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

Band: 2 (1936)

Rubrik: IIIb. Berücksichtigung der Wärmespannungen bei der baulichen Durchbildung und Herstellung geschweisster Konstruktionen

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: 09.12.2025

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

III b

Berücksichtigung der Wärmespannungen bei der baulichen Durchbildung und Herstellung geschweißter Konstruktionen.

Disposition et exécution des constructions soudées en tenant spécialement compte des contraintes dues aux variations de la température.

Design and execution of welds with special consideration of thermal stresses.

Leere Seite
Blank page
Page vide

IIIb 1

Einfluß des Schweißens auf die inneren Spannungen.

Influence du soudage sur les efforts internes.

The Influence of Welding on Internal Stresses.

R. Sarazin,
Ingénieur Soudeur, Neuilly-sur-Seine.

Die Spannungen, die beim Schweißen in stählernen Werkstücken hervorgerufen werden, sind mannigfaltiger Art; sie erstrecken sich in zwei Richtungen und verursachen in dem der Schweißnaht benachbarten Werkstoff zusätzliche Beanspruchungen, die verhältnismäßig schwer kontrollierbar sind.

Man war lange der Meinung, daß die Messung der Schrumpfung des bei der Schweißung aufgetragenen Materials ein ziemlich genaues Bild von dem Wert der beim Übergang vom plastischen zum kristallinischen Zustand verursachten Beanspruchungen ergäbe.

Die Schrumpfung einer mittels Lichtbogenschweißung hergestellten Naht äußert sich durch eine Quer- und eine Längszusammenziehung. Es ist schwierig, den Anteil der Beanspruchungen, der auf die Schrumpfung des Schweißwerkstoffes entfällt, von demjenigen zu trennen, der durch die Erwärmung des Grundwerkstoffes bedingt ist, welcher beim Schweißen auf eine Temperatur in der Nähe des Schmelzpunktes gebracht wird und dann mehr oder weniger langsam auf die Umgebungstemperatur abgekühlt wird.

In der vorliegenden Abhandlung werden wir versuchen, eine Unterscheidung der beiden Vorgänge zu machen und zwar für den einfachen Fall der Auftragung einer Schweißraupe auf ein breites Flachstahlstück.

Wenn man Bleche oder Flachstahlstäbe durch eine Stumpfnaht verbindet, so findet eine so starke Zusammenziehung in der Naht statt, daß die Elastizitätsgrenze in dem Auftragsmetall in der Nähe der Bleche überschritten, und eine bleibende Dehnung hervorgerufen werden kann.

Begnügt man sich dann damit, die auf die Schweißung folgende Schrumpfung durch zwei symmetrisch zur Achse der Naht angebrachte Merkzeichen zu messen, so kann man einen groben Fehler begehen, wenn man den ursprünglichen Abstand zwischen den beiden Merkzeichen z. B. durch Hämmern wieder herzustellen sucht, wie wir es gelegentlich einer Mitteilung an den Kongreß für Autogenschweißung in Rom 1934 bewiesen. Das Hämmern kann einen viel schlimmeren Fehler verursachen als das Übel an sich, da das Auftragmetall dadurch weit über das richtige Maß hinaus erhärten kann.

Die Kontrolle einer Schweißstelle muß sich unbedingt auch auf die Untersuchung des Grundwerkstoffes in der Nähe der Schweißnaht erstrecken; seit

ungefähr 5 Jahren haben wir eine Markierungsmethode entwickelt, die wir inzwischen immer weiter vereinfacht und verbessert haben.

1. *Methode für das Anbringen der Merkzeichen bei den Schweißstellen.*

Diese Markierungsmethode ist auf dem Kongress für Schweißung in Rom beschrieben worden; wir beschränken uns daher auf eine kurze Beschreibung und bitten den Leser, Einzelheiten im vorgenannten Bericht nachlesen zu wollen.

Im Laufe unserer zahlreichen Versuche zur Nachprüfung der Schrumpfung in geschweißten Bauteilen haben wir feststellen können, daß die auf dieses Schrumpfen zurückzuführenden inneren Spannungen über die Bleche nicht gleichmäßig sondern sehr unterschiedlich verteilt waren, wobei die Spannungen in einem gewissen Abstand von der Schweißnaht ungefähr konstant waren, in einem Abstand von 30 bis 40 cm zu steigen begannen und ihren Höchstwert an der Kontaktstelle mit dem Schweißwerkstoff erreichten.

In bestimmten Fällen konnte die fortschreitende Bildung dieser inneren Spannungen im Verlaufe der Schweißung beobachtet werden. Ebenso eine Änderung des Dehnungs-Koeffizienten, die in der Nähe der Schweißnaht zu einer Umkehrung der Beanspruchung führen kann, so daß an Stelle der Dehnung eine Zusammenziehung auftritt. In den meisten Fällen brachten aber die letzten Schweißarbeitsgänge die Druckspannung zum Verschwinden und bewirkten eine Dehnung der ganzen Schweißstelle.

Wir waren der Ansicht, daß sich diese in der Nähe der Schweißnaht auftretende Wechselwirkung: Dehnung — Zusammenziehung — Dehnung, durch das Zusammenwirken von Quer- und Längszusammenziehungen erklären ließe, wodurch sehr erhebliche Veränderungen der inneren Spannungen auftreten können.

Wir werden später bei der Untersuchung der Stumpfschweißung von breiten Flachstählen sehen, wie sich zwei geschweißte Streifen verhalten und wie sich die inneren Spannungen in der Nähe der Schweißnaht verteilen.

Wir bedienen uns bei diesen Untersuchungen des Verfahrens, die zu schweißenden Bleche zu markieren und die Lageveränderungen der Meßpunkte im Laufe der fortschreitenden Schweißarbeit nachzuprüfen; diese Marken sind sehr schwer anzubringen, und es ist oft außerordentlich schwierig, Messungen auf $^1/_{1000}$ m genau auszuführen.

2. *Beschreibung des R. Sarazin-Tensiometers.*

Diese Schwierigkeit wurde dank unserer neuen Meßmethode, die für nahe aneinander liegende Meßpunkte durchgebildet ist, sowie dank der Benutzung eines „Tensiometers" genannten Apparates und der Anwendung eines besonderen Eindruckverfahrens (Körnerschlag) behoben.

Die Meßpunkte werden mit einem besonderen Körner eingeschlagen, der einen ganz bestimmten Abstand ergibt, welcher so bemessen ist, daß die Veränderungen in sicherer Weise in den Bereich der durch das Gerät möglich gemachten Ablesungen gebracht werden. Es ist selbstverständlich, daß ein sehr empfindliches Gerät keine sehr ausgedehnte Teilung aufweisen kann. Der erwähnte Körner gibt die Möglichkeit, die Marken in einem genügend gleichmäßigen Abstand mit einer Toleranz von $^1/_{10}$ oder höchstens $^2/_{10}$ mm zu setzen. Für unsere Versuche haben wir einen Abstand von 25 mm zwischen den Marken gewählt.

Nach zahlreichen Versuchen haben wir uns für ein Eindrückverfahren entschieden, das absolut genaue Ablesungen ermöglicht und das darin besteht, kleine Löcher von $2^1/_2$ mm ∅ und $1^1/_2$ mm Tiefe zu bohren, und zwar in den Körnerschlag, der mit dem oben erwähnten Körner hergestellt wurde. Auf diese Löcher setzen wir eine Kugel von 3 mm ∅; die Kugel hinterläßt bei Schlag auf dem Rand des Loches eine kugelförmige Prägung. Die Abtaster des Tensiometers sind ebenfalls mit Kugeln versehen; die Verschiebung der Marken wird also keinen wesentlichen Fehler herbeiführen, da die Kugelform des Sitzes während der elastischen Formänderung deutlich beibehalten wird.

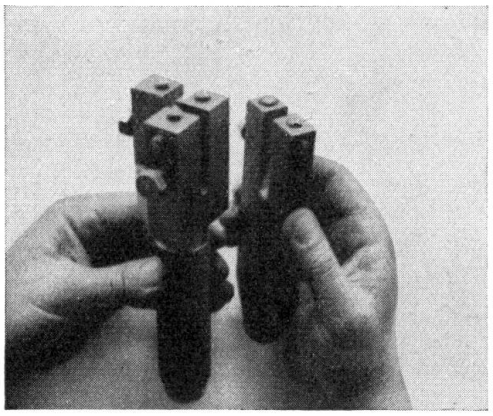


Fig. 1.
Körner mit regelbarem Abstand zum Eindrücken der Meßmarken in 1 oder 2 Richtungen.

Das Tensiometer selbst besteht aus einem festen Arm, der mit einem Gehäuse fest verbunden ist und eine besondere Lehre trägt; ein beweglicher Arm, der um einen Festpunkt drehbar gelagert ist, bildet einen übersetzten Hebelarm und drückt auf den Abtaster der Lehre. Das Gerät gibt genaue Ablesungen; jeder Teilstrich der Lehre entspricht einem Tausendstel Millimeter und mit etwas Übung kann man mit Sicherheit auf $^1/_{1000}$ mm genau ablesen.

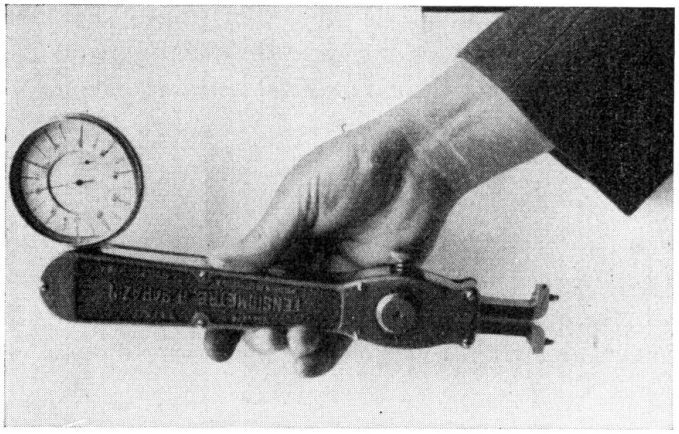


Fig. 2.
Dehnungsmesser oder Tensiometer nach R. Sarazin, in der Hand des Prüfers.

Der Abstand zwischen den Marken wurde mit 25 mm gewählt, das entspricht einer inneren Beanspruchung von 0,8 kg/mm² für den Zeigeranschlag von der Größe einer Einheit.

Das Gerät und die Meßmethode zeigen also eine Veränderung der Beanspruchung von 1 kg/mm² oder maximal 2 kg/mm² noch genau an.

Die beiliegende Photographie zeigt das Tensiometer, in der Hand gehalten zwecks Messung der Merkzeichen an Blechen. Das Gerät wiegt kaum 1 kg, ist handlich und gestattet, die Messungen selbst an schwer zugänglichen Stellen vorzunehmen. Seine versetzte Lehre erlaubt es ohne Schwierigkeit, an eine senkrechte Wandung zu gelangen, auch dann, wenn das erste Merkzeichen 15 mm vom Fuß der Wandung entfernt angebracht wird, wie im Fall des Innenwinkels von U- oder I-Trägern.

Im Nachstehenden werden wir verschiedene Fälle untersuchen, in denen das Tensiometer die Messung der durch das Schrumpfen der Schweiße hervorgerufenen inneren Spannungen ermöglichte; diese Messungen dienten zum Feststellen der nach Ausführung einer Schweißnaht in deren Nähe auftretenden Spannungen.

3. *Messungen an einem breiten Flachstahl nach Auftragen einer Schweißraupe.*

Die nachstehende Zeichnung zeigt die einfachste Art der Ausführung einer Lichtbogenschweißung, d. h. das Auftragen einer Schweißraupe auf einem Blech oder auf einem breiten Flachstahl. Man sieht, daß die Markierungsmethode in Verbindung mit dem Tensiometer zu sehr interessanten Feststellungen führte.

Die Tafel I zeigt, daß auf einem 10 mm starken Flachstahl die Ausführung einer Schweißraupe eine Zusammenziehung in der Längsrichtung hervorruft, die bei einem Meßpunktabstand von 25 mm durchschnittlich $^{50}/_{1000}$ mm beträgt; das bedeutet für einen Baustahl von 40 kg/mm² Bruchfestigkeit ein ausgesprochenes Überschreiten der Elastizitätsgrenze.

In 25 mm Abstand von der Naht beträgt diese parallel zur Naht gemessene Längszusammenziehung noch $^{20}/_{1000}$ bis $^{25}/_{1000}$ mm, was einer örtlichen Beanspruchung von ungefähr 8 kg/mm² entspricht. In der Querrichtung beträgt die gemessene Zusammenziehung ca. $^{280}/_{1000}$ mm; das bedeutet eine ganz erhebliche Überschreitung der Elastizitätsgrenze, und es ist klar, daß eine so bedeutende Kontraktion im Falle eines genügend langen Bleches in den der Schweißraupe zunächst liegenden Teilen eine Reckung hervorrufen würde. Wir haben diese verschiedenen Werte in Tafel I in Form zweier Kurven dargestellt; die Kurve A zeigt die Zusammenziehung in der Querrichtung, die Kurve B diejenige in Längsrichtung.

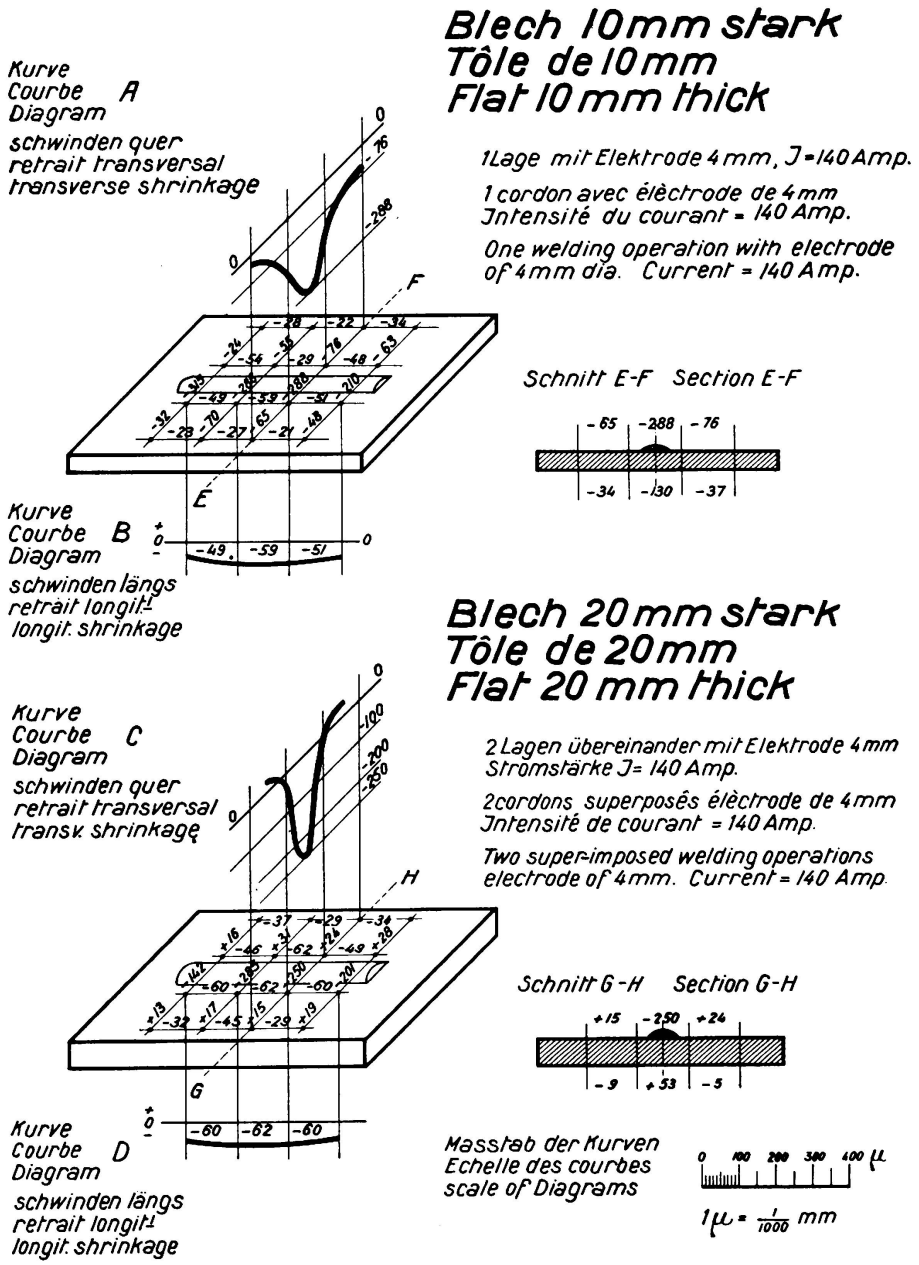
Wir haben festgestellt, daß in einem Blech von 10 mm Dicke die auf der Rückseite gemessenen inneren Spannungen die gleiche Richtung, aber einen kleineren Wert aufweisen als die auf der Vorderseite gemessenen; man kann daher mit Bestimmtheit sagen, daß der Vorgang sich auf die ganze Masse des Werkstoffes überträgt und sich allmählich, je nach der Dicke des Werkstoffes, verliert.

Wir wollten den gleichen Vorgang an einem Blech von 20 mm Dicke beobachten, um festzustellen, ob es sich auch tatsächlich so verhält, und wir haben festgestellt, daß es eine innere neutrale Zone gibt, da die Beanspruchungen auf der der Schweißnaht gegenüberliegenden Seite das umgekehrte Vorzeichen annahmen.

Die Kurve C zeigt die Veränderungen in der Querrichtung in Tausendstel Millimetern, d. h. der Unterschied, zwischen dem Wert, der vor der Schweißung

zwischen den Meßpunkten abgelesen wurde, und dem Wert nach der Ausführung von 2 normalen übereinanderliegenden Schweißraupen mit einer Elektrode von 4 mm ∅ und bei einer Stromstärke von 140/150 A.

Das geschweißte Probestück ist so ziemlich eben geblieben; übrigens zeigt die Untersuchung der Veränderungen recht deutlich, daß wir es neben einer Aus-



Tafel I.

dehnung mit einer Zusammenziehung zu tun haben, was einen Zustand des ungefähren Gleichgewichtes vermuten läßt.

Man sieht, daß auf der Seite, auf der die Schweißraupe aufgebracht wurde, eine sehr starke Zusammenziehung beidseitig des Schweißgutauftrages stattfindet, welche bewirkt, daß in einer ziemlich dicken Werkstoffschicht die Elastizitätsgrenze überschritten wird, während auf der andern Seite eine sehr starke

örtliche Ausdehnung auftritt; die Kurven zeigen die örtlichen Werte der inneren Spannungen.

Es ist sicher, daß die von uns bei der Auftragung einer Schweißraupe festgestellten Vorgänge einerseits auf die örtliche Erwärmung der Bleche auf eine Temperatur von 1000° bis 1200°, und anderseits auf eine Abkühlung zurückzuführen sind, die sich durch eine Zusammenziehung äußert. Beide Zusammenziehungen bestimmen die Größe der inneren Gesamtspannung.

Die folgenden Versuche zeigen welcher Anteil den beiden Vorgängen beim Entstehen der inneren Spannungen zukommt.

4. *Messungen des Schrumpfens bei Probestücken, die der Hitze des Lichtbogens ausgesetzt waren, ohne daß ein Metallauftrag stattgefunden hat.*

Auf einem Probestück aus Blech von 10 mm Dicke, das genau dem unter (3) verwendeten entspricht, haben wir eine örtliche Erwärmung mittels eines Lichtbogens mit Graphitkohle vorgenommen und zwar mit Hilfe einer Maschine, um Gleichmäßigkeit zu gewährleisten. Die Länge war dieselbe wie bei der Schweißraupe.

Durch dieses Vorgehen wurde erreicht, daß das Probestück denselben Bedingungen unterworfen war wie beim Auftragen einer Schweißraupe, wobei wir aber nur die Erwärmung des Bleches in Erscheinung treten lassen, die Schrumpfung des aufgetragenen Schweißwerkstoffes dagegen ausschalten.

Um die für das Schmelzen der Elektrode selbst benötigte Wärmemenge zu berücksichtigen, wurde die Stromstärke im Lichtbogen von 140 auf 100 Ampère herabgesetzt, eine Graphitkohle von 6 mm benutzt und mit der gleichen Geschwindigkeit wie bei Benutzung einer normalen Elektrode von 4 mm gearbeitet.

Die Resultate sind auf Tafel II zusammengefaßt. Sie zeigen, daß die Schrumpfung in der Längsrichtung $^{15}/_{1000}$ bis $^{25}/_{1000}$ mm beträgt, gegenüber den zuvor gefundenen $^{50}/_{1000}$ mm; die Schrumpfung in der Querrichtung beträgt im Durchschnitt $^{200}/_{1000}$ mm, gegenüber $^{280}/_{1000}$ mm bei dem Probestück mit tatsächlich aufgetragener Schweißraupe.

