

Aus der Gleichung (5) (Fig. 20) folgt

$$\sigma_h \cdot \sqrt{\left(\frac{0{,}25}{0{,}35}\right)^2 + 6 \cdot 0{,}433^2} = 1{,}28\ \sigma_h \leqq \sigma_{o\,zul}$$

$$\sigma_h \leqq 0{,}78\ \sigma_{o\,zul} - P_{zul} = 0{,}78\ \sigma_{o\,zul} \cdot h$$

gegenüber $P_{zul} = 0{,}35\,\sigma_{o\,zul} \cdot h$ für eine winkelrecht zur Kraftrichtung angeordnete Kehlnaht ergibt sich ein Gewinn von über 100 %.

Schraubenförmige Naht von Behältern, Kesseln und Druckrohren.

Der Spannungszustand der zweiachsig beanspruchten Naht (die dritte Hauptspannung gleich dem Innendruck für das Element der Innenwandung darf ihrer Geringfügigkeit wegen vernachlässigt werden) ist in der Fig. 18 dargestellt. Die Anwendung der Beziehung nach Gleichung (5) ergibt

$$\left(\frac{\sigma_1}{0{,}7}\right)^2 + 3\,\tau^2 \leqq \sigma_{o\,zul}$$

$$\left(\frac{0{,}75\ \sigma_{Ring}}{0{,}70}\right)^2 + 3 \cdot (0{,}25\ \sigma_{Ring})^2 = 1{,}15\ \sigma_{Ring} \leqq \sigma_o$$

woraus

$$\sigma_{Ring\,zul} = 0{,}87\ \sigma_{o\,zul}$$

Gegenüber einer der Zylinderachse parallel verlaufenden Längsnaht, mit $\sigma_{Ring\,zul} = 0{,}7\,\sigma_{o\,zul}$ ergibt sich ein Gewinn von $\frac{0{,}87}{0{,}70} = 1{,}25$, somit von 25 %. Für im Ofen spannungsfrei geglühte Stumpfnähte[10] kann die zulässige Ringspannung $\sigma_{Ring\,zul} = 0{,}8\ \sigma_{o\,zul}$ gesetzt werden, so daß als Ganzes geglühte schraubenförmig geschweißte Gefäße nahtlosen an Festigkeit ($\sigma_{o\,zul}$ für Nietung zugrunde gelegt) gleich werden.[11]

Durch geeignete Anordnung und Ausbildung der Schweißnähte lassen sich ganz bedeutende Vorteile zugunsten der geschweißten Bauweise erzielen.

Für *mehrachsige Beanspruchungen auf Wechselfestigkeit* (Ermüdung), für das ganze Gebiet von der Schwingungsfestigkeit bis zur Fließgrenze, können die zulässigen Anstrengungen (Vergleichsspannungen) für Stumpfnähte, Kehlnähte und die Einbrandzonen entsprechend den Angaben der Zusammenstellung 3 angesetzt werden (Fig. 15, 16 und 17), wobei den Beziehungen, durch die Gleichungen (2) bis (10) ausgedrückt, (Fig. 19, 20 und 21) Rechnung zu tragen ist.

VI. Erfahrungen.

Die ältesten Erfahrungen weist der *Behälterbau* auf; sie haben bei sachgemäßer Ausführung und richtiger konstruktiver Durchbildung den Erwartungen vollauf entsprochen.

Die etwas jüngeren Erfahrungen im *Druckrohrbau* haben, von einigen Mißerfolgen abgesehen, befriedigt.

---

[10] Das spannungsfreie Glühen von Kehlnähten verbessert die Festigkeit der Einbrandzone, nicht aber die Kehlnaht selbst.

[11] Für gänzlich nahtlose Behälter liegt die Ermüdungsfestigkeit höher als für genietete, so daß nahtlos erstellte Behälter spiralgeschweißten überlegen sind.

Der Druckrohrbau ist in letzter Zeit zur Schweißung *höher gekohlter Stähle* und großer Wanddicken übergegangen; ausreichende Erfahrungen liegen noch nicht vor; metallurgisch sachgemäße Behandlung und konstruktiv richtige Durchbildung vorausgesetzt, verspricht sie vollen Erfolg.

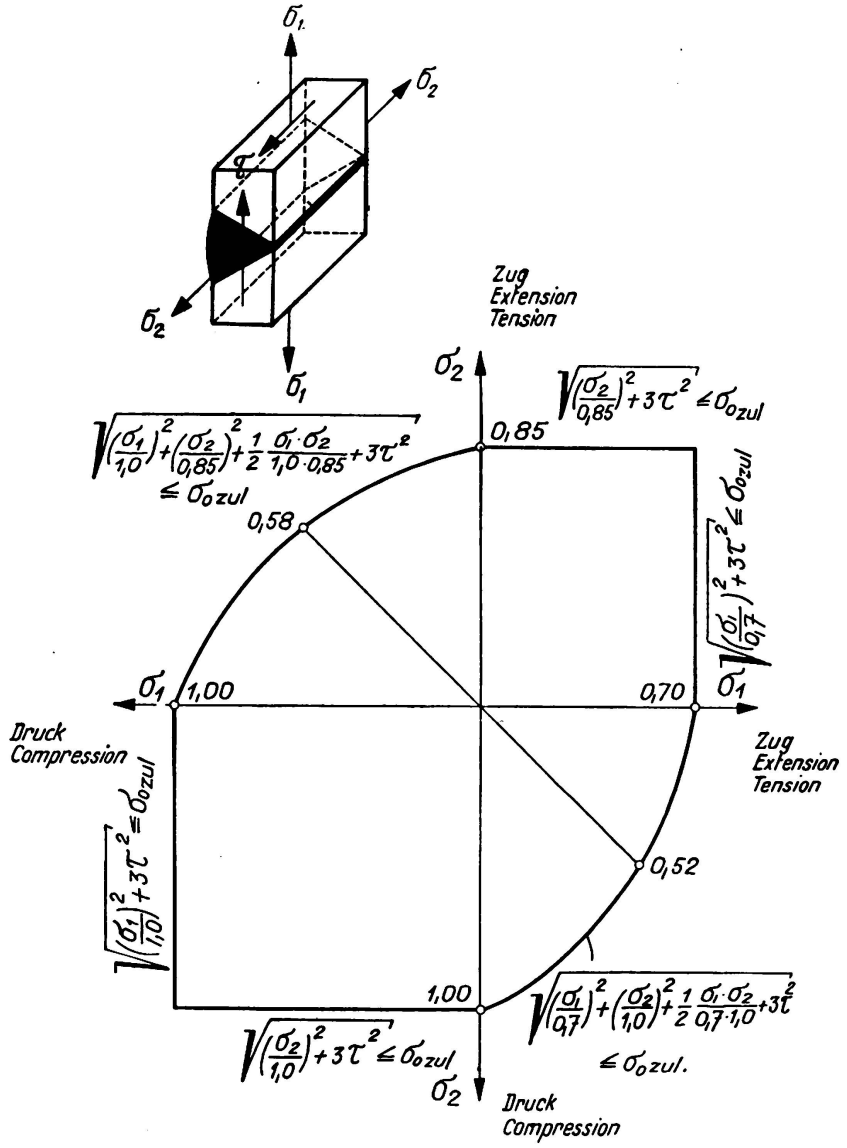


Fig. 19.

Stumpfnähte, zweiachsig beansprucht. Zulässige Grenzspannungszustände.

Mit der Schweißung hochgekohlter und legierter Stähle sind Erfolge und Mißerfolge zu verzeichnen. Die Ermüdungsfestigkeit höher gekohlter, hochgekohlter und legierter Stähle ist bei geringer Vorspannung nicht wesentlich oder überhaupt nicht höher als diejenige des weichen, normalen Konstruktionsstahles. Erst für größere Vorspannungen steigt die Ermüdungsfestigkeit stärker als bei normalem Konstruktionsstahl an, sodaß erst dann die Vorteile hochwertiger Stähle in den Vordergrund rücken.

Bei der Wahl hochwertiger, für geschweißte Konstruktionen geeigneter Stähle ist größte Vorsicht geboten; Sondermaßnahmen sind zu treffen.

Sachgemäß erzeugter, materialtechnisch einwandfreier *Thomasstahl* läßt sich ebenso gut schweißen wie vorschriftsgemäßer *Siemens-Martin-Stahl;* die Schweißungen sind sich in Bezug auf Festigkeit und Verformung praktisch ebenbürtig.

Der *Hochbau* ist im Begriffe, in Bezug auf die Ausbildung konstruktiver Details, sich den Eigenheiten des Schweißens, den Festigkeitseigenschaften und dem Verformungsvermögen der Schweißungen anzupassen.