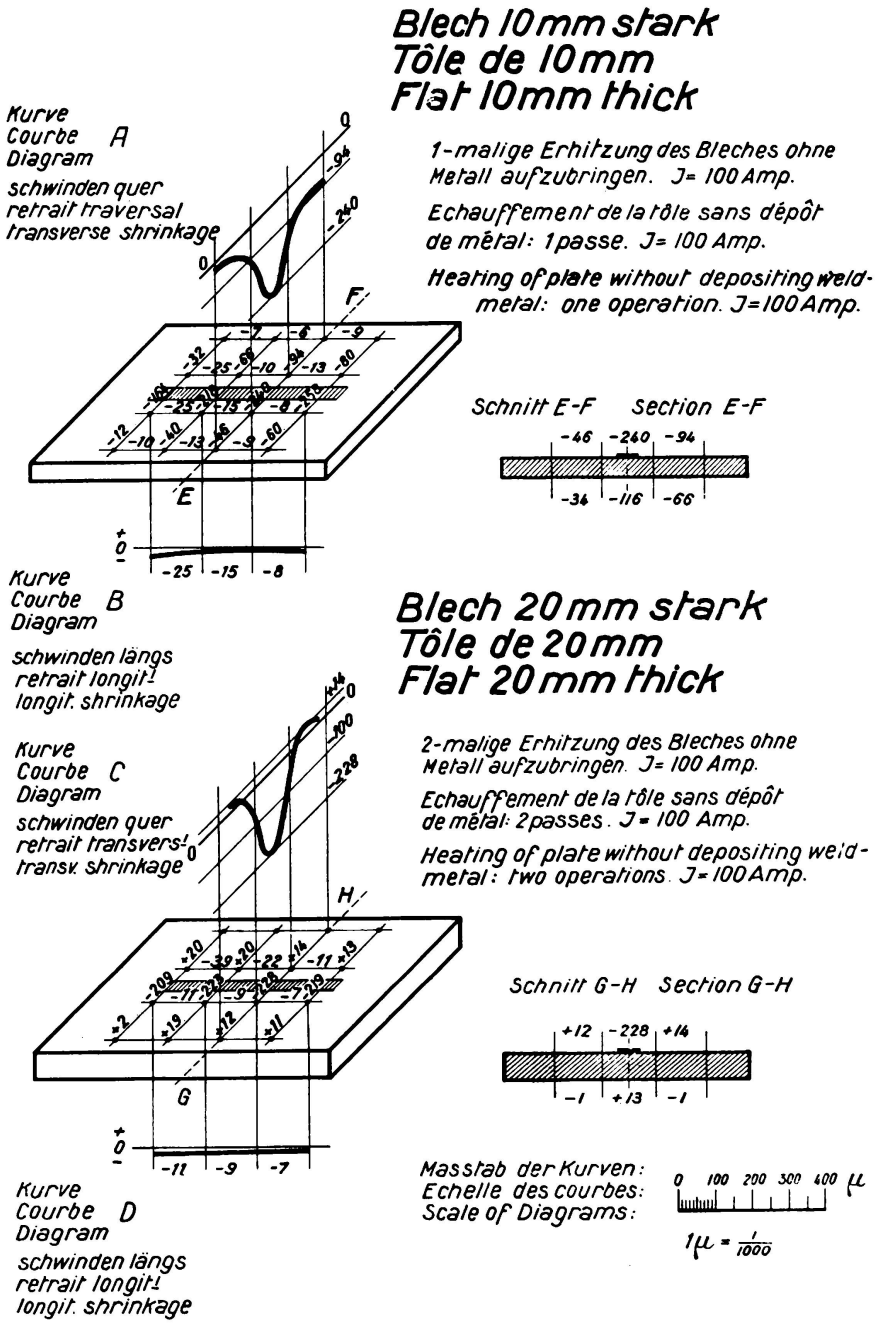
Diese Zahlen zeigen, daß die Schrumpfung der Bleche bei einem Probestück von 10 mm Dicke einen großen Teil der Gesamtschrumpfung darstellt, wie sie bei einer unmittelbar auf die Bleche aufgetragenen Schweißraupe auftritt.

Bei einem Probestück von 20 mm Dicke haben wir zwei Arbeitsvorgänge unter den gleichen, oben angegebenen Bedingungen ausgeführt und feststellen können, daß die mittlere Schrumpfung in der Querrichtung $^{215}/_{1000}$ mm beträgt gegenüber $^{250}/_{1000}$ mm für das Probestück von gleicher Dicke (Blatt I), bei welchem zwei Schweißraupen aufgetragen worden waren. Die Schrumpfung in der Längsrichtung betrug nur $^{15}/_{1000}$ bis $^{20}/_{1000}$ mm gegenüber $^{50}/_{1000}$ bis $^{60}/_{1000}$ mm für das entsprechende Probestück mit aufgebrachter Schweißraupe.

Auf der Rückseite des Bleches findet man in der Mitte eine Dehnung und etwas weiter davon eine leichte Zusammenziehung.

Zusammenfassend kann man sagen, daß bei einer auf eine Platte aufgetragenen Schweißraupe dem eigentlichen Auftragen von Metall etwa 30 % der Deformationen zuzuschreiben sind, während die durch das Schweißen eintretende Erwärmung der Bleche und die darauffolgende Abkühlung die Hauptursache

für die Verformungen darstellt; diese Behauptung muß nachgeprüft werden und gilt nur für diesen besonderen Fall.



Tafel II.

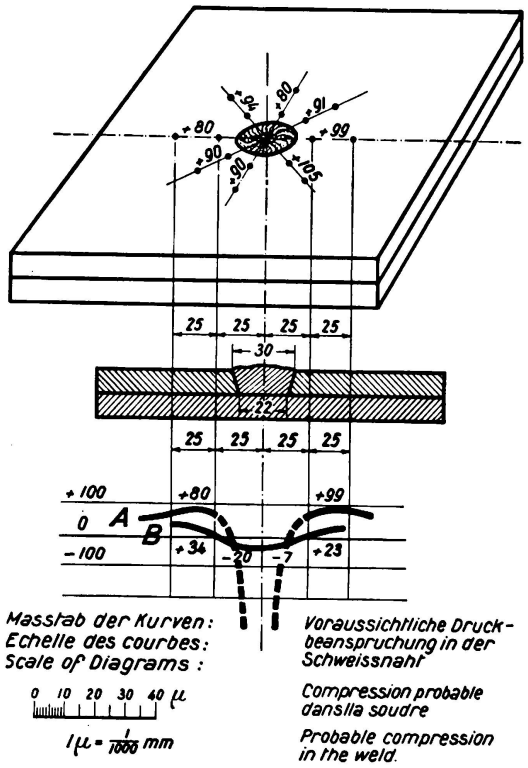
5. *Untersuchung des Schrumpfens bei einer runden Schweißung, einer sogenannten „Zapfen"-Schweißung oder „Falschnietung".*

Für diesen Versuch wurden zwei Stahlbleche von 10 mm Dicke benutzt. In der Mitte eines dieser Bleche wurde ein konisches Loch von 22 mm ∅ am unteren und 30 mm ∅ am oberen Rand gebohrt. Dieses Loch wurde deshalb so gebohrt um eine gute Einwirkung des Lichtbogens auf das untere Blech zu ge-

währleisten. Die Schweißung wurde zuerst mit einer Elektrode von 3 mm ∅ und dann mit einer solchen von 4 mm ∅ ausgeführt, bis das Loch ausgefüllt war.

Eine derartige Zapfen-Schweißung ist ziemlich schwierig auszuführen und gibt zu manchen Fehlern Anlaß; es war jedoch interessant nachzuprüfen, wie sich diese Schweißung in Bezug auf das Schrumpfen verhielt und festzustellen, ob die Achsen der inneren Spannungen auch tatsächlich Radien sind, die im Mittelpunkt des Loches zusammenlaufen.

Zu diesem Zwecke wurde die obere Seite des Bleches wie in der Figur gezeigt markiert, desgleichen die Rückseite des zusammengesetzten Probestückes. Die auf Tafel III dargestellten Kurven geben die gemessenen Werte wieder. Die Ab-



Tafel III.

Lochschweißung.
Kurve A: Messungen zwischen den Marken auf der Vorderseite.
Kurve B; Messungen zwischen den Marken auf der Rückseite.

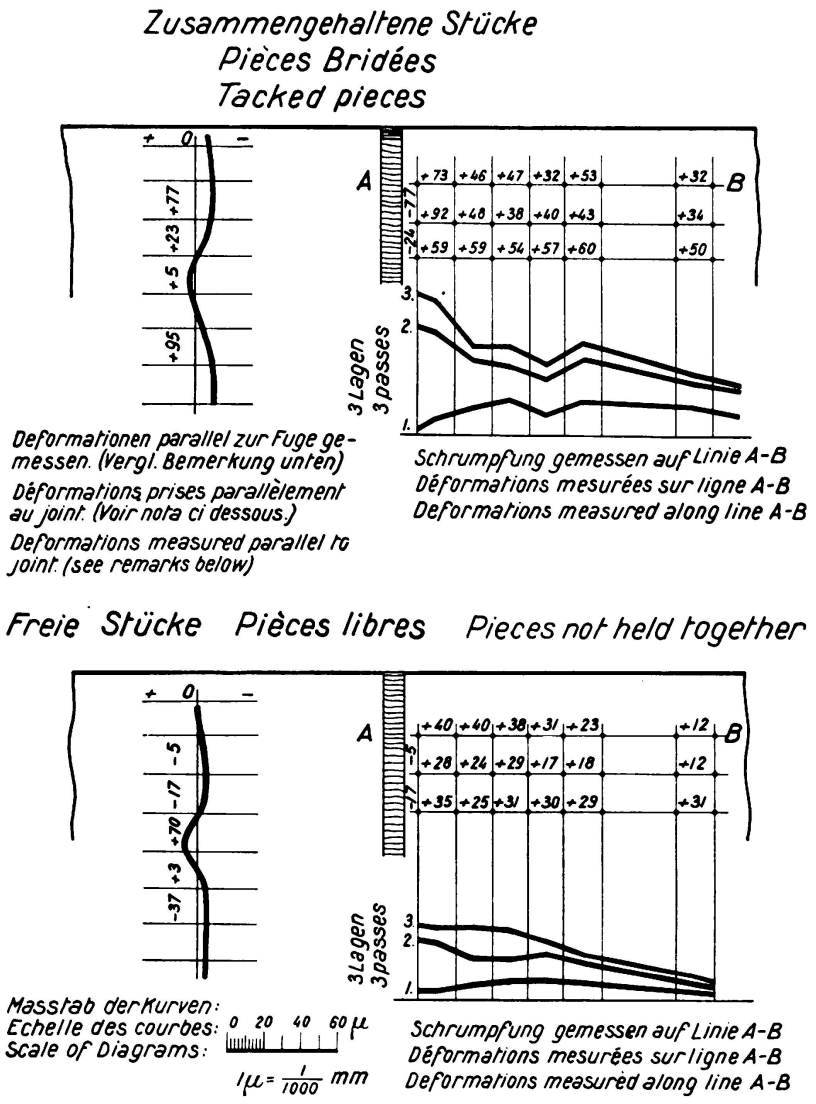
lesungen am Tensiometer *R. Sarazin* ergaben ganz eindeutig die folgenden Resultate: Auf der Vorderseite zeigten sich die Formänderungen als radiale Ausdehnungen, die gefundenen Werte zwischen $^{80}/_{1000}$ und $^{100}/_{1000}$ mm stimmen überein. Auf der Rückseite des Probestückes ergab sich an den Meßpunkten in der Mitte eine Verkürzung von $^{7}/_{1000}$ mm, die Mehrzahl der benachbarten Meßpunkte zeigte eine Ausdehnung von $^{25}/_{1000}$ bis $^{30}/_{1000}$ mm, an gewissen Meßpunkten trat dagegen eine merkliche Verkürzung auf (s. Kurven A und B., Tafel III).

6. *Stumpfschweißung von zwei Flachstählen* (Tafel IV).

Die Stumpfschweißung von zwei Flachstählen läßt eigentümliche Vorgänge in Erscheinung treten und zwar in der Hinsicht, daß die inneren Spannungen verschieden verteilt sind, je nach dem Verhältnis der Dicke des Probestückes zu seiner Breite.

In der Tat setzt sich die Zusammenziehung in der Längsrichtung mit derjenigen der Naht in der Querrichtung zusammen und je nach der Anordnung der Schweißschichten zeigen sich sehr charakteristische Ergebnisse.

Bei Flachstählen von 8 mm Dicke und 250 mm Breite haben wir festgestellt, daß eine sehr deutliche Veränderung der inneren Spannungen selbst und ihrer



Tafel IV.

Stumpfschweißung zweier Flachstähle von 250 mm Breite und 8 mm Dicke. Bemerkung: Der Übergang von Zug auf Druck läßt sich durch die geringe Breite der Probestücke erklären.

Verteilung stattfindet, und zwar je nachdem, ob die Stücke beim Schweißen freiliegend oder eingespannt waren.

Die Kurve auf Blatt IV zeigt die Verteilung der Spannungen bei freiliegenden Blechen und man sieht, daß man in einem Zustand von 25 mm von der Naht in einer zur Naht senkrecht stehenden Achse mit einer Zugspannung von maximal ungefähr 20 bis 24 kg/mm² rechnen kann. Die erste Schweißlage bewirkt eine

Dehnung mit nach der Naht zu steigenden Werten, deren Höchstwert in der Nähe der Schweißraupe erreicht wird.

Für die zweite Schweißlage steigert sich die Ausdehnung und die Kurve neigt zu einer Einbuchtung in der Nähe der Schweißnaht; wir haben festgestellt, daß dies zweifellos auf die Zusammenziehung in der Längsrichtung zurückzuführen ist, die in Verbindung mit den Ausdehnungsbeanspruchungen eine Verminderung des Ausdehnungswiderstandes zur Folge hat.

Die dritte Schweißlage ändert die Einbuchtung der Kurve, die ausschließlich steigenden Wert annimmt.

Zusammenfassend kann man sagen, daß bei zwei stumpf geschweißten Flachstählen von 8 mm Dicke, die bei der Schweißung frei lagen, etwa 200 mm von der Naht entfernt die allgemeine Ausdehnung einer Beanspruchung von etwa 8 kg/mm² entspricht; in einer Entfernung von 100 mm einer solchen von etwa 10 kg/mm² und bei 25 mm Entfernung von der Naht wird die größte Ausdehnung, gleich einer ungefähren Beanspruchung von 20 kg/mm² erreicht.

Bei den gleichen aber eingespannten Probestücken, bei denen die Enden auf einer großen Richtplatte festgeschweißt waren, so daß sie sich in keiner Weise mehr bewegen konnten, sind die Werte bedeutend höher; bei 200 mm Entfernung entspricht die allgemeine Ausdehnung einer Beanspruchung von etwa 10 bis 12 kg/mm², bei 100 mm einer Beanspruchung von ungefähr 20 kg/mm² und bei 25 mm von der Schweißnaht beträgt die innere Höchst-Beanspruchung 30 bis 35 kg/mm²; die Elastizitätsgrenze ist für den gebräuchlichen Baustahl überschritten.

Die Verformungen in der Längsrichtung auf einer zur Naht parallelen Linie und im geringen Abstand von ihr zeigen manchmal einige Verschiedenheit, auf die wir später näher eintreten werden; wir haben tatsächlich festgestellt, daß die Verformung sich an einigen Stellen als eine Zusammenziehung und an anderen benachbarten Stellen als eine Dehnung äußert. Es ist deshalb interessant, die Ursache für diese Schwankungen festzustellen, denn wir haben eine wenn auch nicht ganz einheitliche, so doch ziemlich regelmäßige Zusammenziehung bei stärkeren Probestücken festgestellt.

7. *Überlappte Schweißung von zwei Flachstählen* (Tafel V).

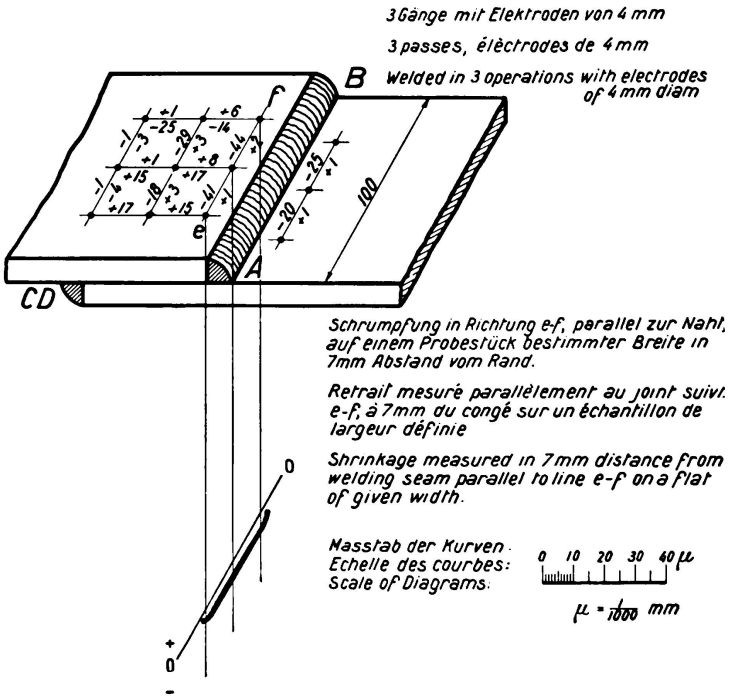
Diese Verbindungsart, die „überlappt" genannt wird, ist eine Nachbildung der genieteten Verbindung; sie wurde zu Beginn der Entwicklung der Schweißtechnik zur Verbindung von Bauteilen besonders im Schiffbau angewandt und findet heute noch bei Stahlkonstruktionen in einigen Fällen Anwendung.

Diese Art der Verbindung ist nicht immer vorteilhaft, denn sie bewirkt eine Beanspruchung der Naht auf Abscherung und andererseits bedingt sie einen bedeutenden Auftrag von Metall, wodurch sie unwirtschaftlich wird.

Es ist jedoch interessant zu untersuchen, wie sich die geschweißten Teile verhalten, und wir haben deshalb eine überlappte Verbindung von 2 breiten Flachstählen von 10 mm Stärke, die vorher markiert worden waren, ausgeführt; Blatt V zeigt das geschweißte Probestück. Zwischen jedem Paar Meßpunkte haben wir zwei Werte eingetragen; der erste Wert wurde abgelesen nach Ausführung der Naht A—B in drei Schweißlagen mit Elektroden von 4 mm ∅ bei einer Stromstärke von 140 Ampère.

Die nach dieser ersten Schweißung festgestellten Werte haben gezeigt, daß die Überdeckung der Nahtlinie groß genug war, um eine Verkürzung von ungefähr $^{40}/_{1000}$ mm auf dem Rand der linken Platten und eine Verkürzung von ungefähr $^{20}/_{1000}$ mm an der rechten Platte zu verursachen.

Man wird bemerken, daß diese beiden Verkürzungen zur Ausdehnung beigetragen haben, die man auf einer Senkrechten zur Naht vorfindet; die Ausdehnung ist teils auf die Querzusammenziehung der Naht und zum Teil auf die Längszusammenziehung des aufgetragenen Schweißwerkstoffes zurückzuführen. In der Tat bewirkt letztere Kontraktion dadurch, daß sie den Stahl in der Querrichtung verkürzt, eine Dehnung in unmittelbarer Nähe.



Tafel V.

Überlappungsschweißung von 2 Flachstählen von 10 mm Dicke.
Bemerkung: Die 1. Zahl zwischen den Meßmarken gibt die Längenänderung nach Ausführung der Naht A B. Die 2. Zahl gibt die Längenänderung, die eingetreten ist nach Ausführung der Naht C D.
Die 2. Zahl ist zur ersten algebraisch zu addieren, um den Endzustand zu erhalten.

Nach Ausführung der Naht A—B wurde das Stück umgedreht, um die Naht C—D unter den gleichen Bedingungen auszuführen. Daraufhin wurden auf den Meßpunkten, die wir zuvor abgelesen hatten, neue Messungen vorgenommen. Diese ergaben eine leichte Veränderung und es ist zu beachten, daß diese neuen Ablesungswerte zu den bereits behandelten addiert werden müssen, um den Endzustand in der Naht nach der Schweißung zu erhalten.

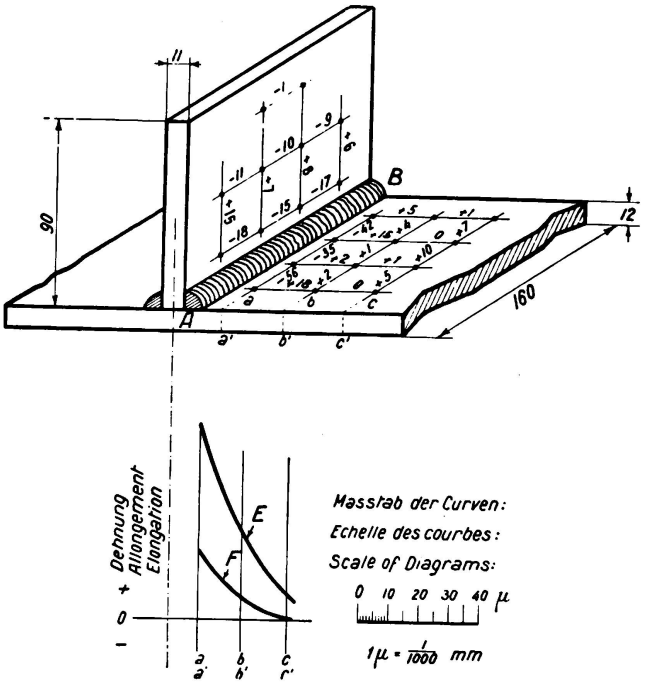
Die Messungen, die wir auf einer zur Naht parallel verlaufenden Linie ausgeführt haben, haben gezeigt, daß die Schrumpfung ziemlich regelmäßig verläuft, so wie es durch die Kurve (Tafel V) dargestellt ist.

8. *Kehlnaht-Verbindung zweier Flachstähle* (Tafel VI).

Blatt VI zeigt diese Verbindungsart, die man bei Stahlkonstruktionen am häufigsten findet; es ist interessant, nachzuprüfen, wie die Beanspruchungen auf die einzelnen Elemente verteilt sind.

Zu diesem Zweck wurde die Fußplatte auf der Vorderseite und auf der Rückseite markiert; die gleiche Markierung wurde auf den beiden Flächen des Steges vorgenommen. Die Markierungen wurden mit einem regelmäßigen Abstand von 25 mm mit Hilfe der besonderen Körner ausgeführt.