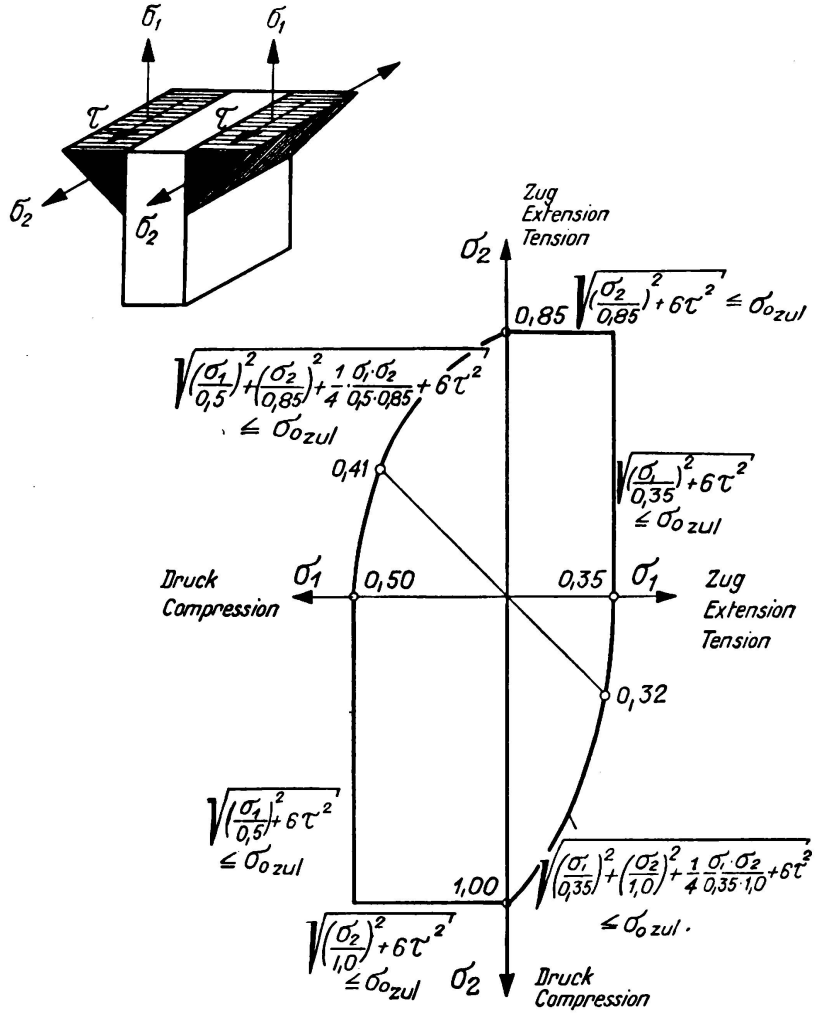


Fig. 20.

Kehl-, Flanken- und Stirnnähte, zweiachsig beansprucht. Zulässige Grenzspannungszustände.

Der *Brückenbau* steckt in den Anfängen; namentlich bei Fachwerkbrücken ist Vorsicht gerechtfertigt. Bei den geschweißten Vollwandkonstruktionen (Balken, Rahmen, Bögen) liegen die Verhältnisse günstiger.

Bei geschweißten Fachwerkkonstruktionen sind die Stabanschlüsse konstruktiv noch nicht gelöst; die Knotenpunkte weisen geringere Nachgiebigkeit (Spannungsausgleich) auf als bei genieteten Fachwerkträgern. Höhere Nebenspannungen zufolge geringerer Nachgiebigkeit der Knotenpunktverbindungen, stärkere örtliche Spannungsanhäufungen infolge plötzlicher Kraftübertragungen und unberechenbar hohe zusätzliche Spannungen, durch thermische Einflüsse beim Schweißen

(Schrumpfungen) verursacht, geben oft zu vorzeitigen Ermüdungserscheinungen (Anrisse, Brüche) Veranlassung.

Der Verwendung nicht zu dicker Elektroden und Ausführung nicht zu starker Einzellagen ist zufolge durchgreifenderer Vergütung gegenüber dicken Elektroden und dicken Lagen der Vorzug einzuräumen, weil beim raschen Abkühlen aus der Schmelze das sprödere Gußgefüge (Widmannstätten'sche Struktur) entsteht. Dieses kann nur durch Glühung über die obere Umwandlungstemperatur beseitigt werden, was bei den inneren Lagen der Fall ist, dagegen bei der äußeren erst durch das Nachglühen mit dem Brenner oder im Ofen erfolgen kann.

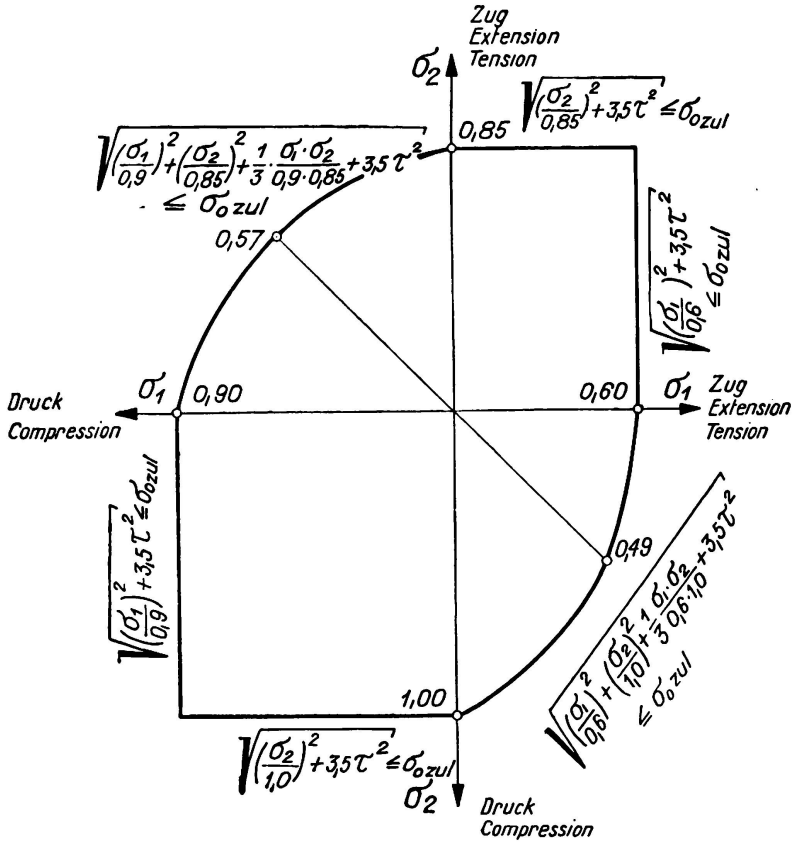


Fig. 21.

Einbrandzone der Kehl-, Flanken- und Stirnnähte, zweiachsig beansprucht. Zulässige Grenzspannungszustände.

Innere Spannungen bedrohen geschweißte Konstruktionen nur dann, wenn durch das Schweißen, zufolge ungeeigneten Vorganges bei der Ausführung der Schweißung beim Zusammenbau oder sehr großer Steifigkeit (Unnachgiebigkeit) der Werkstücke oder deren Konstruktionsteile, feine Risse entstehen oder wenn die inneren Spannungen außerordentlich hoch werden.

Wenn es die Herstellungs- und Konstruktionsart sowie Ausführung erlauben, ist ein Ausglühen der Schweißnähte mit dem Schweißbrenner über die obere Umwandlungstemperatur mit nachfolgendem Glühen des ganzen Stückes bis angemessen unter die untere Umwandlungstemperatur dringend zu empfehlen, um einerseits die zu rasch erkalteten, spröden äußersten Schweiß-Schichten zu nor-

malisieren und dadurch verformungsfähiger zu gestalten und anderseits um innere Spannungen zu beseitigen, bzw. zu mildern. Spannungsfreies Glühen ist überall, wo möglich, dringend zu empfehlen.

Als Ursachen der bisherigen *Mißerfolge* werden erkannt:

die Verwendung ungeeigneter, hochgekohlter, verunreinigter Stähle mit verwalzten Gasblasen (Strohstruktur, Doppelungen usw.);

deren unrichtige mechanische Verarbeitung — gewaltsames Strecken und Kaltbiegen steifer Profile;

ungeeignete thermische Behandlung — Unterlassung des Vorwärmens, Glühen kalt verstreckter Stähle im Rekristallisationsgebiet;

die Verwendung nicht genügend reduzierender Flamme und ungeeigneter, nicht schützender und nicht reduzierender Elektroden;

unsachgemäße konstruktive Behandlung — Ausklinkungen mit dem Schweißbrenner (Oxygen-Acetylen), plötzliche Querschnittsübergänge, Spannungsanhäufungen — und

zu hohe, wirklich auftretende Ermüdungsbeanspruchungen.

Zusammenfassung.

Auf Grundlage der in der Eidg. Materialprüfungsanstalt in Zürich in den Jahren 1927—1935 durchgeführten statischen und Ermüdungsversuche mit geschweißten Verbindungen wurden in die neue Eidg. Verordnung über die Berechnung, die Ausführung und den Unterhalt der der Aufsicht des Bundes unterstellten Bauten aus Stahl Bestimmungen die *Festigkeits- und Verformungsgüte* (statische Zugfestigkeit und Biegezahl) sowie die *zulässigen Spannungen* betreffend aufgenommen.

Die zulässigen Spannungen stützen sich auf die Ergebnisse der Ermüdungsfestigkeiten, welche die technische Güte von Schweißnähten viel ausgeprägter und richtiger charakterisieren als die statischen Festigkeiten.

Der für Schweißverbindungen gewählte *Sicherheitsgrad* ist praktisch von gleicher Größenordnung wie für genietete Verbindungen.

Das für ein- sowie mehrachsige Beanspruchungen angegebene, auf der Gestaltänderungshypothese beruhende *Berechnungsverfahren der E.M.P.A.*, welches den Festigkeitsverhältnissen der Schweißnähte zur Nietverbindung Rechnung trägt, ist geeignet, die weitere Entwicklung sachgemäß geschweißter Verbindungen und richtiger Anschlußformen zu fördern.

Die Erkenntnisse der *festigkeitstechnischen Forschung* und der *Erfahrung* haben sich äußerst fruchtbringend ausgewirkt auf die Entwicklung der Elektroden sowie für die Schweißung geeigneter hochwertiger Stähle, die Gesamtanordnung und konstruktive Durchbildung der Einzelheiten, die Ausführungsmaßnahmen, die Berechnungsweise und die Kontrolle fertig geschweißter Bauwerke.

Leere Seite
Blank page
Page vide

IIIa3

Einfluß der Gestalt der Schweißverbindung auf ihre Widerstandsfähigkeit.

Influence de la forme des assemblages soudés sur leur résistance.

Influence of the Form of Welded Connections to Strength and Resistance.

O. Graf,
Professor an der Technischen Hochschule, Stuttgart.

Die Auffassungen über die zweckmäßige Gestaltung der Schweißverbindungen, insbesondere der Verbindungen, die vornehmlich oftmals wiederkehrende Anstrengungen erfahren, sind in allen beteiligten Ländern seit 1931 weitgehend geändert worden. Damit ist auch die Gestaltung geschweißter Bauwerke, ihre bauliche Durchbildung und ihre Herstellung wesentlich beeinflußt worden. Bis zu der genannten Zeit hatte man die Erkenntnisse und Erfahrungen über die Dauerfestigkeit von Konstruktionselementen[1] in den Vorschriften unbeachtet gelassen. Als 1931 mit einigen Versuchen gezeigt wurde,[2] daß die damaligen Gepflogenheiten zur Herstellung von Schweißverbindungen für Maschinen, Brücken oft nicht oder nur beschränkt beibehalten werden dürfen, trat im Gebiet der Schweißtechnik die Aufgabe in den Vordergrund, dem entwerfenden und überwachenden Ingenieur die Grundlagen zu liefern, die ihn instandsetzen, schweißgerecht zu konstruieren und Bauwerke zu schaffen, die zweckmäßig bemessen sind und die sachgemäß hergestellt werden können.

Die Fragen, die uns hierbei begegneten und noch begegnen, sind etwa folgende:

1. Wie soll die Schweißnaht an sich beschaffen sein, wenn sie in Stumpfnähten, in Stirnkehlnähten, in Flankenkehlnähten oftmals wiederkehrenden Anstrengungen oder wenn sie ruhenden Anstrengungen bis an die Grenze des zur Zeit Möglichen ausgesetzt werden soll?
2. Welche Art der Schweißverbindungen (Stumpfnaht, Flankenkehlnaht usw.) ist besonders geeignet zur Aufnahme von oftmals wiederkehrenden Belastungen (Zug, Druck, Zug und Druck wechselnd, Biegung, Scherung usw.)?

---

[1] Vgl. dazu *Graf:* Die Dauerfestigkeit der Werkstoffe und der Konstruktionselemente, Verlag Julius Springer, Berlin 1929.

[2] Vgl. u. a. *Graf:* Dauerfestigkeit von Stählen mit Walzhaut, ohne und mit Bohrung, von Niet- und Schweißverbindungen, VDI.-Verlag, Berlin 1931.

3. Wie sind die Erkenntnisse nach 1. und 2. bei der Gestaltung der Bauelemente anzuwenden, u. a. beim Anschluß von Zugstäben, beim Stoß von Trägern, bei der Verstärkung von Trägern durch Gurtlaschen, beim Anschluß von Querträgern an Hauptträger usw.?
4. Welche Bedeutung haben die beim Schweißen und nach dem Schweißen entstehenden Spannungen?

Die Fragen lassen sich nach den heutigen Erkenntnissen wohl grundsätzlich beantworten; im einzelnen ist manche Teilfrage, die den entwerfenden und den überwachenden Ingenieur oft beschäftigt, noch nicht soweit behandelt, daß die Anwendung der Erkenntnisse ohne weiteres möglich ist.

a) Zur ersten Frage sei folgendes bemerkt. Aus vielen älteren Dauerversuchen war bekannt, daß Bauelemente, die oftmals wiederkehrende Lasten tragen sollen, mit allmählichen Querschnittsübergängen zu versehen sind, damit Spannungsschwellen tunlichst vermieden werden. Dementsprechend mußte erwartet werden,

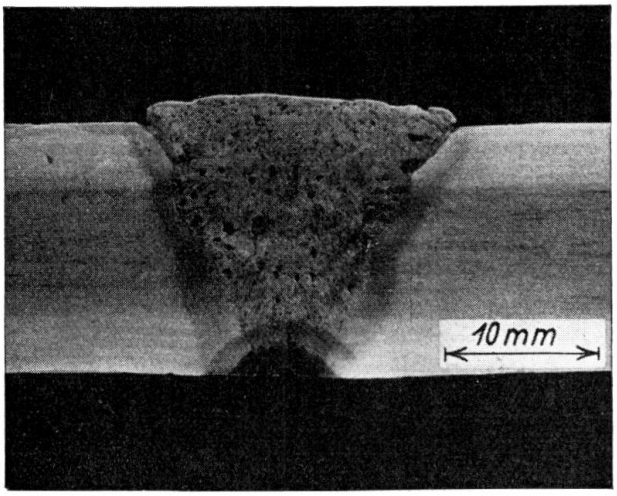


Fig. 1.

daß Stumpfnähte, die auf Zug oder Druck belastet werden, geringwertig ausfallen, wenn sie gemäß Fig. 1 Randkerben aufweisen oder Kerben in der Wurzel der Schweißnaht haben oder Bindefehler enthalten. Der Versuch zeigt selbstverständlich, daß diese Auffassung richtig ist und daß demgemäß porenarme Nähte mit nachgeschweißter Wurzel und mit allmählich anlaufenden Schweißnähten viel höhere Dauerfestigkeiten liefern als Nähte nach Fig. 1.

Bei Kehlnähten war der Einfluß der Nahtform ebenso festzustellen. Nähte nach Fig. 2 sind geringwertig, Nähte nach Fig. 3 hochwertig.[3]

Hieraus entstand die Forderung, daß die Herstellung von hochbeanspruchten Schweißverbindungen von einer Eignungsprüfung der beteiligten Schweißer und der in Aussicht genommenen Werkstoffe abhängig zu machen ist. Die Handwerker müssen die sachgemäße Herstellung der Schweißnähte beherrschen. Für den *verwendeten Werkstoff, für die Elektroden und für den Baustoff — namentlich für Baustoffe hoher Festigkeit — muß von unabhängiger Stelle nachgewiesen sein, daß eine innerlich und äußerlich gute Schweißnaht hergestellt*

[3] Vgl. u. a. *Graf:* „Der Stahlbau" 1933, S. 81 u. f., auch Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1934, S. 1423 u. f.

werden kann, auch muß vom Lieferer eindeutig angegeben werden, wie der Werkstoff aufgebaut sein soll, wie mit der Elektrode verfahren werden muß oder darf, wenn man die gute Schweißnaht verbürgen will und muß.

Wer die Gewährleistung übernehmen soll, daß hochbeanspruchte Schweißnähte genügend tragfähig sind, muß Hilfsmittel haben, welche die Güte der Schweißung erkennen lassen; er kann nur auf Grund fortlaufender Feststellungen an fertigen Schweißungen beurteilen, wer gute Schweißungen zuverlässig ausführen kann; er muß finden, ob bei den ausführenden Männern die Verantwortung voll getragen wird, die zu solchen Arbeiten gehört.