Durch die Anbringungsweise des Tensiometers war es möglich, Markierungen bis auf 15 mm in den Winkel oder auf 5 mm an den Rand der Schweißnaht



Tafel VI.

Kehlnahtverbindung zweier Flachstähle.
3 Lagen, 4 mm starke Elektroden. Stromstärke 140 A.
Die Nähte A B und C D sind abwechslungsweise hergestellt worden.
Bemerkung: Die Grundplatte wurde auf beiden Seiten ausgemessen; die Kurven E und F zeigen die Größe der Formänderungen.
E auf der Rückseite senkrecht zu A B gemessene Formänderungen.
F auf der Vorderseite senkrecht zu A B gemessene Formänderungen.

heranzuführen. Die Messungen waren deshalb umso charakteristischer. Es scheint im allgemeinen, daß bei dieser Verbindungsart keine großen Veränderungen im Steg und auf dem oberen Teil der Fußplatte auftreten; dagegen zeigt die Rückseite der Fußplatte, d. g. die der Schweißnaht entgegengesetzte Seite eine sehr starke Ausdehnung, die sich übrigens auch durch die Neigung der Fußplatte, sich zu biegen, bemerkbar macht.

Die Winkel, die das Schweißgut aufnehmen, neigen dazu, sich zu verkleinern, doch zeigt sich diese Erscheinung nicht bei starren Stücken.

Bei der Untersuchung der auf dem flachen Teil der Fußplatte und auf dem

Steg abgelesenen Werte bemerkt man, daß die Zusammenziehung auf dem Steg nicht so stark ist. Es mußten zahlreiche Versuche mit verschiedenen Materialdicken durchgeführt werden, um die Ursache für diese Deformation des Steges genau zu ermitteln.

9. *Anwendung des Tensiometers zur Feststellung der inneren Spannungen in einer geschweißten Konstruktion.*

Nach den vorhergehenden Ausführungen könnte man glauben, daß die Untersuchung der inneren Spannung einer Konstruktion eine umfangreiche und kostspielige Markierung erfordere. Dem ist jedoch nicht so, denn für diese Zwecke ist es nicht notwendig, zahlreiche Meßpunkte anzuordnen, und nach den Erfahrungen, die wir bei der Verwendung des Apparates gemacht haben, genügen 3 oder 4 mit dem Körner in drei Richtungen längs der Nahtlinie verteilte Eindrücke, um 12 Marken zu erhalten, somit 12 Meß-Stellen, die vollauf genügen, um die Bedeutung des Vorganges festzustellen.

In der Praxis wird es zur Feststellung der inneren Spannungen nicht notwendig sein, auf der Vorder- und der Rückseite der geschweißten Konstruktionsteile Messungen vorzunehmen, denn wir haben gesehen, daß bei Materialdicken unter 10 mm die Deformationen auf der Rückseite um mehr als die Hälfte geringer sind als die, die auf der Schweißungsseite abgelesen werden. Es hat sich ferner gezeigt, daß bei Blechen von mehr als 20 mm Dicke diese Deformationen die umgekehrten sein können, aber ihr Wert wird sehr unbedeutend sein.

Die Verwendung des Tensiometers während der Schweißung einer Konstruktion wird es ermöglichen, die Unannehmlichkeiten, die aus dem Schrumpfen der Nähte entstehen können, zu vermeiden. Dies ist vor allem dann nötig, wenn die Konstruktion lang ist, denn die Schrumpfung kann bis 1 mm/m betragen, was bei einem Balken von 10 m eine Verkürzung von 1 cm ergibt, und deshalb nachteilig auf die Montage oder die Verteilung der Raster wirken kann.

Die Überwachung der inneren Spannungen während des Baues wird die Entstehung ungleichmäßiger Verhältnisse im Baustück vermeiden lassen; wir glauben, daß man in einer symmetrischen Konstruktion dank dieser Methode eine richtige Verteilung der Schrumpfungen erreichen müßte.

Es ist klar, daß man für die Berechnung der inneren Spannungen, die durch die Schweißung hervorgerufen werden, nur die elastischen Formveränderungen berücksichtigen muß; diese Spannungen können nach der Formel von Young leicht berechnet werden.

Zusammenfassend kann man sagen, daß geschweißte Konstruktionen fast immer an bestimmten Stellen eine Überschreitung der Elastizitätsgrenze des Werkstoffes aufweisen werden; unserer Ansicht nach ist dies ohne Bedeutung, denn die Konstruktion wird sehr schnell einen neuen Gleichgewichtszustand infolge der Wirkung der Betriebsbelastungen wiederfinden.

Einzelne Verfasser behaupten wohl mit Recht, daß ein leichtes Überschreiten der Elastizitätsgrenze den Vorteil der Orientierung der Werkstoffpartikel in der Richtung der Beanspruchungen aufweist, und es ist leicht deutbar, daß die geringe Erhärtung, die darauf erfolgt, ohne praktischen Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften des Stahls bleibt.

10. *Beeinflussung und Verminderung der inneren Spannungen.*

Die vorgeschlagene Markierungsmethode und das von uns entwickelte Gerät haben es uns ermöglicht, die Verschiedenartigkeit der Verteilung der inneren Spannungen an den Knoten und sonstigen Stellen einer geschweißten Konstruktion genau kennen zu lernen.

Es gibt mehrere Methoden, um die inneren Spannungen zu vermindern und wir werden künftig versuchen, Schweißverfahren zu entwickeln, welche diese Spannungen auf den niedrigsten Wert zurückzuführen gestatten.

Zur Zeit können wir folgende allgemeine Empfehlungen machen:

Beim Schweißen von Konstruktionsteilen sollte man zuerst darauf achten, die einzelnen Elemente herzustellen, wobei man zunächst diejenigen schweißt, die stumpfgeschweißt werden müssen, und zwar so, daß die Formveränderung so klein wie möglich gehalten wird, wie wir es bei Tafel IV für freiliegende Stücke gesehen haben.

Danach führt man die Kehlnahtschweißungen aus, wie z. B. beim Zusammenfügen einer Fußplatte und eines Steges. Allgemein sollen die Kehlnähte gerade dick genug ausgeführt werden, um den Beanspruchungen, denen sie unterworfen sein werden, zu genügen, um das Schrumpfen in der Längsrichtung möglichst gering zu halten. In dieser Hinsicht haben wir festgestellt, daß die Kehlnähte oft zu dick bemessen sind und eine viel zu große Sicherheit geben, wodurch obige Bemerkung gerechtfertigt ist.

Wenn es sich darum handelt, Schweißnähte von großer Länge auszuführen, wird man mehrere Schweißer an derselben Naht gleichzeitig arbeiten lassen. Wenn die Teile sehr dick und von beiden Seiten zugänglich sind, so ist es von Vorteil, die Nahtstellen auf beiden Seiten durch Abfräsen der Kanten vorzubereiten, und die Schweißer auf beiden Seiten der Naht arbeiten zu lassen. Diese Arbeitsweise bietet auch Vorteile hinsichtlich der Verringerung der Verformungen.

Manche Ingenieure mögen sich wegen der Höhe der durch das Schweißen hervorgerufenen inneren Spannungen beunruhigen; doch können wir ihnen sagen, daß genietete Konstruktionen auch nicht frei von inneren Spannungen sind, und daß die Verwendung von Stanzen oder eine schlecht ausgeführte Nietung Spannungen auslösen kann, von denen wir annehmen, daß sie gleicher Art sind wie diejenigen, die sich aus unseren Versuchen ergaben; wir werden uns übrigens um die Untersuchung dieser Spannungen bemühen.

Es liegt Veranlassung vor, die Aufmerksamkeit der Schweißingenieure auf einen besonderen Punkt zu lenken, der die Schweißfähigkeit des für die Konstruktion verwendeten Stahles betrifft. Im Prinzip sind alle handelsüblichen Stähle gut schweißbar; für die Konstruktionen, bei denen es auf größere Sicherheit ankommt, wie z. B. Brücken, empfiehlt es sich jedoch festzulegen, daß der Stahl unter Zugrundelegung der auf diesem Gebiete angestellten Untersuchungen sich zum Schweißen eignet. Andererseits ist es zur Unterscheidung zweier Stahlsorten, die für einen Bau Verwendung finden können, notwendig, derjenigen Sorte den Vorzug zu geben, die nach Überschreitung der Elastizitätsgrenze fähig ist, im Verlaufe eines neuen Zugversuches die größte Dehnung vor dem Bruch auszuhalten. Diese Eigenschaft ist natürlich den mechanischen Eigenschaften, die sich

aus den für diese Art von Schweißarbeiten aufgestellten Vorschriften ergeben, gleichzusetzen.

Es gibt verschiedene Mittel, um die Verformungen zu verringern und zwar insbesondere: die Wahl der Elektrode, die Wahl der Stromstärke für eine gegebene Elektrode und schließlich die Wahl des Elektrodendurchmessers.

Bei der Verwendung von Schweißdrähten von großem Durchmesser und bei hohen Stromstärken erhitzt man eine breite Zone, und der Metallauftrag ist stellenweise bedeutend größer. Da das Werkstück länger warm bleibt, dehnt sich der Stahl und man kann feststellen, daß eine örtliche Schrumpfung von geringerer Bedeutung entsteht. Dies ist darauf zurückzuführen, daß eine breite Zone durch die sehr große Hitze des Lichtbogens geglüht worden ist; dies kann aber auch Nachteile mit sich bringen. Die Wahl des am besten geeigneten Durchmessers der Elektrode bedingt also einige Vorversuche, in dem Sinne, wie wir im Vorliegenden gezeigt haben.

Es gibt schließlich noch eine Art, um die inneren Spannungen zu verringern: es ist dies das Hämmern nach jeder Schweißlage, wobei dieses Hämmern systematisch vorgenommen werden muß, und zwar derart, daß die Werte der Schrumpfung, die zwischen den Merkzeichen abgelesen werden, nach jeder Schweißschicht auf die vorher vorhandenen Werte oder wenigstens angenähert auf diese Werte zurückgeführt werden. Wir haben in unserem Bericht auf dem Kongreß von Rom 1934 gezeigt, daß ein solches Hämmern die inneren Spannungen fast gänzlich aufzuheben gestattet, sofern beachtet wird, daß es mit Vorsicht ausgeführt wird, um ein unnützes Hartschlagen des aufgetragenen Metalls zu vermeiden.

Wir haben andererseits gezeigt, daß ein leichtes Hämmern der Kante der durch Schweißen verbundenen Stücke wirksam dazu beiträgt, die Spannungen zu beseitigen und wir haben genaue Angaben über die für bestimmte Probestücke erforderliche Leistung gemacht.

Die Betrachtung unserer Versuche löst sofort die wichtige Frage nach der Güte des durch die Schweißung aufgetragenen Metalles aus; die Elektrode muß so gewählt werden, daß ein gesunder und homogener Metallauftrag möglich ist, der eine gute Dehnung bei ausgezeichneter innerer Elastizität aufweist. Das aufgetragene Metall muß warm schmiedbar und kalt hämmerbar sein, ohne daß Haarrisse entstehen.

11. *Benutzung des Tensiometers zur Feststellung des Arbeitens einer Fachwerkkonstruktion.*

Wir haben verschiedene Versuche unternommen, um weitere Möglichkeiten zu finden, das Tensiometer nach Art eines üblichen Extensometers zu verwenden. Es ist möglich, daß unser Apparat etwas weniger genau ist als gewisse Extensometer, dafür bietet er aber den großen Vorteil, daß er bei Anwendung der vorgeschlagenen Markierungsmethode und eines Eindrückverfahrens an irgend einem Punkt der Fachwerkkonstruktion angesetzt und in jeder Lage benutzt werden kann.

Wir haben beispielsweise die Schwankungen der Spannungen in einer Diagonalstrebe beim Vorbeifahren eines Zuges ablesen und wir haben feststellen können, daß in einem gewissen Augenblick der Beanspruchungskoeffizient in

einem der Träger um 5 kg/mm² sank, um danach den durch die statische Last gegebenen Beanspruchungskoeffizienten um 7 kg/mm² zu übersteigen. Der Apparat wurde durch die beim Vorbeifahren des Zuges hervorgerufenen starken Vibrationen nicht beeinflußt und wir haben ihn in der Hand oder auf einem kleinen Aufbau (Fig. 3) benutzen können.

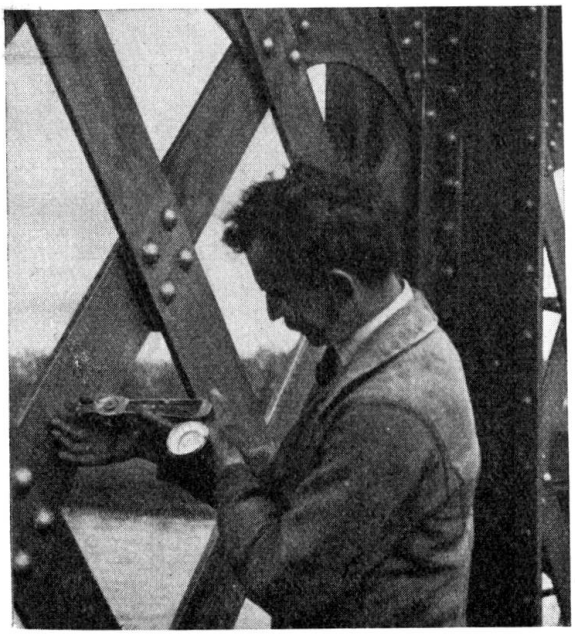


Fig. 3.
Anlegen des Tensiometers an die Meßmarken auf einer Diagonale einer genieteten Brücke, um die während der Überfahrt eines Zuges auf tretenden Spannungsänderungen festzustellen.

Man kann das Tensiometer also dazu benutzen, um den Beanspruchungskoeffizienten in Bauteilen und selbst in Maschinenelementen festzustellen; wir können als Beispiel die Aufzeichnung der Spannungen in einer Presse aus Stahl anführen, wo jeder Arbeitsgang eine Bewegung des Zeigers an der Lehre verursachte, der eine höchste Dauerbeanspruchung von 10—12 kg/mm² anzeigte.

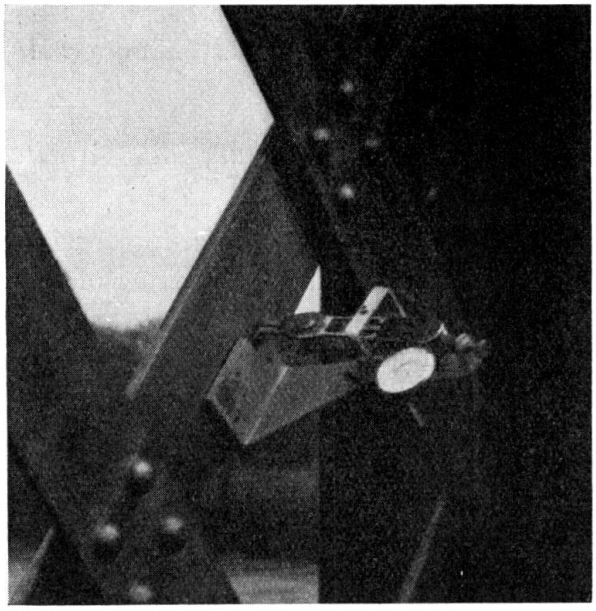


Fig. 4.
Der Tensiometer ist an der Diagonale durch einen Winkel befestigt, dieser gibt dem Instrument eine größere Stabilität.

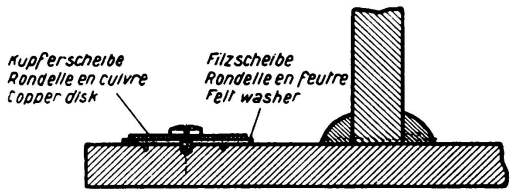
Es wäre also möglich, beim Bau von geschweißten Maschinenrahmen den Ermüdungskoeffizienten von verschiedenen Teilen, die starken Beanspruchungen unterliegen, kennen zu lernen; diese Beanspruchungen sind meistens sehr schwierig zu berechnen, also so ziemlich unkontrollierbar; für solche Teile werden im Konstruktionsbüro immer viel zu starke Querschnitte vorgesehen.

Die Verwendung des Tensiometers würde es in diesem Falle ermöglichen, den Rahmen der Maschine den tatsächlichen Beanspruchungen genau anzugleichen; man könnte dann beim ersten Versuch der Maschine nachprüfen, ob der Ermüdungskoeffizient die vorgesehenen Werte auch nicht überschreitet.

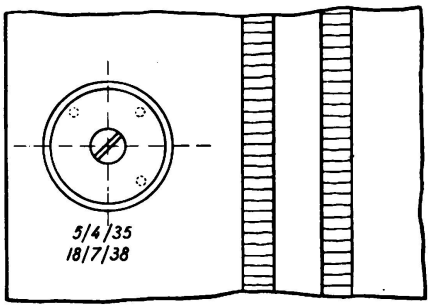
12. *Überwachung der Stahlkonstruktion während ihrer Benutzung.*

Wir sind der Ansicht, daß das Markierungssystem, nachdem das Bauwerk fertiggestellt ist, nicht vernachlässigt werden darf. Wenn man sich die Mühe nimmt, die Eindrückstellen gleich nach Anbringung durch eine sehr einfache Vorrichtung abzudecken, die beispielsweise aus einer Scheibe von ölgetränktem Filz und einer durch eine Schraube befestigten Metallscheibe bestehen kann, so daß die Eindrückstellen gut verdeckt sind, kann man periodisch nach Abdecken und Reinigen der Eindrückstellen neue Messungen vornehmen.

Das Tensiometer wird nach und nach an verschiedenen Stellen einer Konstruktion angesetzt, für die man während der Abnahme des Bauwerkes die Werte zwischen den Marken aufgenommen hat.



Bemerkung: Die Messstellen können beliebig angeordnet werden
Nota: Les pièces peuvent être repérées dans une position quelconque.
Note: The rest-marks can be arranged in any direction.



Angaben des Aufsichtsdienstes.
Indications placées par le service de surveillance.
Periodical inspection mark.

Tafel VII.

Herstellung der Meßmarken an Stahlkonstruktionen zu Kontrollzwecken. Bemerkung: Periodisch wird man Spannungsmesser an die ursprünglichen Meßmarken anlegen, um die vorgesehene Beanspruchung zu überprüfen.

Wenn der Kontrollbeamte alle zwei Jahre neue Messungen vornimmt, so ist er in der Lage anzugeben, ob sich der Ermüdungskoeffizient an der und der Stelle des Bauwerkes in gefährlicher Weise verändert hat; man wird dann erkennen können, ob einzelne Teile des Baues sich in einem Zustand befinden, der, ohne die Sicherheit des Bauwerkes zu gefährden, doch die besondere Aufmerksamkeit der Fachingenieure verdient.

Wir hoffen, daß diese kleine Abhandlung zur Entwicklung der Lichtbogenschweißung beitragen wird; wir glauben nämlich, daß die betreffenden Schweißingenieure dann die das Schweißverfahren beherrschenden Faktoren besser kennen lernen und andererseits die Vorteile dieses Verfahrens voll erkennen und seine Anwendung wärmer empfehlen werden.

Zusammenfassung.

Der Verfasser beschreibt in dieser Arbeit ein Gerät eigener Erfindung, das Verformungen zu messen gestattet und auf dem Grundsatz des Vergleiches beruht. Er bringt vor der Schweißung Festpunkte an, in die vor und nach der Ausführung die Spitzen seines Dehnungsmessers gesetzt werden. Der Bericht enthält die Beschreibung von ausgeführten Versuchen an verschiedenen Schweißverbindungen. Die Verlängerungen durch Erwärmung und Abkühlung werden gleichlaufend und senkrecht zur Schweißnaht aufgenommen und als Schaubilder aufgetragen.

Der Verfasser führt die Spannungen in Abhängigkeit des Abstandes von der Naht auf, die mit den Verlängerungen leicht bestimmt werden können.

Der Dehnungsmesser nach *R. Sarazin* kann sehr gut für Messungen an ausgeführten Bauten verwendet werden. Er bietet gegenüber ähnlichen Ausführungen den Vorteil einer sehr einfachen Verwendung; man kann ihn ohne jede Befestigung auf den zu untersuchenden Stab setzen. Die Fixpunkte können durch eine geölte Filzscheibe und eine metallische angeschraubte Scheibe zugedeckt werden; das gestattet eine regelmäßige Ausführung neuer Messungen.

IIIb 2

Ausbildung und Herstellung geschweißter Bauten.

Projet et exécution des ouvrages soudés.

Design and Execution of Welded Structures.

A. Bühler,
Sektionschef für Brückenbau S.B.B., Bern.

I. Wesen und Messung der Wärme- und Schrumpfspannungen.

1. *Das Wesen der Wärme- und Schrumpfspannungen.*

Bei der Ausbildung und Herstellung geschweißter Bauten beanspruchen die durch den Schweißvorgang erzeugten Wärmespannungen und die in der Folge durch die Abkühlung entstehenden Schrumpfspannungen besondere Aufmerksamkeit. Beim Schweißen einer Naht muß örtlich eine verhältnismäßig große Wärmemenge zugeführt werden, damit die zu schmelzenden Teile des Baustoffes und der Schweißdrähte sich verbinden.[1]

Beim Erwärmen dehnt sich der die Naht umgebende Baustoff aus, während der weiter abliegende, eher kühl bleibende Baustoff die Ausdehnungsvorgänge behindert. In der Nähe der Naht entsteht daher eine Druckbeanspruchung und Stauchung des Baustoffes, begünstigt durch die Erhitzung, während der übrig bleibende Querschnitt eines Stabes Biegungs- und Zugspannungen erleidet und in Grenzfällen allenfalls sogar gereckt werden kann.

Beim Abkühlen einer heißen Naht und des sie umgebenden Baustoffes leisten die weiter abliegenden, kühleren Stabteile nach Rückgang der Biegungs- und Zugspannungen nunmehr entgegengesetzten Widerstand, so daß im fertigen Stab die Nahtzone schließlich in der Hauptsache unter Zug, die Restzone dagegen unter entsprechenden Druck zu stehen kommt. Durch exzentrische Lage einer Naht inbezug auf die Stabaxe oder durch die stets vorkommenden ungleichen Erwärmungen können sich beträchtliche Verschiedenheiten sowie Störungen und Änderungen in den Spannungsbildern ergeben. Von einer linearen Spannungsverteilung kann nicht mehr die Rede sein, besonders in der Naht und ihrer Umgebung.[2]

Ferner werden in der Naht selbst und bei den Übergängen von den Nahtzonen zum Baustoff bleibende Formänderungen auftreten. Teile des Baustoffes werden gestaucht und hernach wieder gereckt. Die beim Schweißen auftretenden, oft

---

[1] *Wörtmann*: Schweiz. Bauzeitung 5. XI. 1932. Übertragene Wärmemenge 1150 k cal/kg Schweiße; sie muß aber abhängig sein von der Anzahl Schweißlagen und der Masse der zu verschweißenden Teile.

[2] *Bierett:* Versuche zur Ermittlung von Schrumpfspannungen. Z. V. d. I. 9. VI. 34.

erheblichen Verformungen der Stabteile beweisen das Eintreten großer innerer Spannungen.[3]

Dieses Bild bleibt im allgemeinen dasselbe, wenn einzelne Teile zu Trägern und einzelne Stäbe zu Fachwerken vereinigt werden. Es kommen aber im letzteren Falle zu den erwähnten inneren Spannungen noch weitere Spannungen dazu, die sich aus der gegenseitigen Behinderung der Längenänderungen der Träger und Stäbe entwickeln. Dieser Umstand ist besonders bei der Verstärkung von Brücken zu beachten.

Es ist klar, daß sich bei einer solchen Sachlage die Wärmespannungen und die sich hernach entwickelnden Schrumpfspannungen nur annähernd bestimmen lassen und zwar auch aus dem Grunde, weil die Formänderungen zum Teil im

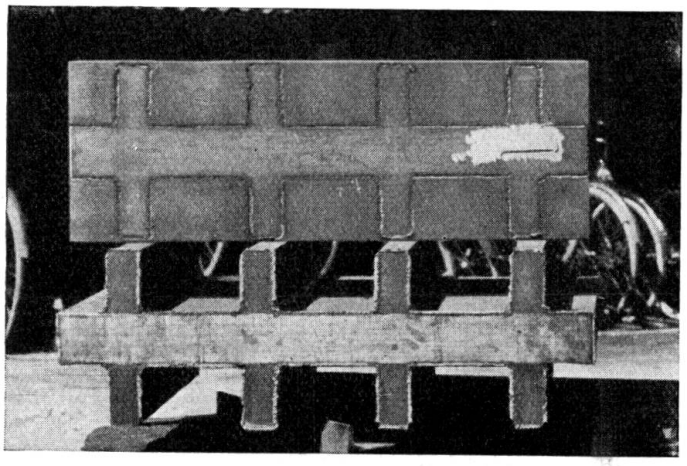


Fig. 1.

Mißlungener Versuch des Aufschweißens einer Schienenstahlplatte auf St. 37. Nach dem Erkalten brachen die Schweißnähte aus dem hochgekohlten Stahl aus.

Gebiete der Plastizität liegen. Es ist daher nicht überraschend, daß die beim Schweißen zur Verwendung gelangenden Baustoffe große Dehnungsfähigkeit haben müssen, wenn Risse vermieden werden wollen (Fig. 1).

Allenfalls können die Bauteile nach dem Schweißen mehr oder weniger erhitzt oder ausgeglüht werden, mit nachfolgendem langsamem Erkalten, um die Spannungen zu vermindern oder auszulöschen. Doch sind diese beiden Verfahren nicht oft anwendbar und bei den kleineren Werkstätten, die sich in erster Linie der Schweißverfahren bedienen, meistens undurchführbar[4]. Sind es doch gerade die kleinen und mittleren Unternehmungen, die sich am meisten des elektrischen Schweißens bedienen, weil die Vorrichtungen dazu nicht sehr kostspielig und stets rasch bereit sind.

Unter Umständen kann bei dicken Werkstücken das Schweißen in warmem

[3] *Reinhold* und *Heller:* Die Schrumpferscheinungen an der elektrisch geschweißten Schlachthofbrücke in Dresden. Bautechnik 21. X. 1932.

[4] Die bis zu 45 mm starken Rohre der Druckleitung des Etzelwerkes werden geglüht bei einer Temperatur von etwa 625°, die während 26 Stunden konstant zu halten ist. Dadurch sollen die durch das Schweißen verursachten inneren Spannungen und die ungünstige Gußstruktur der Schweißnähte (Widmannstätt'sches Gefüge) zum Verschwinden gebracht werden. Auch die Rundnähte, die auf dem Bauplatz herzustellen sind, werden ausgeglüht.

Zustande (100° bis 300°) von großem Vorteil sein.[5] Wenn das Erwärmen für die Arbeiter nicht mit Unzuträglichkeiten verbunden wäre, dürfte das Schweißen im warmen Zustande die Schrumpfspannungen erheblich herabzusetzen vermögen.

2. *Vorrichtungen zur Messung der Wärme- und Schrumpfspannungen.*

Die Messung der *Wärmespannungen* ist meines Wissens bis anhin noch selten durchgeführt worden, weil es schwierig ist, in der Nähe der Schweißstelle mit feinen Meßvorrichtungen zu arbeiten und weil infolge des Wärmeaustausches mit der Luft und des Wärmeflusses im Stabe selbst der Spannungszustand sich fortwährend und rasch ändert. Immerhin könnten an den zu schweißenden Stäben mittels Dehnungsmessern die sich abspielenden Vorgänge einigermaßen verfolgt werden.

Wesentlich für den Entwerfenden eines Bauwerkes sind indessen die nach dem Wärmeausgleich mit der Umgebung verbleibenden Schrumpfspannungen. Diese können auf verschiedenen Wegen annähernd festgestellt werden, nämlich durch:

a) Messung der Abstandänderung zweier Marken vor und nach dem Schweißvorgang,
b) Anbohrungen und Messung der dabei entstehenden Dehnungen in dem umgebenden Baustoff (Mathar)[6],
c) Messung der Gitterabstände durch das Röntgenverfahren,[7]
d) Zerlegen des Prüfstückes und Messung der Dehnungen der Einzelstücke,
e) Lackierverfahren (vernis adhérent fragile).[8]

Die Verfahren a, b, c und e können als zerstörungsfrei gelten, während beim Verfahren d das Prüfstück unbrauchbar wird. Das Verfahren c ist überdies noch unentwickelt und das Verfahren e ist nur für diejenigen Zonen anwendbar, die nicht stark erhitzt werden.

Wir selbst haben uns des Verfahrens a bedient, das einfach ist und auch von Leuten, die im Messen weniger geübt sind, benützt werden kann.

Keines dieser Verfahren dürfte vollkommen sein; allen haftet der Nachteil an, daß sie über die im Innern eines Stabes verbleibenden Schrumpfspannungen keinen zuverlässigen Schluß zulassen. Selbst beim Zerlegen eines Prüfstückes kann voraussichtlich trotz eingehender Vorkehren mit Sicherheit auf die Größe der inneren Spannungen nicht genau geschlossen werden. Die Meßverfahren bleiben daher vorderhand in der Hauptsache auf die Feststellung der Dehnungsverhältnisse an der Oberfläche eines Prüfstückes beschränkt, werden aber dennoch für die praktischen Zwecke guten Aufschluß zu geben vermögen.

Für die Messung der Schrumpfspannungen muß ein Dehnungsmesser gewählt werden, der nicht wie die üblichen Dehnungsmesser während der Verformung am Bauteil belassen, sondern jeweilen vor und nach der Verformung am zu messenden Oberflächenfeld angesetzt wird.

---

[5] Mitteilungen der Escher-Wyß A.G., Nr. 5, Mai 1928.

[6] *Müllenhoff:* Eigenspannungen in Schweißnähten, Elektroschweißung Heft 6, 1935.

[7] Röntgenographische Feinuntersuchungen an Brückentragwerken, Schweizerische Bauzeitung, 12. I. 1935.

[8] Verfahren von *Portevin*, Génie civil 8. II. 1934, Maybach, Motorenfabrik, Friedrichshafen.

Das Belassen des Dehnungsmessers am Bauteil während dessen Verformung kommt deshalb in der Regel nicht in Frage, weil dies zu lange dauern würde und die Anzeige des Dehnungsmessers während des Schweißens am Bauteil durch Hitze, Schläge oder Unachtsamkeit des Schweißers gefälscht würde und der Dehnungsmesser selbst Schaden leiden könnte.

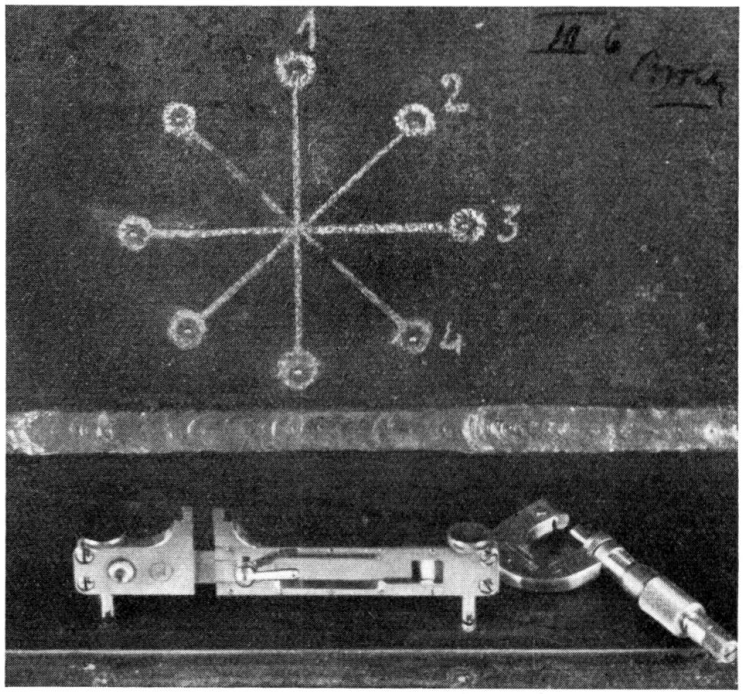


Fig. 2.

Setzdehnungsmesser System Meyer.

Die Forderung, den Dehnungsmesser während der Verformung nicht am Bauteil belassen zu müssen, erfüllt der Setzdehnungsmesser System Meyer (Fig. 2).

Das Messen mit dem Setzdehnungsmesser hat außerdem den Vorteil, daß zum Messen aller Meßstellen nur *ein* Meßgerät benötigt wird.

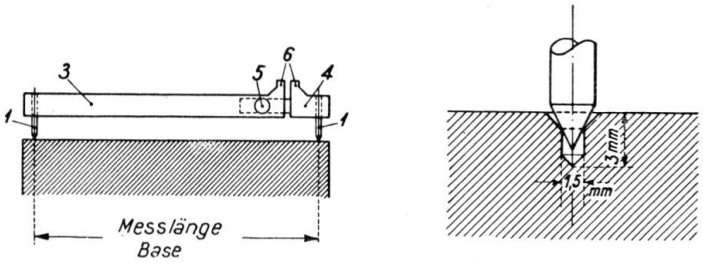


Fig. 3.

Zum Meßvorgang mit dem Setzdehnungsmesser.

Der Meßvorgang ist folgender (vergl. Fig. 3): Die Meßlänge wird durch die Spitzen (1) bestimmt, die im Bauteil durch zwei mit Versenkung versehene Löcher festgelegt werden. Der Setzdehnungsmesser, der aus zwei ineinander verschiebbaren Stäben (3) und (4) besteht, wird vor und nach der Verformung mit

den Spitzen (1) in die Löcher am Bauteil gesetzt. Nach dem Einsetzen der Spitzen in die Löcher werden die Stäbe mittels der Schraube (5) festgelegt und der Abstand der Meßbacken (6) mit einem Mikrometer gemessen. Nach einiger Übung erhält man eine Meßgenauigkeit von $\pm$ 1 bis $^2/_{1000}$ mm. Es wurde absichtlich davon abgesehen, die Dehnungsänderungen vermittels einer Meßuhr zu messen, um nicht unüberprüfbare Fehler hineinzubringen. Zur Prüfung des Setzdehnungsmessers wird ein Vergleichsstab verwendet. Der Bestand der kleinen Bohrungen kann in einfacher Weise und auf lange Zeit so gesichert werden, daß sie gut eingefettet und mit einem Verbandstreifen zugeklebt werden.

II. Durchgeführte Messungen.

1. *Aufschweißen von Lamellen auf Walzträgern.*

An zwei schweren Trägern Nr. 100 DIV, die zum Bau der Betondecke für die 20 m weite Unterführung der Rue Voltaire in Genf bestimmt waren und bei denen die Untergurte durch je eine Lamelle 260×20 mm verstärkt werden

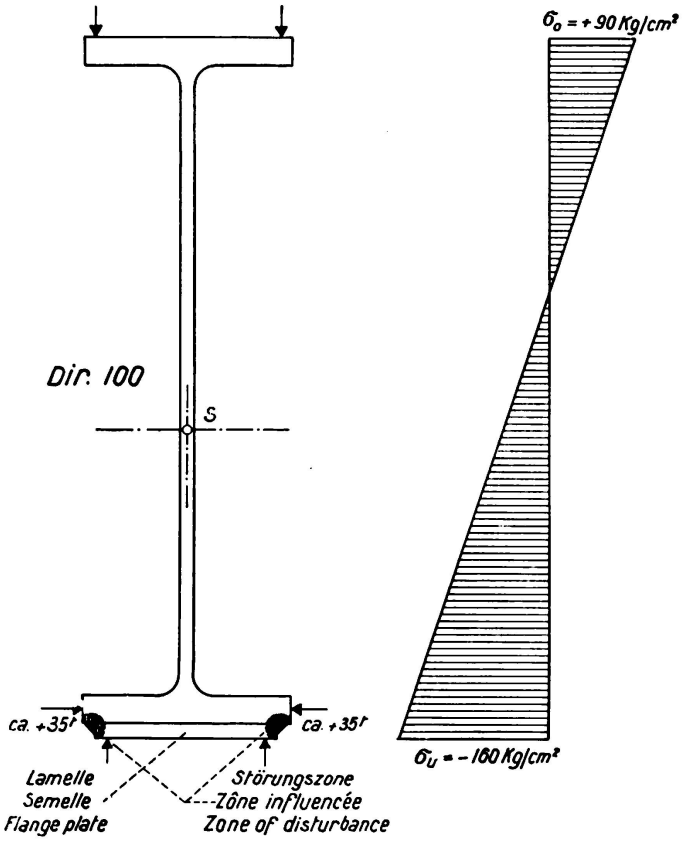


Fig. 4.

Störungszone bei den Trägern der Unterführung der Rue Voltaire in Genf.

mußten, wurden Ende des Jahres 1929 die Dehnungen an verschiedenen Stellen gemessen.

Es ergab sich, daß der von der Schweißung nicht unmittelbar beinflußte Obergurt, in 5 Schnitten gemessen, unter eine mittlere Spannung von + 90 kg/cm² zu stehen kam. Daraus ergibt sich, daß längs den beiden Schweißnähten eine

Kraft von etwa 70 t wirken muß, das heißt, infolge der Ausführung der Kehlnähte, also der dabei entstandenen Erhitzung und nachfolgenden Schrumpfung, verkürzt sich die Kehlnaht und der umgebende Baustoff so, daß zwischen diesen gestörten und den übrigen ungestörten Zonen eine Störungskraft von je 35 t auftritt (Fig. 4).

Es ist klar, daß die gestörten Zonen auf diese Weise unter sehr hohe Zugspannungen versetzt werden und darum auch bei Ermüdungsversuchen leicht anbrechen, was den frühzeitigen Bruch des ganzen Trägers zur Folge haben kann.

Die Dehnungsmessungen in der Nähe der Kehlnähte ergaben Druckspannungen von 160 kg/cm² im Mittel, was annähernd ebenfalls auf die Störungskräfte von 2×35 t führt. Es ist indessen nicht ganz sicher, ob die bei den Kehlnähten ausgeführten Messungen nicht bereits in die Störungszonen selbst fielen, womit die Druckspannungen zu klein erhalten würden.[9]

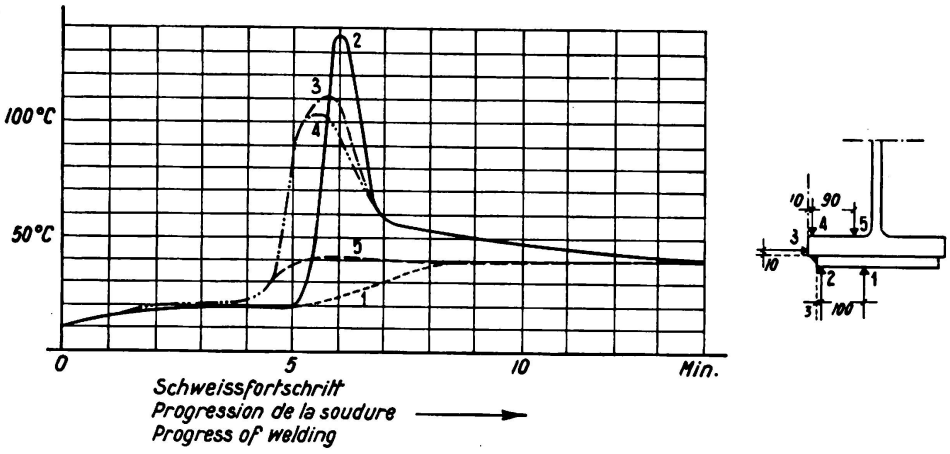


Fig. 5.

Messung mit Thermoelementen an den Trägern der Unterführung der Rue Voltaire in Genf.

Messungen mit Thermoelementen an den Trägern und den Lamellen bei der Ausführung der ersten Raupe der Kehlnähte ergaben den in Fig. 5 dargestellten Verlauf, woraus die örtliche heftige Wärmewirkung zum Ausdruck kommt.

2. *Herstellung einer vollwandigen Bahnbrücke.*

Anläßlich der Erstellung der ersten vollwandigen geschweißten Bahnbrücke auf der Linie Beinwil—Reinach im Jahre 1934 wurden verschiedene Messungen in der Werkstätte durchgeführt, um die Schrumpfspannungen festzustellen. In verschiedenen Schnitten wurden die Dehnungen nach dem Schweißen der Kehlnähte festgestellt (Fig. 6).

Es kann aus den Messungen geschlossen werden, daß die Störungskraft die Größenordnung von 30 bis 60 t haben dürfte, indem aus den Randspannungen der Gurtlamellen (-350×45 und -350×30) auf mittlere Beanspruchungen von 200 bis 450 kg/cm² geschlossen werden kann. Im Stehblech konnte keine regelmäßige Verteilung der Dehnungen festgestellt werden. Es ist dies insofern

[9] *Bierett:* Versuche zur Ermittlung der Schrumpfspannungen in geschweißten Stumpfnahtverbindungen. Vortrag vor dem Fachausschuß für Schweißtechnik V. d. I. 1934.

verständlich, als der Wärmefluß beim Schweißen in erster Linie in die Lamelle und nur zum kleinen Teil in das Stehblech übergeht. Zudem ist das verhältnismäßig dünne Stehblech leicht großen Verbiegungen ausgesetzt. Immerhin erleidet dieses, wo keine anderweitigen Schweißungen einen Einfluß ausüben, ausgesprochene und örtlich sehr hohe Druckbeanspruchungen (bis 1700 kg/cm²). Die

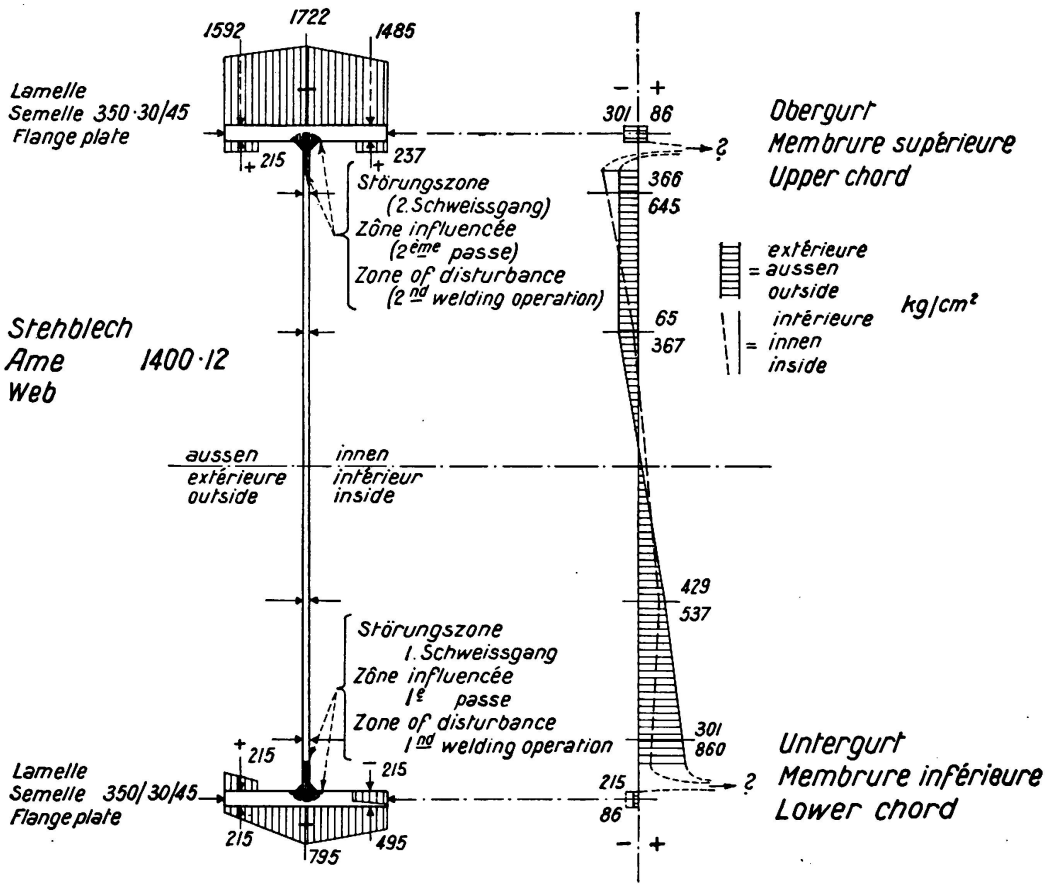


Fig. 6.