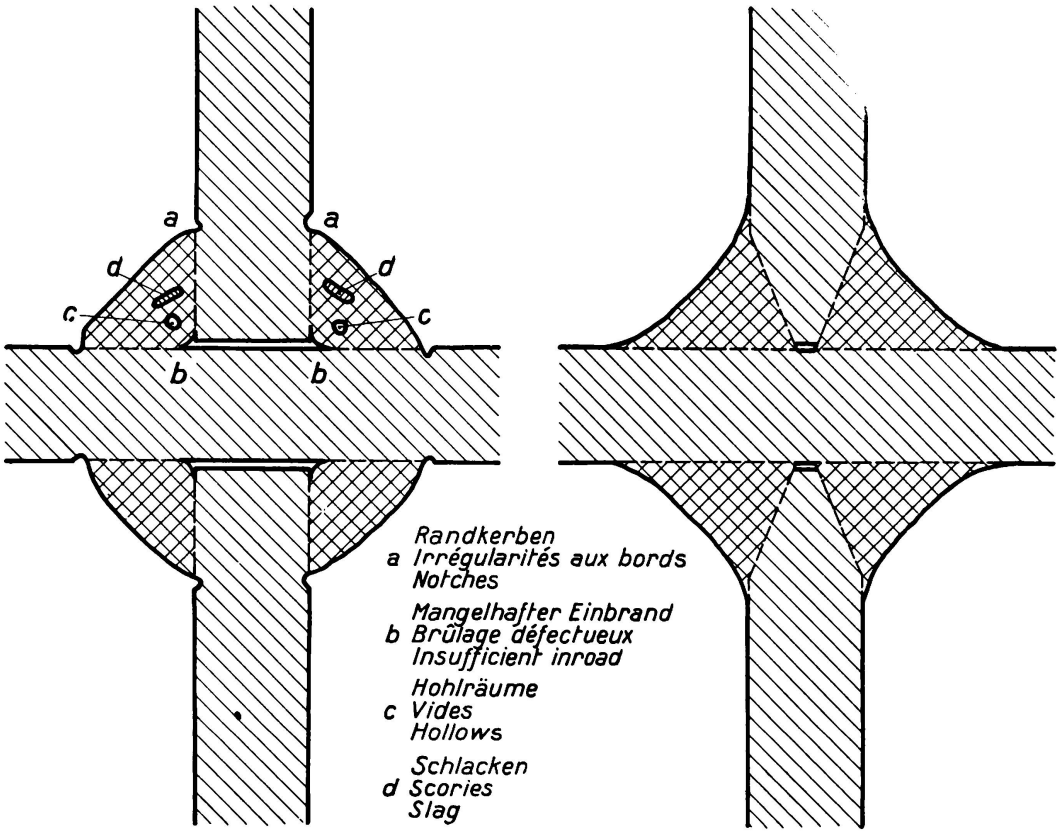


Fig. 2. Fig. 3.

Die Hilfsmittel zur Prüfung der Güte der Schweißnähte sind wesentlich verbessert worden. Die Geräte zur Durchstrahlung der Schweißverbindungen sind leistungsfähiger und billiger geworden. Damit ist es möglich geworden, für hochbeanspruchte wichtige Stumpfnähte zu verlangen, daß sie vor der Ablieferung durchstrahlt werden.[4]

b) Zur zweiten Frage — *welche Art der Verbindung ist unter den mannigfaltigen praktischen Verhältnissen zu bevorzugen?* — sind umfassendere Feststellungen als zur ersten Frage gemacht worden, weil die Entwicklung der Grundlagen für die Konstruktion der geschweißten Bauwerke dringlicher erschien.

Früher und auch jetzt noch macht man nicht selten aufmerksam, daß die Widerstandsfähigkeit bei Zugbelastung bei Verbindungen mit Flankenkehlnähten

[4] Vgl. Vorläufige Vorschriften für geschweißte, vollwandige Eisenbahnbrücken, Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft, Berlin 1935, S. 11 und 13.

durch Schweißfehler weit weniger betroffen wird als die Tragkraft von Stumpfnähten. Auch sei die Zurichtung bei Flankenkehlnahtverbindungen einfacher als bei Stumpfnähten. Aus diesen Feststellungen heraus ist früher der Flankenkehlnahtverbindung wohl allgemein der Vorzug gegeben worden. Dazu muß hervorgehoben werden, daß sachgemäß hergestellte gute Stumpfnähte gegenüber oftmals wiederkehrenden Lasten bedeutend tragfähiger sind als Verbindungen mit Flankenkehlnähten, weil am Beginn der Flankenkehlnähte immer große Span-

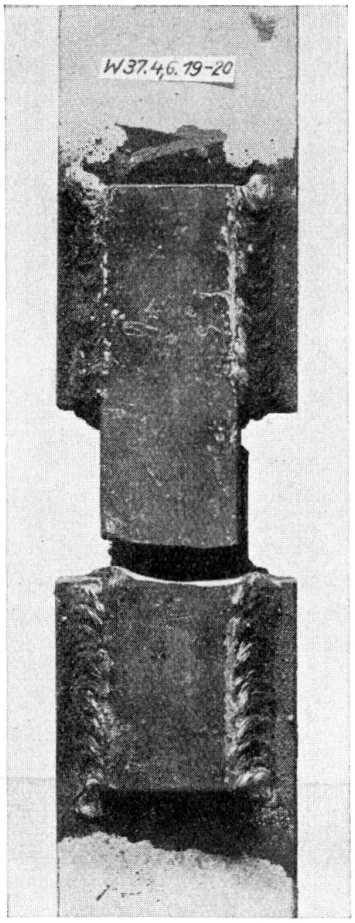


Fig. 4.
Verbindung mit Flankenkehlnähten nach dem Dauerversuch.

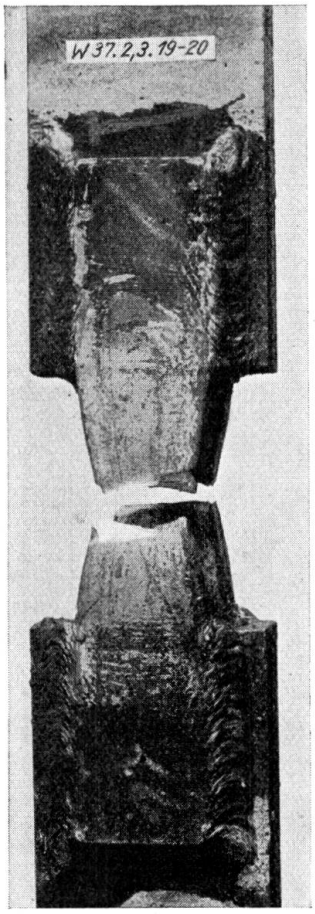


Fig. 5.
Verbindung mit Flankenkehlnähten nach dem Zerreißversuch (Abmessungen vor dem Versuch wie bei Fig. 4).

nungsschwellen auftreten, jedenfalls viel größere als in Stumpfnähten.[5] Der Bruch erfolgt demgemäß beim Dauerversuch mit Ursprungsbelastung nach Fig. 4; der Vergleich mit Fig. 5, gültig für den einfachen Zerreißversuch an einem gleichen Stück und anwendbar für die Erkundung des Widerstands gegen ruhende Lasten erinnert, daß der Zerreißversuch über die Bedeutung der Spannungsschwellen keine Auskunft gibt. Fig. 4 und 5 machen aufmerksam, daß die *Verbindung mit Flankenkehlnähten bei der Aufnahme ruhender Lasten bevorzugt angewandt werden kann, nicht aber bei der Aufnahme bewegter Lasten.*

[5] Vgl. u. a. „Stahlbau" 1933, S. 81 u. f.

Weiter ist zu beachten, daß die Herstellung guter Stumpfnähte durch die Entwicklung der Schweißumformer, durch Bereitstellen geeigneter Elektroden, durch die tiefergehende Schulung der Handwerker und Ingenieure, durch die Fortschritte der Prüftechnik u. a. m. so verbessert worden ist, daß die Herstellung guter Stumpfnähte in gut geleiteten Werkstätten jetzt verbürgt werden kann.

Mit dieser grundsätzlichen Auseinandersetzung über die Geeignetheit der Art der Verbindung und über das zweckmäßige Gebiet der Anwendung der einzelnen Arten mußte untersucht werden, ob die Widerstandsfähigkeit der Verbindungen gegen oftmals wiederholte Zugbelastungen durch die Ermittlung der Ursprungszugfestigkeit allgemein geltend bestimmt ist. Es ist demgemäß verfolgt worden, ob beim oftmaligen Wechsel zwischen gleich großen Zug- und Druckkräften, auch ob bei gleichzeitiger Wirkung von ruhenden und von oftmals wiederkehrenden Zuglasten die Schwingungsweite, welche ertragen wird, gleich oder annähernd gleich der Ursprungszugfestigkeit ist. Viele Versuche[6] zeigten, daß die Ursprungszugfestigkeit für den praktischen Bereich die ertragbare Schwingungsweite hinreichend angibt. Damit entstand der Vorschlag,[7] für die Bemessung der geschweißten Verbindungen folgende einfache Richtlinien anzuwenden:

a) Gegenüber ruhenden Lasten und gegenüber der Gesamtbelastung ist die Streckgrenze des Werkstoffs maßgebend.
b) Für bewegte Lasten ist die Schwingungsweite entscheidend, die bei oftmals wiederkehrenden Lasten ertragen und die der Einfachheit halber bei Ursprungsbelastung[8] ermittelt werden kann.