Messung von Schrumpfspannungen bei einer Vollwandbrücke der Linie Beinwil-Reinach. (Ergebnisse in einem Schnitt).

Messungen der gesamten Verkürzungen der Träger ergaben rund 0,022 cm/m, was einer Spannung von $\frac{0{,}022}{100} \cdot 2\,150\,000 = 430$ kg/cm² entspräche und mit den oben angegebenen größten Störungskräften in Übereinstimmung stände. Bei einer Stellwerkbrücke konnte sogar ein Schrumpfmaß von $1\,^0/_{00}$ festgestellt werden, was einer mittleren Trägerspannung von 2150 kg/cm² entspräche.

In den Störungszonen steigen natürlich die den Druckspannungen das Gleichgewicht haltenden Zugspannungen auf sehr hohe Werte. Schätzt man diese Zone auf etwa 20 bis 25 cm², so ist die Schweißnaht und der benachbarte Baustoff bis und über die Streckgrenze beansprucht. Bei mehrseitig durch ungestörten Baustoff umschlossenen Schweißnähten dürfte die Gefahr des Einreißens der Störungszone bei Dauerversuchen geringer als bei Randkehlnähten sein. Hierauf wird auch das gute Verhalten von geschweißten Biegeträgern vorstehender Bauart bei Dauerversuchen zurückzuführen sein.

3. *Verstärkung einer schweißeisernen Fachwerkbrücke.*

Anläßlich der Verstärkung einer Reihe gleich ausgebildeter schweißeiserner Brücken der Brüniglinie (Luzern—Interlaken) im Jahre 1934 (Fig. 7) stellten wir uns die Aufgabe, näherungsweise festzustellen, welchen Einfluß die Ausführung der Schweißungen auf die Bauteile besitze. Sodann wurde 5 Monate nach beendigter Schweißung eine nochmalige Messung an denselben Orten durchgeführt, um erkennen zu können, ob der vielfach behauptete Ausgleich der Störungskräfte durch den Betrieb sich vollziehe.

Was zunächst die durch das Anschweißen von Verstärkungsteilen hervorgerufenen Schrumpfspannungen anbelangt, wurden diese je am Obergurt, Unter-

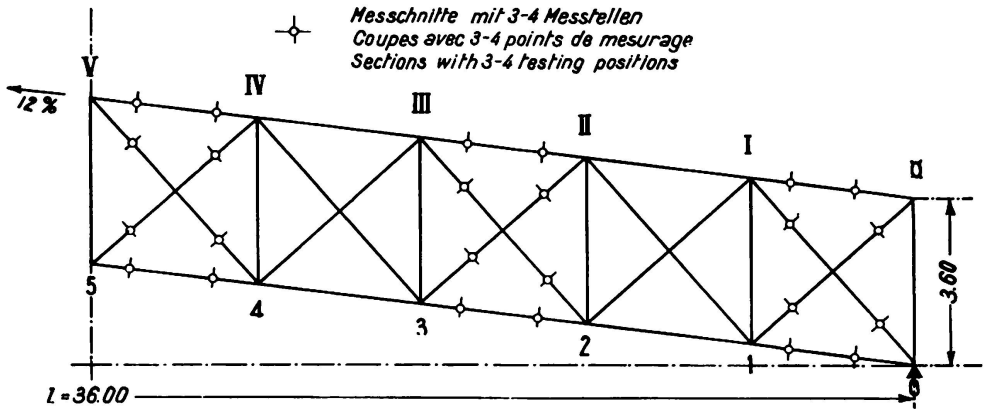


Fig. 7.

Trägernetz und Meßorte der schweißeisernen Brücken der Brüniglinie.

gurt und den Kreuzstreben von 3 Feldern, sowie an zwei Pfosten ermittelt. Je am Ende dieser Stäbe wurden 3 bis 4 Meßstellen am alten Querschnitt verteilt angebracht. Messungen an den neuen Verstärkungseisen wurden nicht durchgeführt, von der Erwägung ausgehend, daß diese Zusatzteile durch das Anpassen selbst hohe Spannungen erhalten, die nicht leicht ausgeschaltet werden könnten. Es hat sich allerdings herausgestellt, daß es sehr aufschlußreich gewesen wäre, wenn solche Meßstellen einbezogen worden wären.

Die Messungen (Fig. 7) ergaben, daß infolge der durch das Schweißen eingetretenen Stabverkürzungen und durch die statisch unbestimmte Anordnung des Fachwerkes auch diejenigen Stäbe unter Spannung versetzt wurden, an denen nicht geschweißt wurde. Die mittleren Schwerpunktsspannungen aus beiden Endschnitten gemittelt, betragen bei größten Kantenspannungen von 840 kg/cm²:

		erste	*zweite**	
		Messung		
Obergurtstab . .	0—I	— 47	— 113	unverstärkte Stäbe
Untergurtstab .	0—1	— 40	— 75	
Zugstrebe . . .	0—1	+ 84	+ 133	
Zugstrebe . . .	II—3	+ 221	+ 265	
Pfosten	1—I	— 304	— 250	
Pfosten	2—II	— 461	— 380	

Bei den unverstärkten Stäben, wie übrigens auch bei den verstärkten, sind die Spannungsbilder sehr verwickelt. Der Anschauung entsprechend sind die Gurte und Pfosten unter Druck versetzt und die Zugstreben auf Zug beansprucht worden.

Bei den verstärkten Bauteilen lassen sich die Störungskräfte aus den Dehnungen nicht einwandfrei berechnen. Die Messungen zeigen indessen, daß auch in diesen Stäben große Schrumpf- und Biegungsspannungen erzeugt wurden. Die mittleren Schwerpunktsspannungen betragen etwa (Mittel aus je 2 Endschnitten):

			erste	*zweite**	
			Messung		
	Obergurt . . .	II—III	—127	— 82	verstärkte Stäbe
	Obergurt . . .	VI—V	—300	—162	
	Untergurt . . .	2—3	—165	—220	
	Untergurt . . .	4—5	—152	—150	
(Werte geschätzt)	Druckstreben . .	0—I	—400	—400	
	Druckstreben . .	2—III	—500	—500	
	Druckstreben . .	4—V	—500	—500	
	Wechselstrebe .	IV—5	—600	—600	

Nach Ablauf einer Betriebszeit von 5 Monaten wurden die Dehnungen erneut gemessen (* 2. Messung) und festgestellt, daß Änderungen wohl eingetreten waren, die sich aber sowohl in Ab- als auch in Zunahmen der Spannungen bemerkbar machten. Eine Regel läßt sich aus den gewonnenen Ziffern nicht herleiten. Es scheint verfrüht zu sein, jetzt schon der Hoffnung Ausdruck zu geben, daß mit der Zeit ein Spannungsausgleich in der Störungszone eintreten werde.

4. *Herstellung einer gekrümmten, vollwandigen Bahnbrücke.*

Im Jahre 1936 wurde bei Baden/Oberstadt eine 27 m weit gespannte, sehr schiefe, gekrümmte Bahnbrücke in geschweißter Ausführung erstellt, bei der die Querschwellen unmittelbar auf den vollwandigen Hauptträgern liegen. Die Brücke wurde als räumliches Tragwerk berechnet unter Berücksichtigung der Schiefe, weshalb der obere und untere Windverband sehr kräftig ausfielen. An den spitzen Enden des Überbaues ergaben sich negative Auflagerdrücke, weshalb verankerte Lager angeordnet werden mußten.

In einem Feld des einen Hauptträgers wurden Körner angebracht und nach dem Ausschweißen der Kehlnähte zwischen Lamellen und Stehblech die Formänderungen des Stehbleches und einige Dehnungen am Stehblech und an den Lamellen gemessen (Fig. 8 und 9). Die Ergebnisse waren folgende:

In beiden Gurtungen treten Druckspannungen auf und zwar sind diese in der zuerst geschweißten Untergurtung geringer, im Mittel 325 kg/cm², indem sie durch das Aufschweißen des Obergurtes entlastet wurden. Der Obergurt steht unter einer Spannung von etwa 675 kg/cm² im Mittel.

Im Stehblech ergaben sich ebenfalls unerwartet hohe Spannungen bis zu 950 kg/cm².

Eine schlimme Erscheinung zeitigte das Aufschweißen der Lamellen auf die

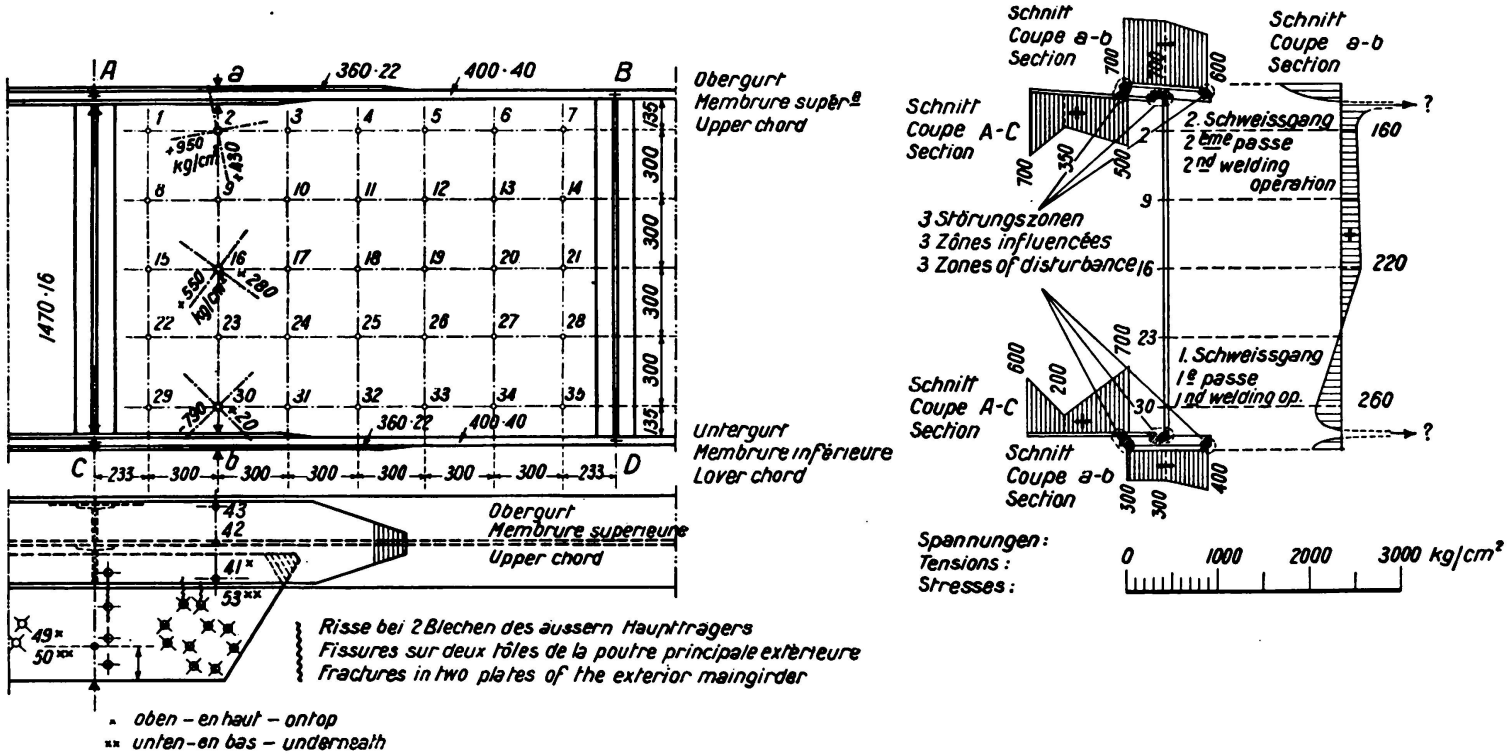


Fig. 8.

Meßstellen und Darstellung der Spannungen des inneren Hauptträgers.

Stehbleche. Zuerst wurden nämlich die Knotenbleche der Windverbände auf die Gurtplatten geschweißt und daraufhin erfolgte die Verschweißung mit dem Stehblech. Da die Windverbände vernietet sind, erhielten die Knotenbleche entsprechende Bohrungen. Bei näherer Prüfung ergab sich, daß einzelne Knotenbleche Risse aufwiesen, die durch Bohrungen gingen. Die Dehnungsmessungen zeigen die starke exzentrische Wirkung auf die Knotenbleche, wo bedeutende Zugspannungen herbeigeführt wurden.

Was die Formänderungen des Stehbleches anbelangt, so fielen sie beträchtlich aus, was aber nach den erwähnten Spannungen nicht verwunderlich ist. Die

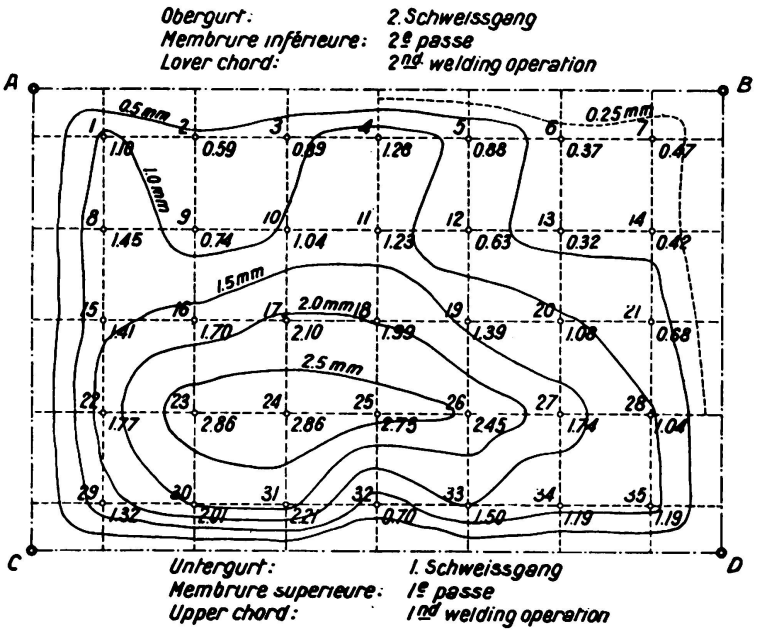


Fig. 9.

Schrumpfspannungen bei der Herstellung einer gekrümmten, vollwandigen Bahnbrücke. Verformung des Stehblechs. Isoflexien.

größte Ausweichung ergab sich zu 2,9 mm und zwar gegen den zuerst geschweißten Untergurt zu. Bei diesem Zustande war die andere Stehblechkante nur unvollkommen durch Heftschweißungen gehalten.

Die Schrumpfspannungen in den Gurtungen fielen im vorliegenden Falle auch darum groß aus, weil nicht nur eine Schweißnaht, sondern deren drei bei jeder Gurtung vorhanden sind, womit 3 Störungszonen zustande kamen, die entsprechenden Zugkräften (aus Schrumpfung) unterworfen sind und den Träger unter starken Druck setzen.

5. *Ausblick auf umfassende Messungen.*

Auf Grund der kaum als günstig anzusehenden Ergebnisse der vorstehend kurz berührten Messungen kann es keinem Zweifel unterliegen, daß zur Abklärung der Frage der Wärme, wie auch besonders der Schrumpfspannungen, viel mehr als bisher getan werden sollte. Die durch das Schweißen erzeugten Spannungen sind sehr groß und können bei dynamisch stark beanspruchten Bauten unter Umständen die Sicherheit eines Bauwerkes gefährden.

Für den Entwurf geschweißter Bauten wäre es von großer Bedeutung, einwandfreie, genaue Ergebnisse von systematischen Messungen der Wärme- und Schrumpfspannungen an verschiedenen Profilen, Trägern und dergleichen zu besitzen, um sich schon beim Entwurf von den beim Schweißen auftretenden zusätzlichen Spannungen ein Bild machen zu können.

Am zweckmäßigsten wäre es, zuerst die Verformungen ungleichmäßig erwärmter oder unterkühlter Flacheisen zu untersuchen und hierauf die Wirkung von mittig und außermittig auf solche Eisen aufgebrachter Schweißnähte verschiedener Größe zu prüfen.

Anschließend hieran käme die Untersuchung von Flacheisen verschiedenen Querschnittes an die Reihe, die durch Längsnähte zu verbinden wären und schließlich müßten auch zusammengesetzte Profile, wie Träger und Stäbe mit und ohne Versteifungen geprüft werden. Der genaueren Feststellung der Störungszonen wäre die größte Aufmerksamkeit zu schenken.

Nach meiner Auffassung ließen sich hiebei äußerst wertvolle Ergebnisse gewinnen und auch die sich widersprechenden Aussagen nachprüfen, ob es richtiger sei, mit dünnen oder dicken Elektroden zu schweißen und welchem Vorgehen beim Schweißen der Vorzug gegeben werden müsse.

Soweit die Probestäbe zur Prüfung nicht zerstört werden müßten, wären sie statisch und dynamisch zu erproben.

III. Ausbildung geschweißter Bauten.[10]

1. *Statische Festigkeit und Ermüdungsfestigkeit geschweißter Bauteile.*

Wer die Einführungszeit und die nachfolgende stürmische Entwicklung in der Herstellung geschweißter Bauten miterlebt hat, wird sich noch gut erinnern, daß man eine Elektrodenmarke umso höher hätte bewerten sollen, je höher die Ergebnisse der gewöhnlichen Zugprobe ausfielen. Heute erreichen die meisten Elektroden bei sachgemäßem Verschweißen in einer Stumpfnaht bei einer statischen Erprobung die Festigkeit des Baustoffes, oder je nach der Form des Probestabes noch mehr. Es ist mehr eine Frage der Form des Prüfstabes geworden, welche Festigkeit zur Bedingung zu machen sei.

Eine Ernüchterung in der Beurteilung der Sachlage erfolgte beim Bekanntwerden der dynamischen Festigkeit der geschweißten Verbindungen. Es zeigte sich nämlich bald, daß nicht allein das Schweißgut für die Widerstandsfähigkeit maßgebend sei, sondern ebenso sehr die Anordnung (Stumpf- und Kehlnähte, Größe und Schärfe der Störungszone), Ausführung (dünne, dicke Elektroden, Kerben) und Form (überhöhte, volle oder hohle Naht) einer Schweißnaht. Diese drei Gesichtspunkte werden indessen noch heute von den Beteiligten zu wenig gewürdigt. Die Ursache hiezu bilden wohl die Veröffentlichungen über Versuche, bei denen die erwähnten Umstände nicht angegeben wurden, so daß deren Einfluß nicht abgeschätzt werden kann.

Schließlich frägt es sich, ob nicht Schweißdrähte gefunden werden könnten,

---

[10] Die elektrische Schweißung im schweizerischen Stahlbau. Internat. Kongreß für Stahlbau, Lüttich, 1930. Ossature métallique Nr. 11, 1935.

deren Zusammensetzung günstigere Übergangszonen der Nähte als bisher ermöglichen und das Auftreten von Kerben verhindern würden.

Trotz der Bekanntgabe einer bereits unabsehbar gewordenen Menge Versuchsergebnisse ist es schwierig, wenn nicht unmöglich, die Wöhlerlinien für die verschiedenen Spannungsgrenzen und Beanspruchungsarten anzugeben, aus denen erst die Kurven der zulässigen Spannungen in der zumeist gewählten *Goodmann*schen Darstellung[11] in einwandfreier Weise gewonnen werden könnten. Diese Spannungsbilder werden überdies verschieden, je nach der Anzahl der bis zum Bruch angenommenen Wechsel, wobei auch die Querschnittsform einen Einfluß ausübt.

Während 2—3 Millionen Wechsel bei den Hauptträgern größerer Brücken bereits einer ziemlich langen Betriebszeit entsprechen, ist diese Anzahl für die Fahrbahnteile gering, so daß man viel besser, als es bis heute geschehen ist, über diese Verhältnisse unterrichtet sein sollte. Es wäre ein dankbares Feld für die Materialprüfungsanstalten, systematische auf einer Gemeinschaftsarbeit beruhende Versuche durchzuführen, um die grundlegenden Materialfestigkeiten bald in vollständiger Weise vermitteln zu können. Dabei wäre es nicht nötig, neben den Stumpfnähten noch Kreuzstöße, sowie Kehlnähte an verlaschten Stößen zu prüfen, da diese bei Zugstößen schlecht sind und in der Praxis für solche Zwecke nicht verwendet werden sollten. Vielmehr wäre es erwünscht, daß Nachbildungen ganzer Bauteile also der Wirklichkeit entsprechende Formen geprüft würden. Hierbei müßten die Probekörper so bemessen sein, daß die in der Praxis benötigten Materialfestigkeiten sich einwandfrei bestimmen lassen (wie Zug, Druck, Schub, Biegung, Verdrehung, Einfluß der Querschnittsformen). Dabei muß die *Güte der Ausführung der Schweißung* genau festgelegt werden.

Es ist auch darauf hinzuweisen, daß die Nähte nicht nur als Stoß- und Verbindungsmittel, sondern auch in ihrer Wirkung und nach Größe und Form auf den durchgehenden Baustoff bei bloßen Anschlüssen dringend der Untersuchung bedürfen, wie z. B. bei Pfosten vollwandiger Träger, Anschlüssen von Windverbandblechen und dergleichen. Im weitesten Sinne des Wortes sollten die sehr wichtigen Formziffern nachgewiesen werden.[12]

Um zu zeigen, daß z. B. Zugverbindungen durch Kreuzstöße nicht deswegen schlecht sind, weil sie mehr oder weniger gut geschweißt wurden, haben wir ebenfalls derartige Versuche machen lassen und daneben solche mit gleichgeformten, aber aus vollem Blech herausgearbeiteten Probestücken. Während die statischen Proben bei geschweißten Stücken etwas schlechter ausfielen als bei einteiligen Proben, verschwand der Unterschied im Kraftpulsator, womit der Beweis erbracht ist, daß diese Verbindungsart auf Zug grundsätzlich schlecht ist.[13] Dasselbe könnte auch an entsprechenden Probestücken mit verlaschten Stößen bei Stirn- und Flankennähten gezeigt werden, wie diese oft in Vorschriften als maßgebende Proben angenommen sind.

---

[11] *Dustin:* Considérations sur l'endurance des assemblages soudés, Revue universelle des Mines, décembre 1935.

[12] *Thun:* Zur Frage der Formziffer, Z. V. d. I., 26. X. 1935.

[13] Die Probenergebnisse waren auf die Anliegeflächen der Nähte bezogen. Statische Proben 22 bis 26 kg/mm²; $\frac{P}{2}$/P 14 kg/mm²; 0/P 10 kg/mm². Versuchsbericht vom 25. IV. 1934.

2. *Nahtformen.*

Zur Abklärung einzelner obengenannter Fragen haben wir seit einigen Jahren zunächst den Einfluß der Nahtform auf die Festigkeit von Verbindungen und Stäben verfolgt. Zur Ergänzung der im vorstehenden Abschnitt gemachten Darlegungen führen wir eine Untersuchung an über den *Einfluß der Lage und der Form von Kehlnähten auf den Baustahl 37 bei Anschlüssen von Versteifungen, Rippen usw.*

Das Versuchsprogramm dazu ist im Juni 1934 aufgestellt worden. Es wurde vorgesehen, an ungestoßenen Flacheisenstäben von 15 mm Dicke den Einfluß

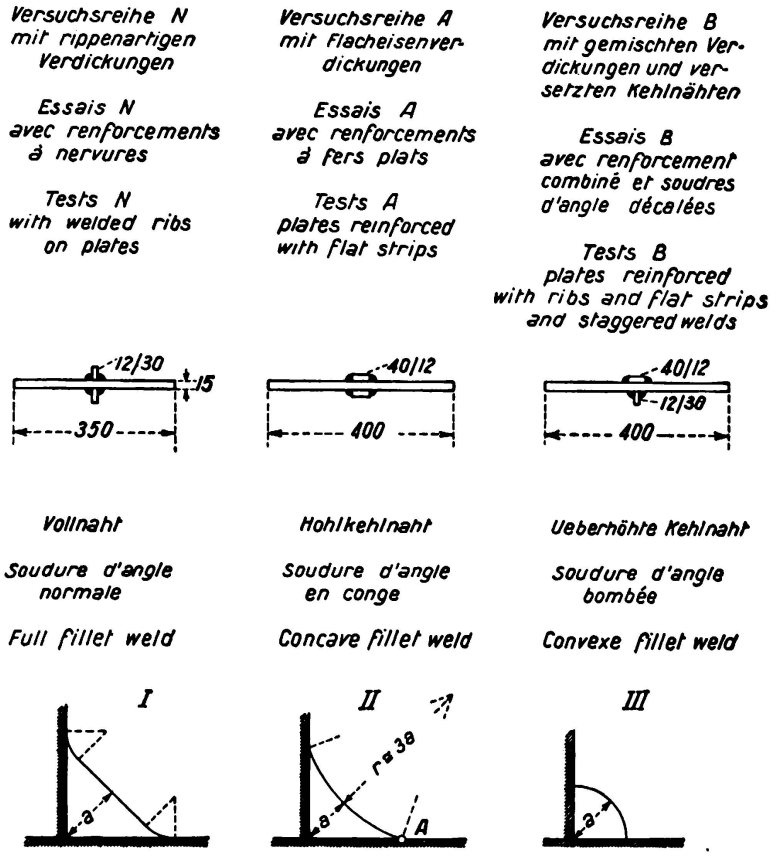


Fig. 10.

Verdickungsanordnungen und Nahtformen auf ungestoßenen Stäben.

der z. B. bei der Aussteifung von Stehblechen vorkommenden Kehlnähte und Verdickungen auf den ungestoßen durchgehenden Bauteil für die drei nachstehend gezeichneten Verdickungsanordnungen und Nahtformen zu untersuchen (Fig. 10).

Die Einhaltung der genauen Nahtform bereitete etwelche Schwierigkeit. Um die Ergebnisse der Versuche vergleichen zu können, mußten einzelne Nahtstellen nachgearbeitet werden. Nach einigen Vorversuchen wurden Zug-Ermüdungsversuche bei der Ursprungsfestigkeit und zwischen P und $^1/_2$ P durchgeführt (Versuchsbericht vom 14. April 1936).

Bei den Dauerproben in der Nähe der Ursprungsfestigkeit entfallen etwa

50 bis 80 % von der Bruchfläche auf Ermüdungswirkungen; zwischen $^1/_2$ P und P höchstens noch 50 % von der Bruchfläche.

Aus der Auftragung der Grenzwerte im System σ_o/σ_u ergaben sich die Ursprungsfestigkeiten im ungestoßen durchlaufenden Stab bei rund 1 Million Lastwechsel:

Nahtform	I	(voll)	15 kg/mm²
„	II	(hohl)	17 bis 18,5 kg/mm²
„	III	(überhöht)	13 kg/mm² (Vorversuch).

Wurde die Nahtform II nachgeschliffen, so stieg die Ursprungsfestigkeit noch etwas an, so daß der zweite Wert für diese Form gelten dürfte. Die Schlußfolgerungen aus diesen Versuchen lauten:

Der Ermüdungsbruch geht stets von einem Nahtansatz aus. Es hat sich als nebensächlich erwiesen, ob die Kehlnähte genau gegenüberstehend oder versetzt sind. Die Form der angeschlossenen Verdickung ist gleichgültig. Als Ursachen des gewaltigen Abfalles der Festigkeit des ungestoßenen Stabes sind anzusehen:

Ablenkung der Kraftlinien und Spannungshäufung an der Oberfläche beim Nahtansatz, Einschmelzkerben am selben Ort, wie auch Gefügeänderungen und Schrumpfspannungen.

Die Dauerfestigkeit des Baustahles 37 wird durch die Nahtform erheblich beeinflußt. Der flache Auslauf auf den durchgehenden Stab hat offenbar die geringsten Störungen zur Folge. Durch Abschleifen der Nahtübergänge wird die Ermüdungsfestigkeit weiter verbessert. Bei dynamisch beanspruchten Bauteilen müssen überhöhte Kehlnähte unbedingt vermieden werden.

Solange es nicht gelingt, zweckentsprechende Nahtformen herzustellen, muß damit gerechnet werden, daß die Ursprungsfestigkeit ungestoßener, auf Zug beanspruchter Bauteile im Bereiche von Schweißnähten auf 15 kg/mm² fällt und nur noch den 0,7 bis 0,8fachen Betrag des gelochten Stabes in Nietverbindungen erreicht. Bei guter Auskehlung kann z. B. die Ursprungsfestigkeit einer guten Stumpfschweißung erreicht werden (16 bis 18 kg/mm²). Damit ist der große Einfluß einer Schweißnaht auf einem durchgehenden Bauteil gezeigt und die Wichtigkeit der Gewinnung von Formziffern belegt.

Bei einer anderen Versuchsreihe verhielt sich eine Hohlkehlnaht besser als eine viel stärkere überhöhte Naht, so daß auch hier der Einfluß der Nahtform als bedeutungsvoll erkannt wurde. Unterschnittene Kehlnähte mit 25 bis 40 % kleinerem Nahtvolumen ergaben Festigkeiten, die vollen Kehlnähten nicht viel nachstehen.

3. *Bauformen.*

Es darf heute als feststehend angesehen werden, daß die geschweißten Bauten infolge der Schrumpfspannungen und der mit dem Einschmelzen der Schweißnähte verursachten Gefügeänderungen und Kerben örtlich eine bedeutende Herabsetzung der Ermüdungsfestigkeit erleiden, was zu Materialzugaben zwingt. Es liegt daher nahe, die Anwendungen des Schweißens in Klassen einzuteilen, die sich nach der Bedeutung der Ermüdungsfestigkeit richten.

Dabei können die Klassen den folgenden Anwendungsgebieten entsprechen, nämlich: Hochbauten, Straßenbrücken, Eisenbahnbrücken.

Hochbauten sind im allgemeinen dynamischen Einwirkungen wenig ausgesetzt, es sei denn, daß Krane, Maschinen und dergleichen Schwingungen und Erschütterungen ausüben. Straßenbrücken sind bereits stärker der Ermüdung ausgesetzt, indem sich heute die Wirkung der Lastwagen mehr und mehr fühlbar macht. Hierauf folgen die Eisenbahnbrücken, wo die Schnelligkeit und Größe der Spannungswechsel sich am meisten auswirkt.

Wenn auch in der eidgenössischen Verordnung vom Jahre 1935 diese Verschiedenheiten durch die Ansetzung der Lasten und ihrer Stoßwerte tunlichst auf eine gemeinsame Grundlage inbezug auf die zulässigen Spannungen gestellt sind, so kann man nicht von der Hand weisen, daß die Zeitdauer, in der die Wechsel zur kritischen Anzahl ansteigen, nicht zum Ausdruck kommt und daß bei der höchsten Klasse, den Eisenbahnbrücken, die Schweißungen am sorgfältigsten ausgeführt und die besten Naht- und Bauformen gewählt werden müßten. Es geht nicht an, in rücksichtsloser Weise Billigkeit und „übliche" Anordnungen zu erzwingen und den Spielraum, der für die Sicherheit vorhanden sein muß, zum voraus zu opfern. Die Feststellung, daß ein Bau hält, ist noch keine Bewährung mit Sicherheitsspielraum. Die Sicherheit kann hiebei völlig unzureichend sein, ohne daß irgendwelche Anzeichen die Beteiligten auf die Schwächen des Baues hinweist.

Der zur Verfügung stehende Raum gestattet nicht, die Frage der Bauformen eingehender zu behandeln. Näheres über diese Frage hat der Verfasser in dem unten angegebenen Aufsatz dargelegt.[14]

Die bei der Wahl zu beachtenden Grundsätze dürften etwa folgende sein:

a) Es ist kein Mittel unversucht zu lassen, die Schweißnähte zu vermindern und deren Querschnitte herabzusetzen.

b) Eine Häufung der Wärme- und Schrumpfspannungen ist dadurch zu vermeiden, daß von einem Zusammenführen mehrerer Schweißnähte abzusehen ist. Die Nähte sollten tunlichst von ungestörtem Baustoff umgeben sein.

c) Es ist zu versuchen, bei Stößen mit Stumpfnähten auszukommen und diese an schwach beanspruchten Stellen anzuordnen. Durch sorgfältige Materialabnahme sind die beim Schweißen besonders ungünstig wirkenden und öfters vorkommenden Rand- und Oberflächenfehler der Walzprofile (Doppelungen, Splitter, Spalten, Schlacken) auszuschließen.

d) Hat ein Anschluß senkrecht zum Kraftfluß eines Stabes zu erfolgen (Längsträger an Querträger, Querträger an Hauptträger, Windverbände an Gurtungen und dergleichen), so dürfen keine schroffen Übergänge belassen werden. Die entstehenden Ecken sind gut auszurunden und die Schweißnähte an den Übergängen sorgfältig zu bearbeiten.

e) Innere, unverschweißte Nahtteile sind zu vermeiden. Anstatt Kehlnähte empfehlen sich K-Nähte, die eine Durchschweißung ermöglichen.

f) Wie bei der Nietung sind exzentrische Anschlüsse zu vermeiden.

---

[14] Die Schweiß- und Schneidverfahren im Stahlbau auf dem Gebiete des Eisenbahnwesens, Abschnitt Hoch- und Brückenbau. Für den Bericht des Azetylenkongresses, London 1936, verfaßt.

g) Die gleichzeitige Anwendung von Niet- und Schweißverbindungen sollte unterlassen werden, da dafür vorerst Regeln aufgestellt werden müßten, besonders im Hinblick auf Ermüdungserscheinungen.

h) Das Schrumpfmaß eines Stumpfstoßes beträgt 1 bis 2 mm, dasjenige bei der Ausführung von Biegeträgern mit Versteifungen bis zu $1^0/_{00}$.

Bei der Bauausführung müssen diese Vorgänge sorgfältig überwacht werden, um Zwängungsspannungen zu vermeiden.

IV. Herstellung geschweißter Bauten.

1. *Allgemeines.*

Bei der Herstellung geschweißter Bauten herrscht vielfach die Auffassung vor, daß es sich um einen im Vergleich mit der Nietung einfachen Vorgang handle, auf den eine Umstellung des Personals und der Werkstätteeinrichtungen nicht schwierig sei. Bei hochwertigen Schweißungen, die für dynamisch stark beanspruchte Bauten verlangt werden müssen, ist diese Anschauung aber nicht richtig. Das Berechnen und Entwerfen, das Anzeichnen, Zusammenstellen usw. ergibt im allgemeinen keine Arbeitsverminderung, wenn fachtechnisch richtig vorgegangen wird. Hervorzuheben ist ferner, daß geschweißte Bauten räumlich genau berechnet werden sollten, indem ihnen die Fähigkeit genieteter Bauten nicht innewohnt, allenfalls gefährdete Teile durch Gleitung der Anschlußnieten zu entlasten. Indessen sollten auch für Schweißungen, deren dynamische Beanspruchung unbedeutender ist, die besten Regeln ebenfalls eingehalten werden, einerseits im Hinblick auf die Erziehung der Beteiligten und anderseits mit Rücksicht darauf, daß die Schweißungen ihrer ungünstigen Folgen wegen, stets mit großer Sorgfalt hergestellt werden sollten.

2. *Prüfung der Werkeinrichtungen, Abnahme der Elektroden.*

Wenn der Entscheid zugunsten eines geschweißten Bauwerkes gefaßt werden soll, darf man sich die Mühe nicht verdrießen lassen, die Schweißanlagen einer Werkstätte, die die Arbeiten übernehmen will, zu prüfen. Hiezu wird man im allgemeinen einen auf dem elektrischen Gebiete bewanderten Ingenieur beiziehen müssen, der die Anschlüsse und Leitungsfähigkeit der Schweißeinrichtungen (Leitungen, Kabel, Spannungswandler, Erdungen, Anschlußdauer usw.) unter verschiedenen Belastungen zu beurteilen versteht. Das bequeme sichere Einstellen der richtigen Stromstärken durch die Schweißer ist von großer Bedeutung, um das Einschmelzen der Schweißdrähte ausreichend und gleichförmig zu erhalten. Es dürfte zweckmäßig sein, nur solche Werkstätten für wichtigere Schweißarbeiten zuzulassen, deren elektrische Einrichtungen einer strengen Prüfung standhalten und die Gewähr bieten, daß die Schweißeinrichtungen fachgemäß instandgehalten werden.

Ferner ist es sehr wichtig, daß eine Schweißwerkstätte über die notwendigen Krane und Wendeeinrichtungen für die Bauglieder verfügt, um die Nähte stets in günstiger Lage schweißen zu können, was zur Erzielung zweckmäßiger Formen erforderlich ist.

Auf dem Bauplatz sind Überkopfschweißungen tunlichst auf das Schließen der Wurzel von V-Nähten zu beschränken.

Einen weiteren Schritt zur Sicherstellung einer fachgerechten Schweißarbeit bildet die *Abnahme der Elektroden oder Schweißdrähte.* Wohl kann man darauf hinweisen, daß die Schweißdrähte als Massenerzeugnis zu bewerten seien, bei dem die Gleichartigkeit von selbst gewährleistet sei. Versehen sind aber immer möglich, weshalb als Regel gelten sollte, die Schweißdrähte abzunehmen, das heißt, auf die Genauigkeit ihrer Abmessungen und Umhüllungen zu prüfen und sie in material- und schweißtechnischer Hinsicht zu untersuchen. Erst bei günstigem Ausfall dürfen sie freigegeben werden.

Je eine vollständige Untersuchung sollte auf etwa 10000 Elektroden oder für die entsprechende Länge Schweißdraht vorgenommen werden. In Werkstätten, in denen mit verschiedenartigen Schweißdrähten geschweißt wird, bildet es eine große Sorge, daß stets die vorgesehenen Marken verwendet werden. Nur eine ordnungsliebende Werkstätteleitung kann hier die nötige Gewähr bieten.

3. *Prüfung der Schweißer.*

Über die *Prüfung der Schweißer* ist schon viel geschrieben worden. Wir sind der Auffassung, daß der üblichen Prüfung durch die Vornahme einiger Schweißproben keine sehr große Bedeutung zukommt. Aus formellen und praktischen Gründen können die Proben aber nicht umgangen werden. Erstens können nicht beliebige Schweißer verwendet werden und zweitens ist eine günstige Beeinflussung durch die Vornahme von Proben oder Herstellung schwieriger Probestücke immerhin vorhanden. Was auf die Güte der Schweißarbeiten weiter günstig einwirken würde, wären eingehende Belehrungen und Besprechungen mit den Schweißern vor und während den Arbeiten durch einen erfahrenen Fachmann, der die Arbeiten auch zu verfolgen hätte. Oftmals fehlt es an den einfachsten Anweisungen. Für die theoretische und praktische Ausbildung der Schweißer sollte mehr als bisher getan werden. Es dürfte sich wohl empfehlen, daß zur Heranbildung eines Stammes guter, vertrauenswürdiger Schweißer eine Lehranstalt geschaffen würde.

4. *Prüfung der Schweißarbeiten.*

Was die Prüfung der Schweißarbeiten anbelangt, so steht als beste, störungsfreie Methode diejenige mit Röntgenstrahlen zur Verfügung. Die andern Methoden, wie die elektromagnetische und akustische sind unsicher. Das Anbohren und das Herausschneiden von Belegstücken ergibt nur Zerfallsergebnisse und läßt keinen sicheren Schluß auf die durchschnittliche Güte der Schweißarbeiten zu. Die Verbindung des Röntgenverfahrens und des Herausschneidens von Belegstücken ergibt die besten Ergebnisse. Dieses Vorgehen ist aber in der Anwendung teuer und zeitraubend und das Flicken der entstandenen Löcher hat unter Umständen schlimme Zusatzspannungen zur Folge. Die Anwendung des Röntgenverfahrens liefert für Stumpfnähte gute Ergebnisse in der Hand eines sehr erfahrenen Röntgenographen. Bei Kehl- und andern Nahtformen ergeben sich aber Schwierigkeiten bei den Aufnahmen, weil die Stahlstärken in der Regel sehr verschieden sind. Schließlich scheitert die reine Anwendung des Röntgenverfahrens an dem Umstand, daß bis heute noch keine allgemein anerkannte Beziehungen

zwischen Röntgenbild und Schweißnahtfestigkeit festgestellt wurden.[15] So bleibt dem Verfahren der Röntgenaufnahmen zur Zeit nur der Vorteil zuzuerkennen, daß es auf die Schweißer eine erzieherische Wirkung ausübt, indem gröbere Fehler ohne Eingriffe in die Schweißnaht nachweisbar sind, was zum sorgfältigen Arbeiten zwingt. Leider ist das Röntgenverfahren teuer und deshalb zum vollständigen „Röntgen" aller Nähte wenigstens im Stahlbau derzeit nicht geeignet.[16]

So bleiben die Schweißungen im wahrsten Sinne des Wortes eine Vertrauensarbeit. Es darf daher auf die Schweißer bei wichtigeren Bauten kein Druck zu beschleunigter Ausführung ausgeübt werden. Sogenannte Stücklöhne sind zu untersagen. Bei dynamisch erheblich beanspruchten Bauten ist auf ein Durchschweißen der Nähte größter Wert zu legen, was ein sorgfältiges Öffnen und Reinigen zunächst einseitig geschweißter Wurzeln erforderlich macht. Es ist unvermeidlich, diese einzelnen Arbeitszustände nachprüfen und abnehmen zu lassen. Das Auffinden von Rissen, Fehlern und Mängeln bei den fertigen Nähten wird durch das Sandstrahlen sehr erleichtert. Es empfiehlt sich, dieses Reinigungsverfahren vorzuschreiben.

V. Zusammenfassung.

1. Im vorstehenden Bericht ist nach einer kurzen Einführung über das Wesen der Wärme- und Schwindspannungen auch eine Vorrichtung zu deren Messung beschrieben. Im Anschluß daran wird auf die Ergebnisse der Messungen bei vier Bauten und auf die Bedeutung und Auswirkung der durch die Schweißung verursachten Störungszonen, die statische Brüche oder frühzeitige Ermüdungsbrüche zur Folge haben können, hingewiesen.

2. Die Messungen zeigen, daß die Wärmespannungen und die daraus sich entwickelnden Schrumpfspannungen sehr bedeutend sind. Die dagegen zu ergreifenden Maßnahmen bestehen in der Verminderung der Nahtquerschnitte und der Vermeidung einer Häufung von Nähten.