Fig. 6 zeigt als Beispiel die Ergebnisse der Prüfung einer Stumpfschweißung. Die Widerstandsfähigkeit gegen die ruhende Last und gegen die Gesamtlast ist durch die Zugfestigkeit und durch die Streckgrenze begrenzt. Die Schwingungsweite, die bei oftmals wiederkehrender Last ertragen wird, ist bei der Ursprungsbelastung zu $S = 14{,}5$ kg/mm², bei der Streckgrenze zu $S = 13{,}1$ kg/mm² ermittelt worden.

Man kann demnach die zulässige Spannung für die ruhende Last und für die Gesamtlast und unabhängig davon die zulässige Spannung für die oftmals wiederkehrende Last wählen. Wird beispielsweise die zulässige Spannung zum 0,8fachen der ermittelten Widerstandsfähigkeit festgesetzt, so würden im Falle der Fig. 6 die zulässigen Spannungen betragen:

a) für ruhende Lasten und für die Gesamtlasten $37{,}8 \cdot 0{,}8 =$ rd. 30 kg/mm² und
b) gegen oftmals wiederkehrende Lasten $14{,}5 \cdot 0{,}8 =$ rd. 11 kg/mm².

Die zulässige Höchstspannung wäre also 30 kg/mm². Von dieser Höchstspannung dürften 11 kg/mm² durch bewegte Lasten hervorgerufen werden.

Hiernach wäre für den entwerfenden Ingenieur eine einfache Tafel aufzustellen, welche zunächst die zulässigen Zuganstrengungen gegenüber bewegten Lasten und dann die Höchstbeanspruchungen durch ruhende und bewegte Zuglasten zusammen angibt. Für die höchste Anstrengung durch ruhende Lasten

[6] Vgl. u. a. „Stahlbau" 1933, S. 92 u. f.. „Stahlbau" 1935, S. 164 u. f.
[7] Vgl. „Stahl und Eisen" 1933, S. 1218 u. f.
[8] Hier ist wie in der folgenden Erörterung die Ursprungsbelastung verstanden, welche bei 2 Millionen Lastspielen eben noch getragen wird.

ist die Stahlsorte maßgebend; die Art der Verbindung kann dabei außer Betracht bleiben, wenn für ihre Ausführung gewisse Mindestbedingungen erfüllt werden. Für die Begrenzung der zulässigen Anstrengungen durch oftmals wiederkehrende Lasten ist vor allem eine Abstufung nach der Art der Verbindung nötig (Stumpfnähte, Flankenkehlnähte, Stirnkehlnähte).

Noch einfacher liegen die Verhältnisse bei Verbindungen, die auf *Druck* beansprucht sind. Hier ist es eine Selbstverständlichkeit, daß die Stumpfnaht für die Aufnahme von Druckkräften allgemein zu bevorzugen ist. Es ist in der

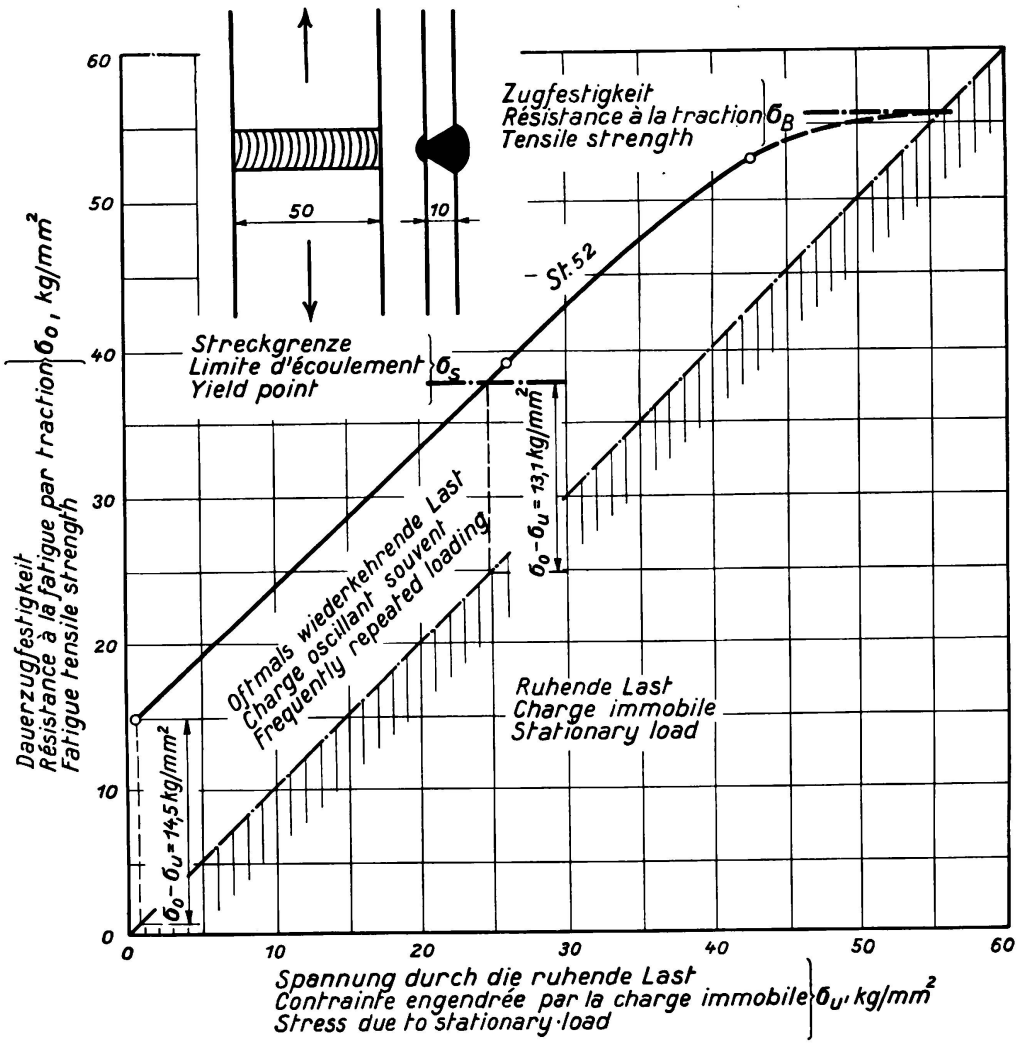


Fig. 6.

Regel nicht schwierig, Stumpfnähte herzustellen, welche die Übertragung von ruhenden Druckkräften in gleichem Maße wie bei ungestoßenen Stücken ermöglichen. Handelt es sich um die Aufnahme von oftmals wiederkehrenden Druckkräften, so ist zu beachten, daß an unstetigen Querschnittsänderungen, also u. a. an Randkerben der Stumpfnähte, an Kerben in der Wurzel solcher Nähte, Spannungsschwellen auftreten,[9] die an der oberen Lastgrenze zu örtlichen bleibenden Verformungen führen, wodurch beim Entlasten Zuganstrengungen

[9] Vgl. „Stahl und Eisen" 1933, S. 1219.

im Kerbgrund hervorgerufen werden. Deshalb entstehen in rohen Stumpfnähten unter oftmals wiederholten Drucklasten Querrisse ebenso wie unter oftmals wiederkehrenden Zuglasten, allerdings unter weit höheren Gesamtanstrengungen.[10] Man kann annehmen, daß die Ursprungsdruckfestigkeit von Stumpfnähten ordentlicher Ausführung bei St. 37 etwa an der Quetschgrenze liegt; deshalb kann man die zulässige Druckanstrengung von Stücken aus St. 37 ohne und mit Stumpfnähten in den heute üblichen Grenzen gleich groß wählen.

Weitere Beobachtungen führten schließlich zu der Auffassung, daß die Ergebnisse der Zug- und Druckversuche auch für die Zug- bzw. Druckzone von Profilträgern gelten.[11]

Weiter mußte untersucht werden, wie die Flankenkehlnähte und die Stirnkehlnähte zu bemessen sind, wenn die Kräfte als Scherkräfte wirken. Bei Verbindungen mit Flankenkehlnähten nach Fig. 4, die mit verschiedener Nahtlänge durch oftmals wiederkehrende Zugkräfte beansprucht worden sind, war die Ursprungsscherfestigkeit zu mindestens 10 kg/mm² abzuschätzen.[12]

Bei Belastung der mit Flankenkehlnähten angeschlossenen Stäbe durch oftmals wiederkehrende Druckkräfte ist die Ursprungsfestigkeit bis rund 12 kg/mm² ermittelt worden.