3. Die Störungszonen infolge des Schweißens und ihre Rückwirkung auf die Bauteile sind unzureichend abgeklärt. Dringend erwünscht sind systematische Untersuchungen der Störungszonen selbst und ihre Beeinflussung durch die Stromart, Elektrodenzusammensetzung, Elektrodendurchmesser (Stromstärke) und Querschnittsformen der Bauglieder.

---

[15] Ein Sonderversuch mit K-Nähten ergab für die Ursprungsfestigkeit bei

sorgfältiger Ausführung	14—16 kg/mm²
guter „	12—14 „
schlechter „	9—11 „

Vergleichende Röntgenaufnahmen lassen diese Abstufungen wohl erkennen, aber nicht in völlig überzeugender Weise.

[16] *Eng.N.-Record, 15. November 1934:* Beim Bau der Kraftanlage am Boulder-Staudamm sind bei den 45 000 t schweren Druckleitungen alle Nähte durchleuchtet und photographiert worden (ca. 120 km Nahtlänge). Die Beurteilung erfolgte auf Grund des A. S. M. E. boiler code radiographs.

The Engineer: 19. April 1935, *Pullin:* Radiology in the Welding Art.

4. Es besteht wenig Aussicht, daß die Schrumpfspannungen mit der Zeit durch die Einwirkung der Betriebslasten verschwinden, wie dies oft gesagt wird, es sei denn, daß Überanstrengungen zustande kommen, die aber unerwünschte, allenfalls sogar beunruhigende Formänderungen oder gar Risse zur Folge haben können.

5. Die Kunst der fachgerechten Ausbildung geschweißter Bauten liegt in der tunlichsten Erhaltung der Ermüdungsfestigkeit des Stahles, d. h. in der Wahl zweckmäßiger Schweißnaht- und Bauformen und darin, daß Kerbwirkungen sowie schroffe Übergänge vermieden werden. Störungszonen sind nicht an die am meisten beanspruchten Fasern zu legen und sollten in ausreichendem Maße von ungestörtem Baustoff umgeben sein. Die Forderung auf Einhaltung bestimmter Nahtformen macht unter Umständen ein Nachschleifen der Nähte nötig. Die dabei sich ergebenden glatten Nähte sind übrigens auch für die Herstellung eines haltbaren Anstriches und eines einfachen Unterhaltes, sowie zum Zwecke der Erkennung von Rissen notwendig.

6. Bei der Herstellung geschweißter Bauten kann nicht vorsichtig genug vorgegangen werden. Die Vorstellung, die alt bewährte Nietung könne durch eine *billige* Schweißung ersetzt werden, ist unhaltbar. Die Schweißung, als viel verwickelteres Verfahren als die Nietung erfordert zur Sicherstellung des Erfolges eine dauernde Aufsicht sowohl seitens der Werkstätte-, als auch der Bauleitung. Diese Prüfung ist zeitraubend und setzt unter Umständen die Zuziehung von besonderen Fachleuten voraus. Für genaue Arbeiten kann das Anzeichnen (Anreißen) der Schweißnähte nicht umgangen werden.

7. Mit der bisher geforderten Prüfung der Schweißer und ihrer Arbeit ist nicht alles getan. Es muß auch dafür gesorgt werden, daß schon die Voraussetzungen zur Ermöglichung einwandfreier Arbeit geschaffen werden, d. h., es sind die Elektroden, die Schweißanlagen samt Zulage und die Ausrüstung der Schweißer auf ihre Eignung zu prüfen. Die Schweißer müssen über die Tragweite ihrer Arbeit unterrichtet und von einem Fachmann angeleitet und dauernd überwacht werden.

8. Erst wenn diese Bedingungen ganz erfüllt werden, wird man sich ungestört der außerordentlichen Vorzüge geschweißter Bauten erfreuen können. Es wäre erwünscht, wenn diese Darlegungen Anlaß geben würden, alle Fragen, die sich mit der Einführung der Schweißung stellen, nochmals nachzuprüfen.

IIIb 3

Zur Beherrschung der Schrumpfwirkungen.

La lutte contre les effets de retrait.

Controlling the Effects of Shrinkage.

Dr. Ing. G. Bierett,
Professor am Staatl. Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem.

Bei Herstellung genieteter Bauwerke wurde innerhalb der Konstruktionswerkstätten nur eine Warmverarbeitung des Nietmaterials durchgeführt; die Anwendung der Schweißung brachte demgegenüber das Eindringen eines Schmelzprozesses in die Werkstätten der Eisen verarbeitenden Industrie. Außer den Schwierigkeiten, von denen jeder metallurgische Vorgang begleitet ist, liegen hierbei die Verhältnisse besonders schwierig, weil hocherhitzter flüssiger Werkstoff in kleinen Mengen in kalten Werkstoff viel größerer Masse eingeschmolzen werden muß.

1. *Anforderungen an die Werkstoffe.*

Diese örtliche Einschmelzung bedeutet stark ungleiche Temperaturverhältnisse und ebenso ungleichmäßige Ausdehnungs- und Abkühlungsverhältnisse. Diese Ungleichmäßigkeit der Temperaturvorgänge ist die Ursache für die Erscheinungen, die in der Schweißtechnik als Schrumpfwirkungen bezeichnet werden.

Die Abkühlungsgeschwindigkeiten sind je nach dem gewählten Schweißverfahren: elektrische Lichtbogenschweißung, Widerstands-, Arcatom- oder Gasschmelzschweißung, bei der elektrischen Lichtbogenschweißung je nach dem verwendeten Schweißdraht: blank, getaucht oder umhüllt und je nach den Konstruktionsverhältnissen und der Arbeitsweise verschieden. Sie sind teilweise sehr groß und ungünstigen Falles einer Abschreckwirkung ähnlich. Für die Schrumpferscheinungen können vor allem diese sehr großen Abkühlungsgeschwindigkeiten Bedeutung gewinnen, wenn Werkstoffe verschweißt werden, die bei zu schneller Abkühlung Härtungs- und Versprödungserscheinungen zeigen können.

Diese können auftreten bei Stählen höheren Kohlenstoffgehaltes und bei Stählen mit Beilegierung härtender Elemente wie Mangan, Chrom u. ä. über einen gewissen Prozentsatz hinaus, besonders dann, wenn die Abkühlung verhältnismäßig rasch erfolgt.

Die Schmelze macht bei der Abkühlung Umwandlungen durch. Das nach der Erstarrung vorhandene Austenit wandelt sich über Zwischengefügeformen: Martensit, Troostit, Sorbit in die endgültige stabile Perlit- bzw. Ferrit-Zementitform um. Die Umwandlungen vollziehen sich bei langsamer Abkühlung in höheren

Temperaturgebieten, in denen die mit der Umwandlung verbundenen Volumenveränderungen keine Spannungen zur Folge haben.

Bei Kohlenstoff- und Legierungszusätzen über eine gewisse Größe hinaus können diese Umwandlungserscheinungen entsprechende Umwandlungsspannungen zur Folge haben, da sich die Umwandlungen bei schneller Abkühlung in tiefere Temperaturgebiete verlagern, in denen bereits größere Formänderungswiderstände gegen Volumenveränderungen auftreten und in denen auch die thermischen Spannungen bereits merkliche Werte annehmen. Es ist auch möglich, daß die bei den üblichen Baustählen erwünschte Umwandlung Austenit ⟶ Perlit bei gewissen Legierungszusätzen und schroffen Abkühlungsbedingungen nicht eintritt, sondern u. U. im Endzustand in den Schweißnahtzonen ein Zwischengefüge, im ungünstigsten Fall das harte und spröde Martensit auftritt.

Der für Stahlkonstruktionen verwendete unlegierte und niedrig gekohlte Flußstahl weist erfahrungsgemäß keine störenden Erscheinungen dieser Art auf. Bei Verwendung leicht legierter Stähle kann diese Frage schon eher Bedeutung gewinnen. Zur Vermeidung ungünstiger Auswirkungen wird bisweilen die Härtungsbiegeprobe verlangt, bei der der Stahl von 900° C in Öl von Raumtemperatur abgeschreckt und sich danach um einen Dorn von zweifacher Blechdicke bei Raumtemperatur zusammenbiegen lassen muß.

Bei den zum Schweißen bestimmten Stählen dürfen die verunreinigenden Eisenbegleiter Schwefel und Phosphor nur in mäßigen Mengen vorhanden sein. Schwefel verursacht bekanntlich Rotbruch, bei zu hohem Schwefelgehalt liegt Gefahr der Warmrißbildung in erhöhtem Maße vor. Phosphor gibt Anlaß zu Kaltbrüchen, vor allem neigen Stähle mit zu hohen Phosphorgehalten zu Grobkornbildung, wodurch leicht Risse in der Nähe der Schweißnaht auftreten.

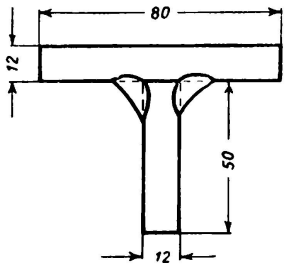
Ein genügendes Formänderungsvermögen des erkalteten Schweißgutes allein gibt keine Gewähr für Rißunempfindlichkeit. Die Risse treten wahrscheinlich meist schon bereits bei höheren Temperaturen ein (Abschnitt 6).

Mit wachsender Profil- oder Blechdicke, allgemeiner ausgedrückt mit wachsendem Volumen und wachsender Starrheit der zu verschweißenden Teile, wächst die Rißgefahr, zum großen Teil wohl wegen der wesentlich schnelleren Wärmeableitung, sodaß die im Vorstehenden für Stähle höheren Kohlenstoffgehaltes behandelte Frage auch für die Konstruktionsstähle des Stahlbaues mit niedrigerem Kohlenstoffgehalt Bedeutung gewinnen kann.

Durch zweckmäßige Versuche müssen deshalb Schweißdrahtsorten, die bei der Verschweißung mit den in Frage kommenden Grundwerkstoffen zu Rissen neigen, ausgeschieden werden. Die Deutsche Reichsbahngesellschaft läßt neuerdings eine Rißempfindlichkeitsprobe bei der Drahtzulassungsprüfung durchführen (Fig. 1); ähnliche Untersuchungen sogar in verschärfter Form durch Anwendung größerer Blechdicken stellen m. W. viele Firmen bei Entwicklung von Schweißdrähten an.

Die zur Bekämpfung der Schrumpfwirkungen häufig vorgenommene mechanische Bearbeitung der Nahtzonen (Abschnitt 7b) verlangt ebenso wie sonstige mechanische Anforderungen häufig, daß die Nähte im warmen und kalten Zustand bearbeitbar sind, sodaß Drähte und Schweißbedingungen, die eine Aufnahme an Sauerstoff und Stickstoff in schädlicher Größe hervorrufen, ausscheiden müssen.

Die Rücksicht auf Schrumpfwirkungen macht die Ausscheidung von Drähten notwendig, die übermäßig exotherm sind, also unter besonders großer Wärmeentwicklung niedergeschmolzen werden. Eine sehr einfache Beurteilung der Wärmewirkung ist durch Feststellung der Breite der Anlaufzonen neben der Naht möglich. Drähte, die zu breite Wärmewirkungszonen erkennen lassen, sollten im Stahlbau von vornherein ausgeschieden werden.



Fig, 1.
Probe für Schweißrissigkeitsverhalten von Elektroden.

2. *Ausdehnungs- und Schrumpfungsvorgänge.*

Die äußeren Auswirkungen der Erwärmung, als Formänderungen in der Gestalt von Verkürzungen, Verkrümmungen und Ausbeulungen, sollen nur in dem Umfang erörtert werden, soweit es zur Erfassung der Schrumpfspannungs- und Schrumpfrißfrage notwendig ist. Die Beherrschung der Formänderungen ist, da diese viel sinnfälliger in Erscheinung treten, in den Betrieben viel weiter entwickelt als die Bekämpfung der Spannungen und der Risse. Die Maßnahmen zur Vermeidung unerwünschter Formänderungen bewirken häufig eine Steigerung der Spannungen und der Rißgefahr. Oft wird man deshalb einen vermittelnden Weg beschreiten müssen, um hinsichtlich der Formänderungen und der Spannungen befriedigende Verhältnisse zu erreichen.

a) *Die Querschrumpfungen.*

Das niedergeschmolzene flüssige Material hat das Bestreben, sich bei vollständig unbehinderter Bewegungsmöglichkeit in allen Richtungen gleichmäßig zusammenzuziehen.

Die Voraussetzung unbehinderter Schrumpfung in der Querrichtung kann praktisch nur bei Stumpfnähten vorliegen und zwar auch hier nur bei Nähten, die in kurzer Zeit fertig gestellt werden können. In der Längsrichtung liegt in keinem Fall eine unbehinderte Schrumpfmöglichkeit vor.

Die Querschrumpfung bei der Verschweißung frei beweglich gegeneinander gelagerter Bleche ergibt sich aus der Verengerung der Schweißfuge infolge der Erwärmung der zu verschweißenden Teile und aus der Schrumpfung des eingeschmolzenen Schweißgutes. Der erste Anteil überwiegt bei weitem. Maßgebend für die Querschrumpfung ist die Größe der zugeführten Wärmemenge, die von der Größe des Nahtquerschnittes und von dem spezifischen Wärmeverbrauch zur Abschmelzung des Schweißdrahtes abhängt.

Eingehende Untersuchungen über die Querschrumpfungsvorgänge bei der Stumpfnaht sind von *H. Koch*[1] und *R. Malisius*[2] durchgeführt worden, von denen die folgenden Angaben entnommen sind.

---

[1] *H. Koch:* Schrumpfungen und Schrumpfspannungen bei der Lichtbogenschweißung. Dissertation T. H. Hannover, 1935.

[2] *R. Malisius:* Die Schrumpfung geschweißter Stumpfnähte. Sammlung: Aus Theorie und Praxis der Elektroschweißung (Verlag Vieweg) H. 2 und Elektroschweißung 7 (1936) S. 1—9.

Die Schrumpfung erfolgt bei durchlaufender Schweißung, da das Schweißgut nacheinander eingeschmolzen wird, nicht gleichmäßig über die Länge, sondern für die einzelnen Nahtpunkte etwa linear fortschreitend. Eine gute und enge Heftung vermindert die Schrumpfung erheblich und erzwingt auch eine annähernd parallel vor sich gehende Schrumpfung. Ein abschnittsweises Schweißen einer Nahtlänge kann bei richtigem Vorgehen z. B. dem Pilgerschrittschweißen im gleichen Sinne wirken, es ist im allgemeinen zweckmäßiger, die Verringerung der Schrumpfung durch möglichst viele Heftstellen zu bewirken.

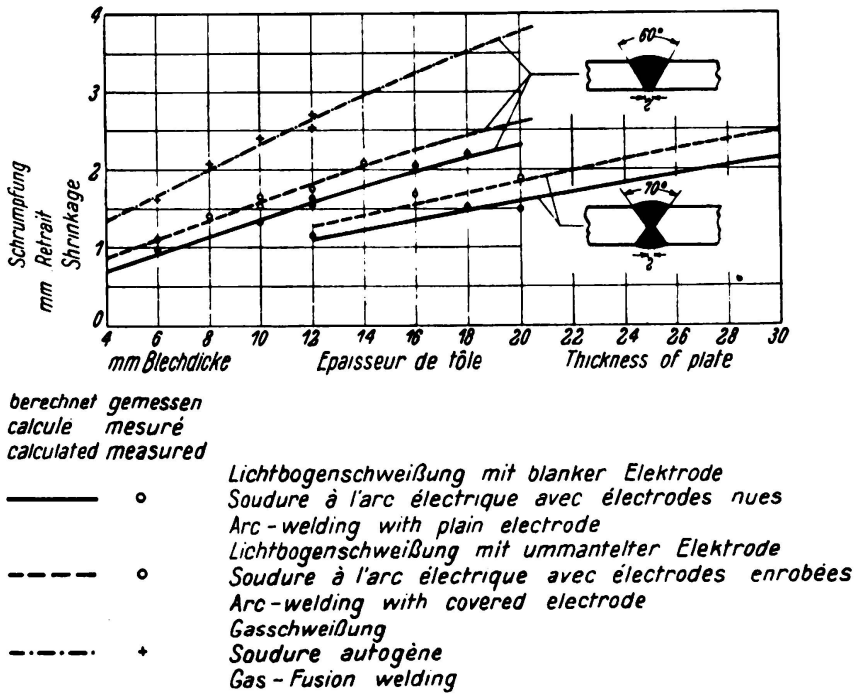


Fig. 2.

Querschrumpfung gut vorgehefteter Nähte.

Mit wachsender Blechdicke nimmt die Schrumpfung zu, da auch die mittlere Nahtbreite steigt (Fig. 2). Eine weitgehende Beschränkung des Fugenquerschnittes, soweit es sich mit den Gesichtspunkten der guten Verschweißung vereinbaren läßt, vermindert die Querschrumpfung (Fig. 3).

Die bei dickeren Blechen im allgemeinen angewendete Mehrlagenschweißung erzeugt neben der Parallelschrumpfung eine Winkelschrumpfung, die zu starken Verkrümmungen Anlaß geben kann. Die Gesamtschrumpfung einer solchen Verbindung ergibt sich aus der Parallelschrumpfung und der Winkelschrumpfung (Fig. 4).

Die Winkelschrumpfung nimmt stark mit der Blechdicke zu, die Gesamtschrumpfung ebenfalls. Von starkem Einfluß ist die Zahl der angewendeten Schweißlagen. Für 12 und 18 mm dicke Bleche sind die Verhältnisse für V-Fugen in Fig. 5 wiedergegeben. Zur Kleinhaltung der Winkelschrumpfung und der Gesamtschrumpfung ist deshalb die Anwendung weniger dickerer Lagen unter Verschweißung dickerer Drähte vorteilhafter als vieler dünner. Gesichtspunkte über Gefügeausbildung und die Gefahr der Rißbildung veranlassen, daß andererseits mit nicht zu wenigen Lagen geschweißt wird.

Die Anwendung symmetrischer oder annähernd symmetrischer Fugenquerschnitte verbessert die Verhältnisse ganz wesentlich, vor allem wenn die Lagen der oberen und unteren Öffnung wechselseitig geschweißt werden.[3]

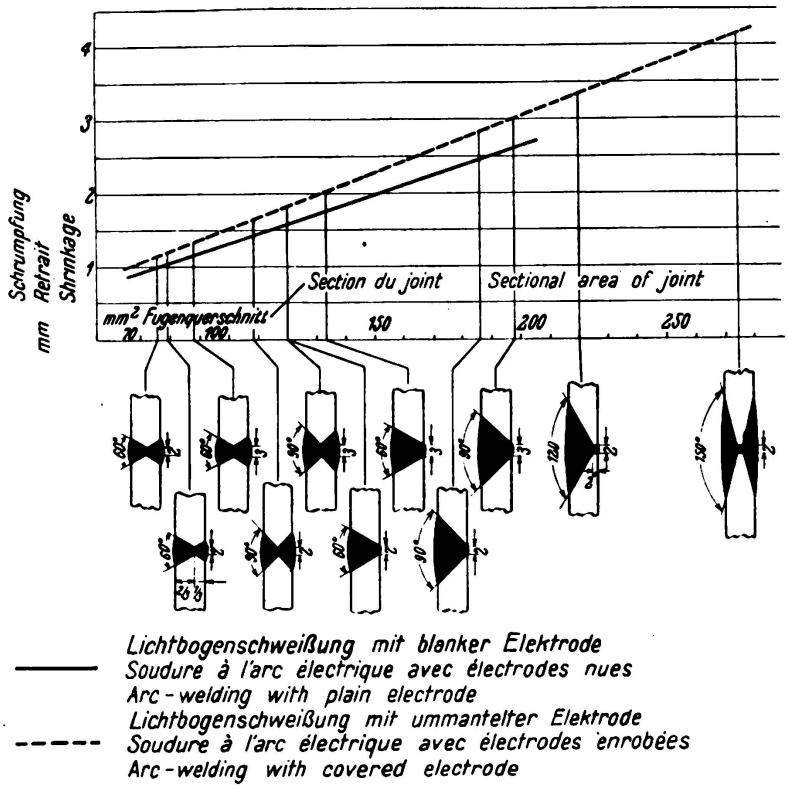


Fig. 3.

Schrumpfung von Stumpfnähten verschiedener Fugenausbildung (Blechdicke 12 mm).

Bei Kehlnähten ist die Querschrumpfung und die Winkelschrumpfung von Bedeutung. Beide können wie bei den Stumpfnähten gering gehalten werden, wenn die Drähte keine übermäßige Wärmezufuhr zum Verschweißen benötigen

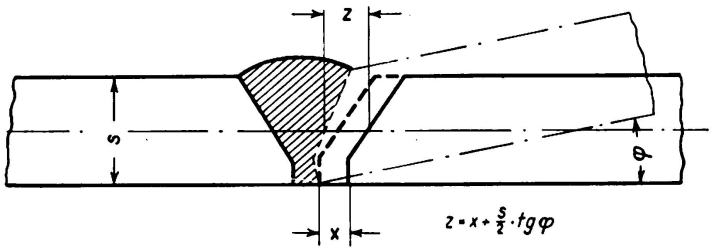


Fig. 4.

x = Parallelquerschrumpfung φ = Winkelschrumpfung z = Gesamtquerschrumpfung

Zerlegung der Querschrumpfung.

und wenn die Nahtquerschnitte so klein, als mit der Festigkeit vereinbar, gehalten werden. Jedoch besteht bei Anwendung zu dünner Kehlnähte oder zu dünner Wurzellagen Rißgefahr (Abschnitt 6).

[3] *E. Höhn:* Schweißverbindungen im Kessel- und Behälterbau, S. 56/59, Verlag Springer 1935.