Wenn man die Nähte der Flankenkehlnahtverbindungen auf Grund dieser Feststellungen bemessen würde, käme man zu kleineren Nähten als sie heute verlangt werden. Dieses Ergebnis kann bei oftmals belasteten Verbindungen nicht ohne weiteres angewandt werden, weil die Abmessungen der Nähte die Spannungsschwelle am Nahtanfang beeinflußen. Deshalb ist bis auf weiteres eine Begrenzung des Verhältnisses der Scherspannung der Naht zur Anstrengung des angeschlossenen Stabes angezeigt. Bei Stücken nach Fig. 4 hat die Ursprungszugfestigkeit mit Abnahme von $\rho : \sigma$ zugenommen; mit $\rho : \sigma = 0{,}5$ war der Höchstwert der Ursprungszugfestigkeit annähernd erreicht.[13]

c) Zur dritten Frage, welche die Anwendung der grundlegenden Feststellungen auf die jeweils vorliegende Einzelaufgabe betrifft, ist die Antwort nur schrittweise zu erringen, weil die konstruktive Gestaltung der Verbindung technische und wirtschaftliche Grenzen hat.

Bei der Anwendung von Verbindungen mit Flankenkehlnähten muß man sich zur Zeit entweder damit abfinden, daß diese Verbindungen für die Aufnahme oftmals wiederkehrender Lasten weniger geeignet sind und daß ihre zulässige Beanspruchung entsprechend kleiner zu wählen ist als mit Stumpfnähten, oder man sucht durch Wahl geeigneten Werkstoffs oder durch bauliche Änderung der Verbindung die Spannungsschwellen zu mindern. Man hat u. a. versucht, durch eine besondere Form der Schweißnaht und durch verschiedene Verteilung des Schweißgutes, z. B. durch allmählich anlaufende Schweißnaht, durch Veränderung der Dicke und Länge der Flankenkehlnaht, durch Wahl verschiedener Querschnittsformen der Naht die Tragfähigkeit der Flankenkehlnahtverbindungen

---

10 Vgl. „Stahlbau" 1936, S. 71 und 72.

11 Vgl. u. a. „Stahlbau" 1934, S. 169 u. f. Über Versuche mit Walzträgern, die mit Stumpfnähten usf. gestoßen sind, wird besonders berichtet werden.

12 „Bautechnik" 1932, S. 415.

13 „Bautechnik" 1932, S. 415, ferner Dauerversuche mit Schweißverbindungen, VdI.-Verlag 1935, S. 25.

zu erhöhen. Man fand aber, daß allein mit den angegebenen Mitteln für den Stahlbau nicht viel zu erreichen ist. Mehr kann geholfen werden durch besondere Auswahl der Querschnittsformen der angeschlossenen Stäbe und durch die zugehörige Anordnung der Nähte. Bei rechteckigem Querschnitt der auf Zug angeschlossenen Stäbe wurde die Ursprungszugfestigkeit erhöht, wenn statt Flacheisen mit dem Querschnitt 80 · 10 mm, solche mit 50 · 16 mm oder Quadrateisen gewählt wurden und wenn dabei der Anschluß mit starken, kurzen Flankenkehlnähten geschah.[14] Bedeutend höhere Ursprungszugfestigkeiten sind entstanden, wenn die Anschlüsse mit [-Eisen und Stirnkehlnähten gebaut wurden; die höchste Ursprungszugfestigkeit, nämlich 12 kg/mm² entstand mit Verbindungen nach Fig. 7.[15]

So ist der Unterschied der Tragfähigkeit der wichtigsten Schweißverbindungen, die für oftmals beanspruchte Zugverbindungen in Stahlbauwerken angewendet — der rohen Stumpfnähte einerseits, der rohen Flankenkehlnahtverbindungen andererseits — allmählich kleiner geworden. Während für gute Stumpfnähte die Ursprungszugfestigkeit mit rd. 18 kg/mm² angesetzt werden kann, ist sie zur Zeit für konstruktiv gut entwickelte Flankenkehlnahtverbindungen nach Fig. 7 bis rd. 12 kg/mm² zu erwarten. Bei der Stumpfnaht kann die Gewähr für die angegebene Tragfähigkeit nur übernommen werden, wenn sie bei einer Durchleuchtung als einwandfrei befunden wurde. Bei der Flankenkehlnahtverbindung ist die Durchleuchtung nicht nötig, wenn die Herstellung geübten, sorgfältig arbeitenden Handwerkern oblag.

Im Verfolg solcher Erwägungen ist es verständlich, wenn früher — als die Herstellung guter Stumpfnähte noch weniger zuverlässig gelang — den etwaigen Mängeln der Stumpfnähte in wichtigen Fällen von vornherein durch *Laschen* begegnet wurde, die über die Stumpfnähte gelegt waren. Damit gelang es, die Tragfähigkeit gegen ruhende Lasten so zu sichern, daß der Widerstand des angeschlossenen Querschnitts beim Zerreißversuch voll maßgebend wurde. Wenn aber oftmals wiederkehrende Lasten zu übertragen waren, hat die einfache Decklasche nur dann eine Verbesserung gebracht, wenn die Stumpfnähte schlecht waren. Mit guten Stumpfnähten entstanden unter bescheidenen Anstrengungen Brüche nach Fig. 8, weil am Laschenanfang durch die plötzliche Querschnittsänderung hohe Spannungsschwellen auftraten. Man mußte deshalb diejenige Bauart der Decklaschen suchen, welche dieselbe Tragkraft bringt wie eine gute Stumpfnaht allein. Dies ist zuerst mit Laschen gelungen, die nach Fig. 9 bearbeitet waren. Im Falle der Fig. 9 ist die Lasche a so breit als möglich angesetzt, an den Stirnflächen mit starken, allmählich und stetig auslaufenden Kehlnähten b angeschlossen, seitlich mit schwächeren Nähten befestigt, dann soweit örtlich bearbeitet, daß alle Kerben bei c beseitigt sind, welche im Gebiet der Krafteintragung von Belang sein können.[16] Diesen Bedingungen kann allerdings nur entsprochen werden, wenn gute Elektroden verwendet werden.

Das über die Gestaltung der Laschen Gesagte gilt sinngemäß auch für den Anlauf von Gurtverstärkungen an Balken. Über zugehörige Versuche wird demnächst gesondert berichtet.

---

[14] Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1934, S. 1424.

[15] Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1934, S. 1424.

[16] Der zugehörige ausführliche Bericht an den Deutschen Ausschuß für Stahlbau ist in Vorbereitung.

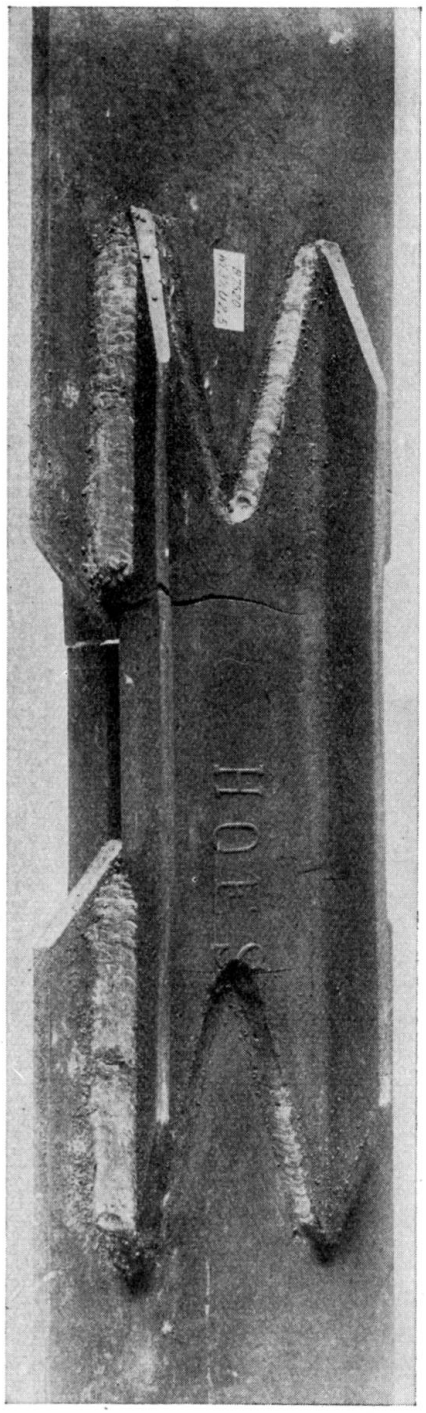


Fig. 7.

Fig. 8.

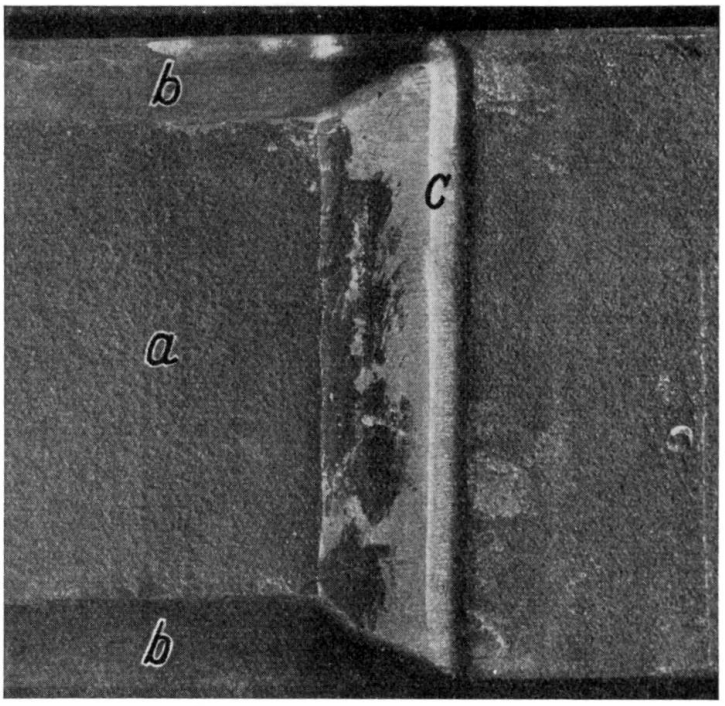


Fig. 9.

Ebenso ist bei der Anbringung von Stegblechaussteifungen zu beachten, daß der Zuggurt gegenüber oftmals wiederkehrenden Lasten an Tragfähigkeit verliert, wenn die Aussteifungen am Zuggurt angeschweißt sind.[17] Dabei ist außerdem wichtig, daß die angeschweißten Aussteifungen auch im Stegblech die Widerstandsfähigkeit mindern können.[17]

[17] Vgl. *Schulz* und *Buchholtz:* „Stahl und Eisen" 1933, S. 551.

Ferner ist die Widerstandsfähigkeit von Kehlnähten, die außer für die Aufnahme einer Querkraft auch für ein Biegemoment zu bemessen sind, verfolgt worden.

Für den Hochbau sind in Dresden Versuche ausgeführt worden.[18] Für Brücken gewinnt man den Aufschluß durch Prüfung großer Modelle, z. B. nach Fig. 10. Dabei sind die Anstrengungen der Querträger und der Hauptträger so abzustimmen, wie es die derzeitigen Bestimmungen verlangen oder wie sie für künftige Bestimmungen vorgeschlagen werden. Im Falle der Fig. 10 geschah der Anschluß allseitig mit Kehlnähten und den üblichen Aussteifungen. Der Bruch erfolgte im Querträger unter Anstrengungen, die denen nahe liegen, welche bei freiaufliegenden Trägern gleicher Art auftreten. Bemerkenswert ist ferner, daß im Steg des Hauptträgers vor dem Bruch des Querträgers ein Riß nach Fig. 11 auftrat, weil in der Zugzone des Stegblechs eine grobe Spannungsschwelle entstanden war. Das in Fig. 11 ersichtliche ⊥-Eisen war die äußere Versteifung des Stegblechs.

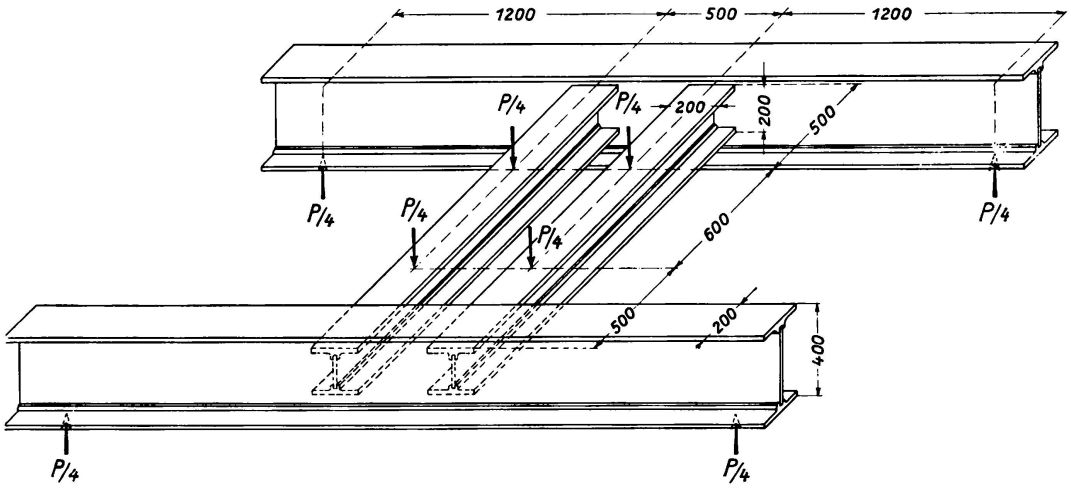


Fig. 10.
Versuche mit geschweißten Tragwerken.

Bei solchen Untersuchungen sind zwei Teilaufgaben zu behandeln; einmal sind die geeigneten Anschlußformen zu suchen; dann ist über die Größe des Moments zu entscheiden, das aufgenommen werden soll.

In Bezug auf die Anschlußformen ist u. a. zu beachten, daß die Flanschen der Querträger wohl am besten auf Zug angeschlossen, also am einfachsten am Steg des Hauptträgers mit einer Stumpfnaht befestigt werden. Die Befestigung des Stegs der Querträger geschieht mit einfachen Kehlnähten, wobei die nötige Stärke zur Zeit erkundet wird. Wenn die Querträger unmittelbar auf dem Zugflansch des Hauptträgers liegen und am Flansch des Hauptträgers durch Schweißen angeschlossen sind, so ist es wesentlich, daß im Zugflansch des Hauptträgers an der Schweißstelle für den Querträger eine Spannungsschwelle auftritt, welche den Widerstand gegen oftmals wiederkehrende Lasten erheblich einschränkt. Diese Verminderung des Widerstands der Zugzone des Hauptträgers wird nicht selten hingenommen werden müssen, wenn man für die Quer-

[18] *Schmuckler:* „Stahlbau" 1931, S. 133 u. f., ferner *Klöppel:* Stahlbau 1933, S. 14 u. f.

träger gute Anschlüsse machen will. Die Anstrengung im Hauptträger ist dementsprechend zu wählen.

d) In der vierten Frage ist nach der Bedeutung der *mit dem Schweißen auftretenden Spannungen* gefragt. Es soll hier nicht erörtert werden, wie sich diese Spannungen entwickeln; es sei nur auf Ergebnisse der bisher vorliegenden Feststellungen verwiesen. Man weiß u. a., daß in Stumpfnähten und in Kehlnähten örtlich hohe Anstrengungen auftreten, die bis zur Fließgrenze reichen.[19] Diese Anstrengungen verteilen sich in Stumpfnähten, die in einem Zug geschweißt sind derart, daß am Rand quer zur Naht Druckanstrengungen, im mittleren Teil Zugspannungen auftreten.[20] Die höchsten Anstrengungen herrschen örtlich eng begrenzt; deshalb sind nur kleine bleibende Änderungen nötig, um die örtlich hervortretenden Anstrengungen bedeutend zu mindern.[21] Man kann auch aus vielen Dauerzugversuchen abschätzen, daß die durch das Schweißen ent-

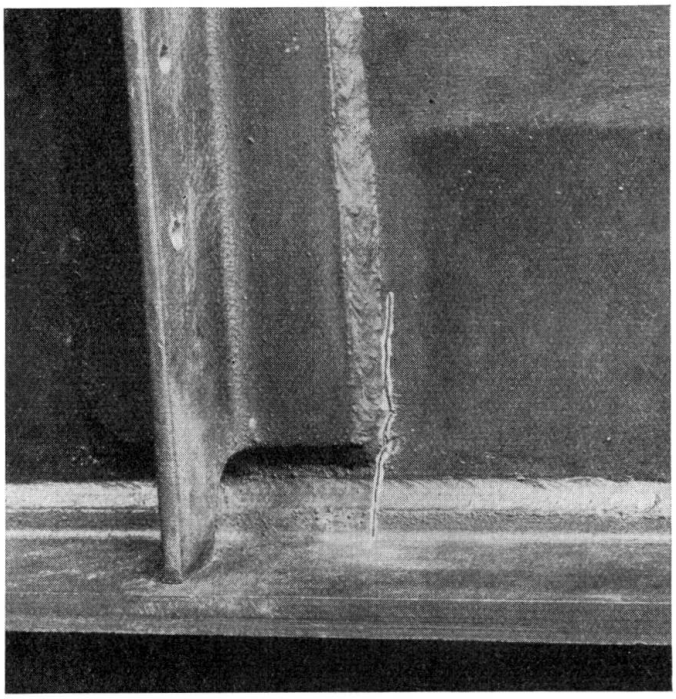


Fig. 11.

stehenden Anstrengungen (Eigenspannungen) jedenfalls insolange ohne bedeutenden Einfluß auf die Widerstandsfähigkeit der Verbindungen bleiben, als es sich um Stücke handelt, die als Zugstäbe gestaltet sind und beim Schweißen an ihren Enden frei waren. Man kann überdies die Eigenspannungen durch das Schweißverfahren beeinflußen, auch durch den Werkstoff.[22] Wichtiger als die Eigenspannungen dürfte folgende Erscheinung sein.

Wird ein Zugstab mit einer Stumpfnaht hergestellt, so treten in der Naht parallel der Stabkraft Verkürzungen auf, u. a. weil das in die Schweißlücke

---

[19] *Graf:* „Stahlbau" 1932, S. 181 und 182, sodann 1933, S. 93 und 94, sowie Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1934, S. 1426.

[20] Vgl. u. a. *Bierett:* Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1934, S. 709 u. f.

[21] *Bollenrath:* „Stahl und Eisen" 1934, S. 877.

[22] Dazu tritt noch die Schweißrißempfindlichkeit, vgl. *Bollenrath* und *Cornelius:* „Stahl und Eisen" 1936, S. 565 u. f.

geschmolzene Material beim Erstarren und Abkühlen schrumpft; die Schrumpfmaße wachsen mit der Breite der Schweißlücke, damit auch mit der Größe des Öffnungswinkels.[23] Sind die Zugstäbe an den Enden eingespannt, so wird das Schrumpfen der Schweißnaht mehr oder minder gehindert; außerdem machen sich dabei die Raumänderungen bemerkbar, welche durch Erwärmen und Abkühlen des neben der Schweißnaht liegenden Werkstoffs auftreten. Damit treten zu den schon erwähnten Eigenspannungen der Naht noch äußere Belastungen. Diese äußeren Belastungen (Schrumpflasten) werden am größten, wenn die Stablängen sehr kurz sind und wenn die Einspannung unnachgiebig ist. Das Schrumpfmaß muß dann mit einer kurzen Stablänge aufgehalten werden. Ist der Stab lang und die Einspannung mehr oder minder nachgiebig, so wird die Schrumpflast infolge der größeren Dehnung des langen Stabs und wegen der Formänderung der Bauteile, welche die Einspannung bewirken sollen, gemindert. Ist ein Stab beispielsweise 3 m lang und gibt die Einspannstelle bei der Stabanstrengung $\sigma = 1050$ kg/cm² nicht nach, so entsteht bei dieser Spannung eine

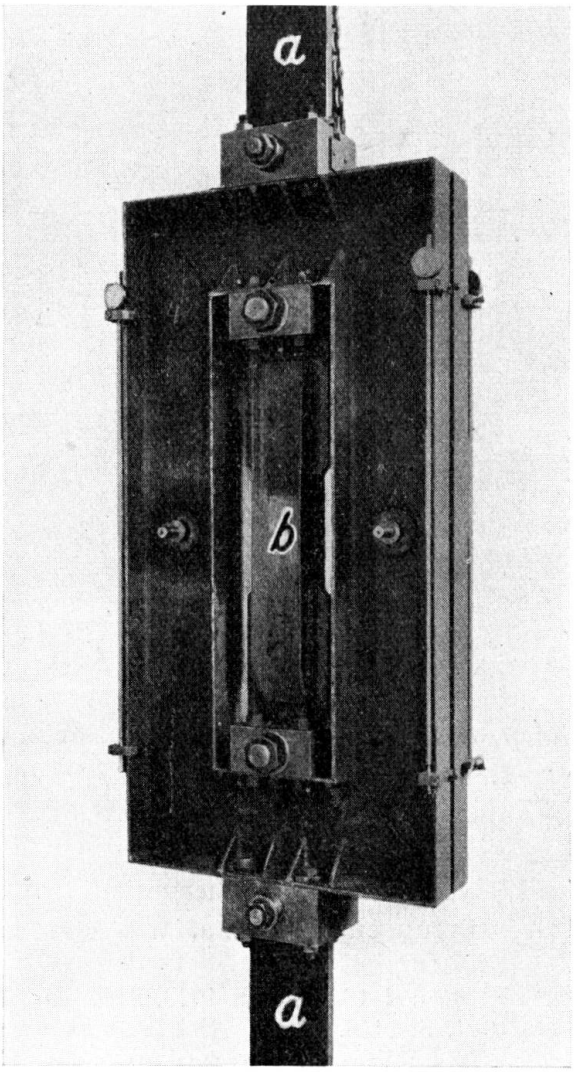


Fig. 12.

[23] Vgl. u. a. *Lottmann:* Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1930, S. 1340 u. f., *Malisius:* Elektroschweißung 1936, S. 1 u. f.

Längenänderung von rd. 1,5 mm. Nach dem bisher Bekannten wäre damit die Schrumpfung eines Schweißquerschnitts von rd. 100 mm² ausgeglichen. Wäre die freie Stablänge nur 0,5 m und die Einspannung wieder unnachgiebig, so müßte die Schrumpfspannung über die Streckgrenze steigen, um ein Schrumpfmaß von 1,5 mm auszugleichen.

Die so errechneten Schrumpflasten sind in Wirklichkeit kleiner, weil sich die Formänderungen während der Abkühlung des Werkstoffs neben und in der Schweißstelle entwickeln. Immerhin wird an den Beispielen erkennbar sein, daß beim Zusammenbau geschweißter Bauwerke die Wahl der Reihenfolge der Schweißstellen und die Art der Herstellung der Nähte besondere Aufmerksamkeit erfordert.

Überdies ist zu beachten, daß die während der Herstellung der Schweißung auftretenden Schrumpflasten in der Schweißnaht besonders hohe Anstrengungen hervorrufen können, solange nur ein Teil der Schweißnaht eingelegt ist und dieser Teil abkühlen kann. Die Schrumpflast ist in solchen Fällen noch nicht groß, die Federung des Bauteils aber sehr klein, so daß die Schrumpfung fast ganz von der teilweise eingelegten Naht aufgenommen werden muß. Deshalb ist die Naht tunlichst in einem Zug unter möglichster Hintanstellung der Abkühlung auszuführen; auch muß der erste Teil der Naht besonders dehnbar sein.

Um ein Bild der tatsächlichen Schrumpflasten zu erhalten, hat der Verfasser im Jahr 1934 Versuche zur Bestimmung der Schrumpflasten aufgenommen. Ein Gestell nach Fig. 12 trägt an den Enden starke Querstücke mit je einer Bohrung. Mit Bolzen, welche durch diese Bohrungen gesteckt werden und von denen einer konisch bearbeitet ist, können starke Flacheisen a a praktisch unverschieblich eingespannt werden. Die inneren Enden der Flacheisen werden durch Schweißungen verbunden, im Falle der Fig. 12 mit [-Eisen b durch Flankenkehlnähte. Die bisher durchgeführten Versuche lieferten unter den gewählten Verhältnissen bei Stumpfnähten Schrumpflasten von rd. 250 kg/cm². Weitere Mitteilungen aus diesen Versuchen folgen in einem besonderen Bericht.

Die beim Schweißen auftretenden Verformungen sind beim Aufrichten von Stahlbauten sorgsam zu beachten, weil die Verformungen u. a. zu wesentlichen Änderungen der Auflagerbedingungen führen können. Dazu ist die Größe und Richtung der Verformungen vor dem Aufrichten zu erkunden. Die zugehörigen Erfahrungszahlen sind allerdings zur Zeit noch nicht genügend entwickelt.

Zusammenfassung.

Die Anwendung der Schweißung im deutschen Brückenbau und im deutschen Hochbau war von zahlreichen Untersuchungen begleitet, welche vor allem die Auswahl der Art der Verbindungen und ihre Gestaltung für die jeweils vorliegenden Aufgaben ermöglichen. Besonders umfangreiche Arbeiten erstrecken sich auf die Ermittlung der Tragfähigkeit der Schweißverbindungen und der Konstruktionselemente unter oftmals wiederkehrenden Lasten, wie sie in Brücken, Kranen usw. vorkommen.[24] Zahlreiche Versuche sind ferner der Ermittlung der Formänderungen gewidmet, welche nach dem Schweißen in der Verbindung selbst und im Bauwerk zurückbleiben. Hierzu sind weitere Fesstellungen nötig.

[24] Vgl. unter den schon genannten Arbeiten u. a. die im VdI.-Verlag im Jahr 1935 erschienene Schrift „Dauerfestigkeitsversuche mit Schweißverbindungen".