Die Querschrumpfung bei Kehlnahtverbindungen[4] ist kleiner als bei Stumpfnähten (Fig. 6), da die Aufschmelzzone nur über einen gewissen Teil der Blechdicke wirkt. Eine Abhängigkeit der Querschrumpfung von der Blechdicke wie bei Stumpfnähten ist bei gleichbleibenden Nahtquerschnitten nicht zu erwarten, eher

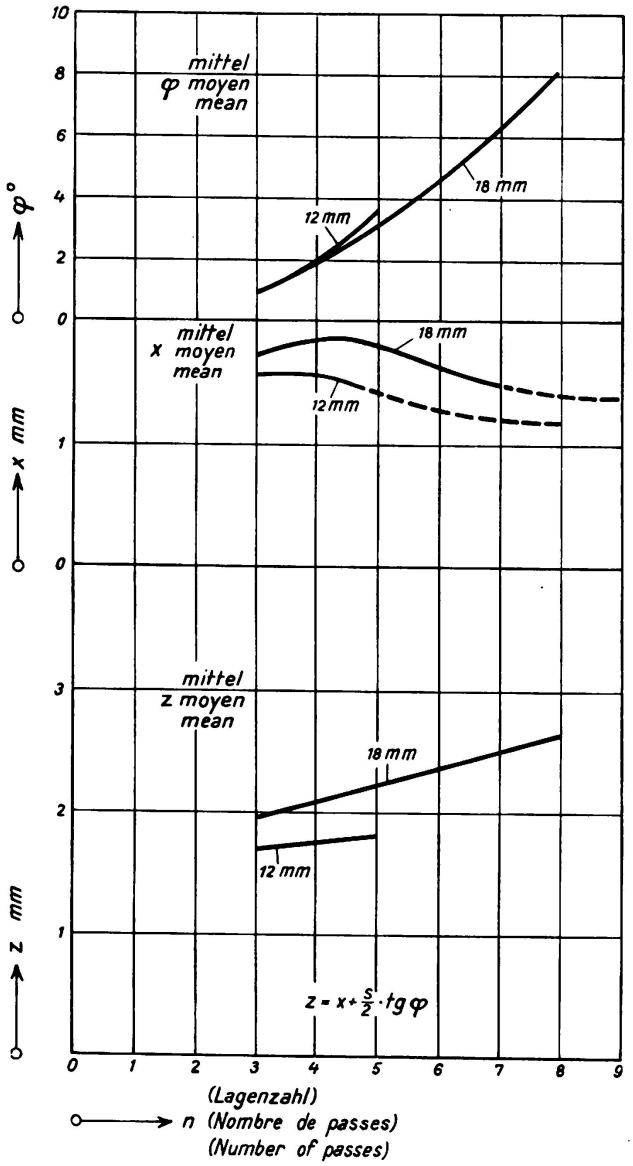


Fig. 5.

Die Schrumpfung abhängig von der Lagenzahl bei konstanter Blechdicke (12 und 18 mm) nach H. Koch.

konstant:
l = Nahtlänge 180 mm;
b = Gesamtbreite 240 mm V-Stoß;
v = Fugenabstand 3 mm;

Schweißverfahren: Lichtbogen-Wechselstromschweissung mit umhüllten Elektroden 4 und 5 mm.

Normale Stromstärke, an beiden Enden geheftet.

eine Verminderung bei dickeren Blechen. Die Schrumpfungsverhältnisse werden in weitgehendem Maße von dem Schweißdraht, dem Drahtdurchmesser und der Art der Ausführung abhängen. Da jeder Betrieb gewisse Gewohnheiten bei der Herstellung hat, ist die Vornahme von Betriebsuntersuchungen an oft vorkommenden Regelverbindungen zu empfehlen.

b) *Die Längsschrumpfungen.*

Bei der Einschmelzung des erhitzten flüssigen Schweißgutes dehnen sich die ebenfalls stark erwärmten Nachbarzonen der Schweißfuge aus, können diese

[4] *Lottmann:* Schweißen im Schiffbau. Deutsche Verlagswerke Strauß, Vetter u. Co., Berlin, und Elektroschweißung 1 (1930) S. 133/134.

Formänderung in Richtung der Naht jedoch nur im Zusammenhang mit den nach der Seite zu immer kälteren Teilen ausführen. Der bei allen Schweißverfahren verhältnismäßig schroffe Temperaturabfall und der in höheren Temperaturbereichen nicht gleichbleibende, sondern ständig anwachsende thermische Ausdehnungskoeffizient führt zu plastischen Stauchungen in den hocherhitzten

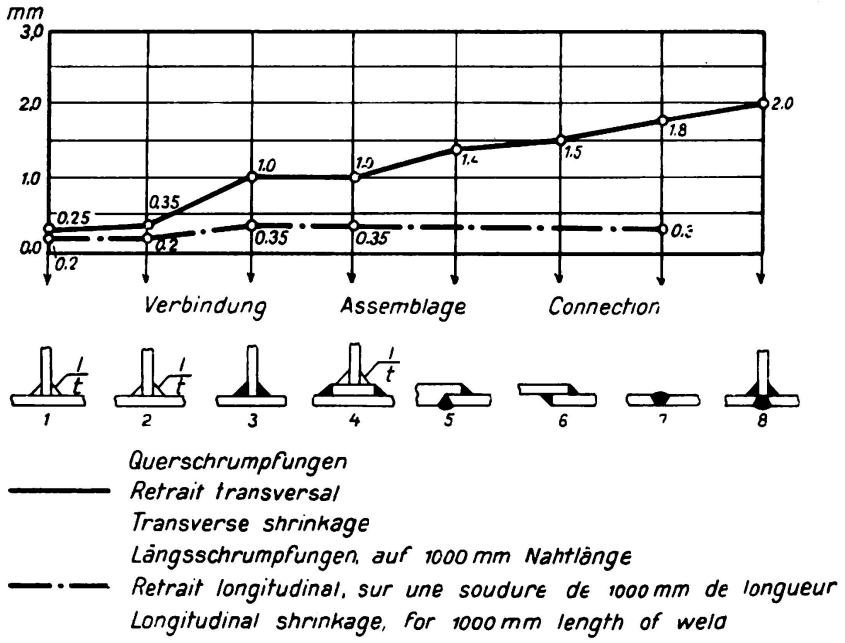


Fig. 6.

Quer- und Längsschrumpfung von geschweißten Verbindungen nach Lottmann.

Zonen, die die eigentliche Ursache für die zurückbleibenden Schrumpfungen und die Schrumpfspannungen in der Längsrichtung sind.

Bei den gewöhnlichen Kohlenstoffstählen beginnt sich die Streckgrenze im Temperaturbereich von 600—700° C auszubilden, um dann verhältnismäßig schnell mit sinkender Temperatur anzuwachsen (Fig. 7). Etwa im Temperatur-

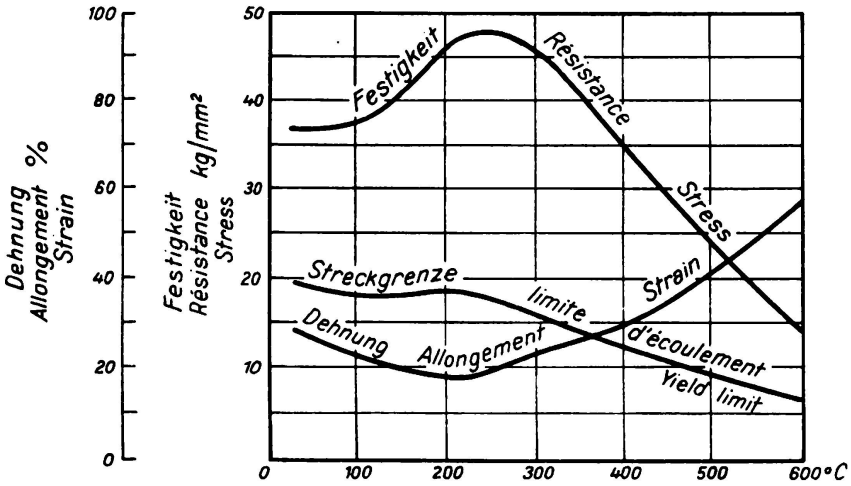


Fig. 7.

Festigkeitseigenschaften von unlegiertem Stahl nach G. Urbanczyk.
C = 0,14 %; Mn = 0,51 %; P = 0,016 %; S = 0,032 %.

gebiet von 600° C grenzen Zonen mit geringem Formänderungswiderstand an Zonen anwachsenden Formänderungswiderstandes, so daß hier das Maximum der plastischen Stauchung eintritt.

Bei der Lichtbogenschweißung, vor allem mit blanken Drähten, ist das Gebiet, das über 600° C erwärmt wird, sehr schmal, so daß die größte Stauchung unmittelbar an der Naht eintritt. Bei breiteren Erhitzungszonen verlagern sich die Stellen größter Stauchung von der Naht fort (Fig. 8). Entsprechend dem all-

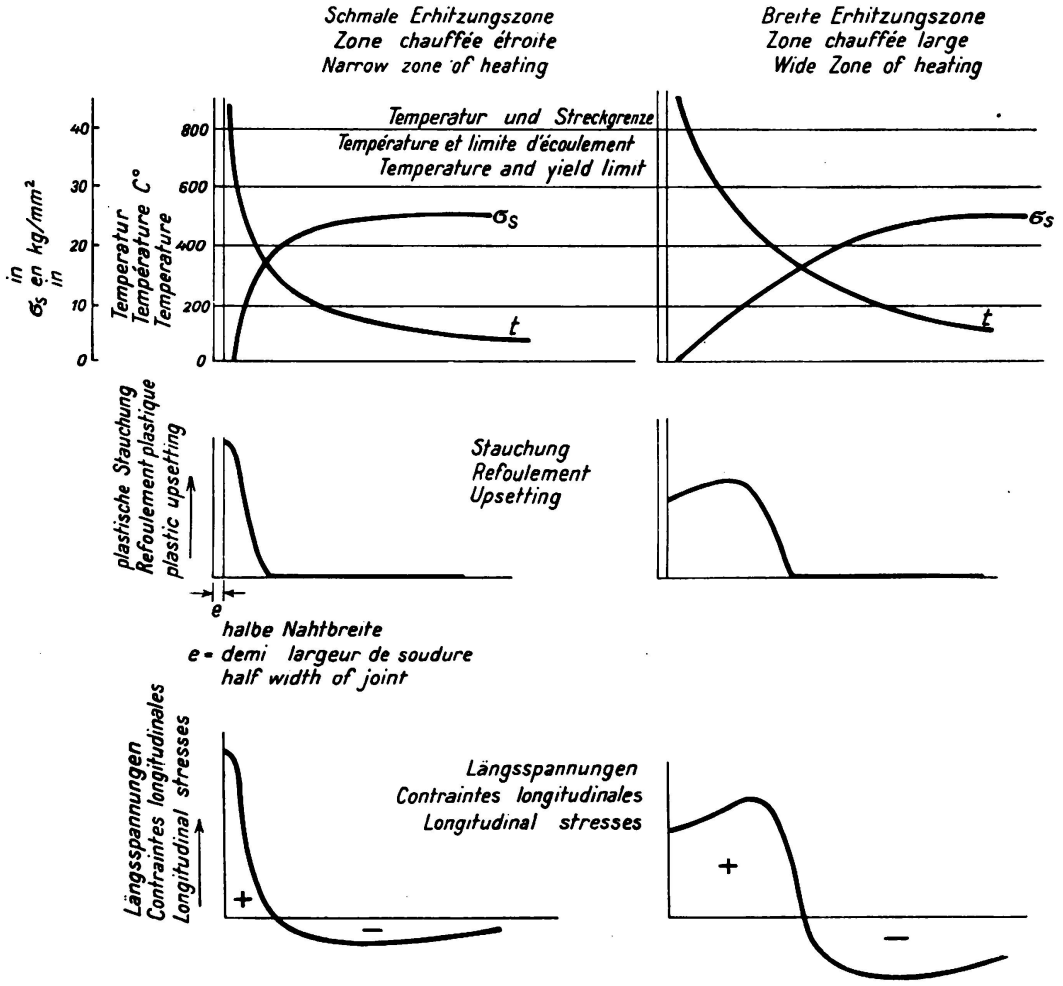


Fig. 8.

Temperatur-Stauchungs- und Spannungsverhältnisse bei schmalen und breiten Erhitzungszonen.

mählicheren Temperaturübergang bei breiten Erhitzungszonen ist auch der Übergang vom Werkstoff geringen Formänderungswiderstandes zu dem von höherem Formänderungswiderstand ausgeglichener. Die maximale Stauchung ist deshalb geringer.

Die Längsschrumpfung macht praktisch nur einen Bruchteil der Querschrumpfung aus (Fig. 6). Es ist früher oft daraus geschlossen worden, daß auch die zurückbleibenden Schrumpfspannungen in der Nahtrichtung klein sind, so daß den Erscheinungen der Längsschrumpfung und Längsschrumpfspannungen nur wenig Bedeutung beigemessen wurde. Eine rationelle Behandlung des Schrumpfspannungsproblems ist, im Gegensatz zu dieser Auffassung, nur möglich, wenn man von der Längsschrumpfung und ihren Auswirkungen ausgeht.

3. *Die Schrumpfspannungen beim „verspannungsfreien" Schweißen.*

Bei der Abkühlung haben die auch während des Schweißvorganges nur wenig erwärmten und nur elastisch verformten Teile das Bestreben, ihre ursprüngliche Länge wieder zu erreichen, während die durch Stauchung verkürzten Nahtzonen eine Länge einnehmen wollen, die kleiner als die ursprüngliche ist. Sie werden hieran aber wegen des bestehenden Zusammenhanges mit den nur elastisch verformten gehindert. Es bildet sich so ein Schweißspannungszustand in Nahtrichtung aus mit großen Zugspannungen in der Naht und in den höher erhitzten Zonen und aus Gleichgewichtsgründen gleichgerichteten, entsprechenden Druckspannungen (Reaktionsspannungen) in den nicht oder nur mäßig erwärmten Teilen.

Bei schmalen Erwärmungszonen bildet sich eine hohe, auf eine sehr schmale Nahtzone begrenzte Zugspannung aus, bei breiteren Erwärmungszonen sind die Zugspannungen kleiner, der größte Wert tritt oft außerhalb der Naht ein, das Zuggebiet ist jedoch entsprechend breiter. Die Reaktionsdruckspannungen bei schmalen Erwärmungszonen sind gering, bei breiten Erwärmungszonen werden die Druckspannungen wesentlich vergrößert, die Verwerfungen nehmen zu (Fig. 8).

Gleichzeitig mit den Längsspannungen bilden sich Querspannungen aus. Die Betrachtung für diese erstreckt sich zunächst nur auf Stumpfnähte, die Verhältnisse bei Kehlnähten sind noch schwieriger (Abschnitt 5 d). Vorausgesetzt ist zunächst, daß die Querschrumpfung äußerlich nicht durch Einspannung oder innere Verspannung (Abschnitt 5 a) gehemmt wird.

Die Erhitzung der Schweißfuge bewirkt eine leichte, wenn auch unmerkliche Verkrümmung der Kanten nach außen, so daß die Enden der Fuge größeren Abstand als die mittleren Teile haben. Bei der Abkühlung erfolgt die Rückkrümmung, besonders verstärkt unter dem Einfluß der Längsschrumpfkraft der verkürzten Nahtzonen. Das eingeschmolzene und erkaltende Schweißgut wird unter diesen

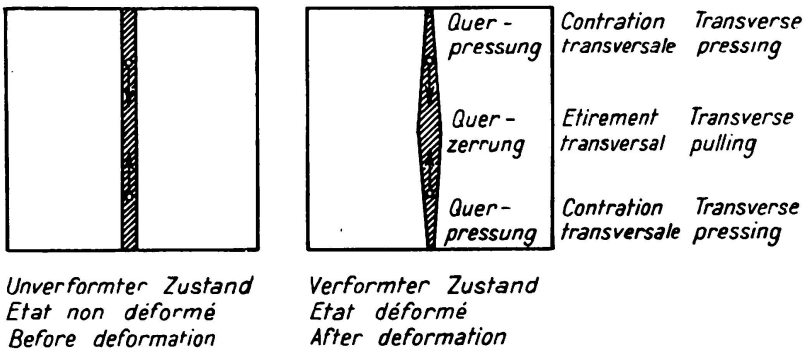


Fig. 9.

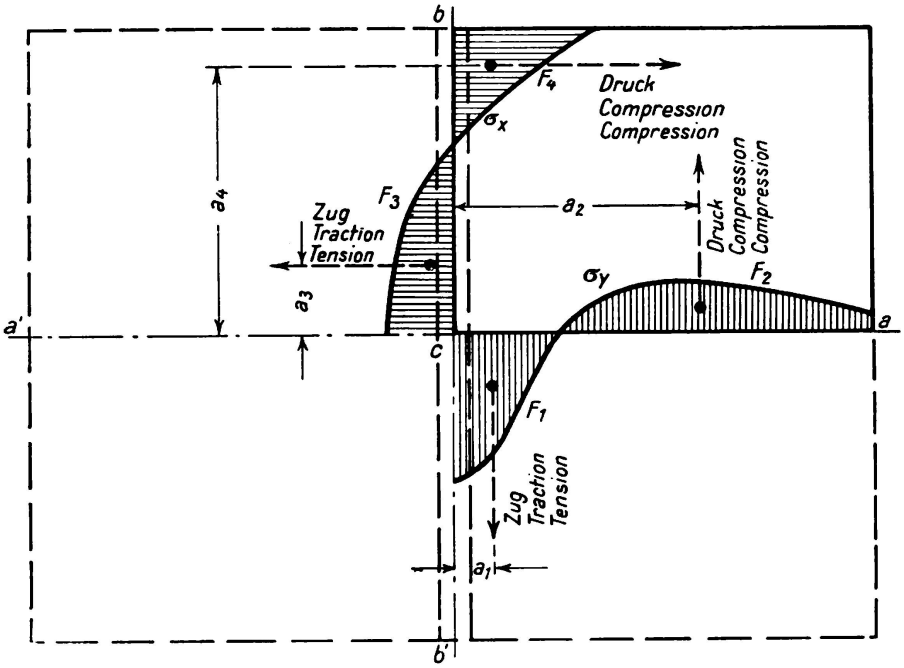
Die Längsschrumpfung als Erzeugende der Querspannungen bei freier Schweißung.

Einwirkungen an den Nahtenden gepreßt, in den mittleren Teilen auseinandergezerrt (Fig. 9). (Der Ausdruck „verspannungsfreies" Schweißen ist somit ein Widerspruch und kennzeichnet nur die äußeren Bedingungen.)

Die sich einstellenden Längs- und Querspannungen müssen den Gleichgewichtsbedingungen genügen (Fig. 10). Der Spannungszustand wurde von mir als der *natürliche Schweißspannungszustand* bezeichnet, weil er der Eigenart der Schmelz-

schweißung, die Verbindungen durch schmale eingeschmolzene Nähte herzustellen, entspricht.

Praktisch wird man zumindestens immer mit gewissen Verspannungen (Abschnitt 5) zu rechnen haben. Der Fall „querverspannungsfreies" Schweißen kann nur vorliegen bei gleichzeitiger Einschmelzung der ganzen Nahtlänge und der Nahthöhe und bei Anwendung der Widerstandsschweißung. Tatsächlich treten



$F_1 = F_2; F_3 = F_4$

$F_1\, a_1 - F_2\, a_2 = F_3 \cdot a_3 - F_4\, a_4$

Fig. 10.

Zusammenhang zwischen Längs- und Querspannungen auf Grund des inneren Gleichgewichts.

jedoch bei der Schweißung vieler und sehr wichtiger Stumpfnahtverbindungen die Auswirkungen der Querverspannungen so stark zurück, daß die Verhältnisse des „verspannungslosen" Schweißens im wesentlichen maßgebend sind. Die Querspannungen, die sich allein aus der Längsschrumpfung bei Fehlen sonstiger Querverspannung ergeben, sind tatsächlich so groß, daß sie auch in Fällen, in denen die Verspannungen in großem Maße vorliegen, nicht unbeachtet bleiben dürfen.

Durch experimentelle Untersuchungen ist die dargestellte Anordnung der Längs- und Querspannungen in Stumpfnähten bestätigt worden (Fig. 11, Platte 20, 3 und 15). Selbst bei längeren Nähten und auch bei dickeren, in vielen Lagen hergestellten Nähten[5] ist dieser Spannungszustand annähernd vorhanden,

[5] *G. Bierett:* Versuche zur Ermittlung der Schrumpfspannungen in geschweißten Stumpfnahtverbindungen. Z. V. D. I. 78 (1934) S. 709/715. — *G. Bierett* und *G. Grüning:* Schrumpfspannungen in autogen geschweißten Teilen. Autog. Metallbearbtg. 27 (1934) S. 259/266. — *G. Grüning:* Die Schrumpfspannungen beim Schweißen. Stahlbau 7 (1934) S. 110/112. Die drei genannten Arbeiten zusammengefaßt in Mitt. d. Deutsch. Mat.-Prüf.-Anst. Sonderheft 25, S. 65/86. — *F. Bollenrath:* Eigenspannungen bei Lichtbogen- und Gasschmelzschweißung. Abhandlung. Aerodyn. Inst. Techn. Hochsch. Aachen 1934 H. 14, S. 27/54. — *F. Bollenrath:* Weitere Untersuchungen über Eigenspannungen in einfachen Schweißnähten. Arch. f. d. Eisenhüttenw. 9 (1935/36) H. 4, S. 203/207.

so daß ihm eine besonders große praktische Bedeutung beizumessen ist. Das Wesentlichste ist das Auftreten von hohen Druckspannungen an den Nahtenden, die eine natürliche Sicherung der Enden bedeuten.

Der Einfluß der sich aus der Längsschrumpfung allein ergebenden Querspannungen auf die Festigkeit gibt erfahrungsgemäß, sofern sie allein in Betracht kommen, zu Bedenken keinen Anlaß.

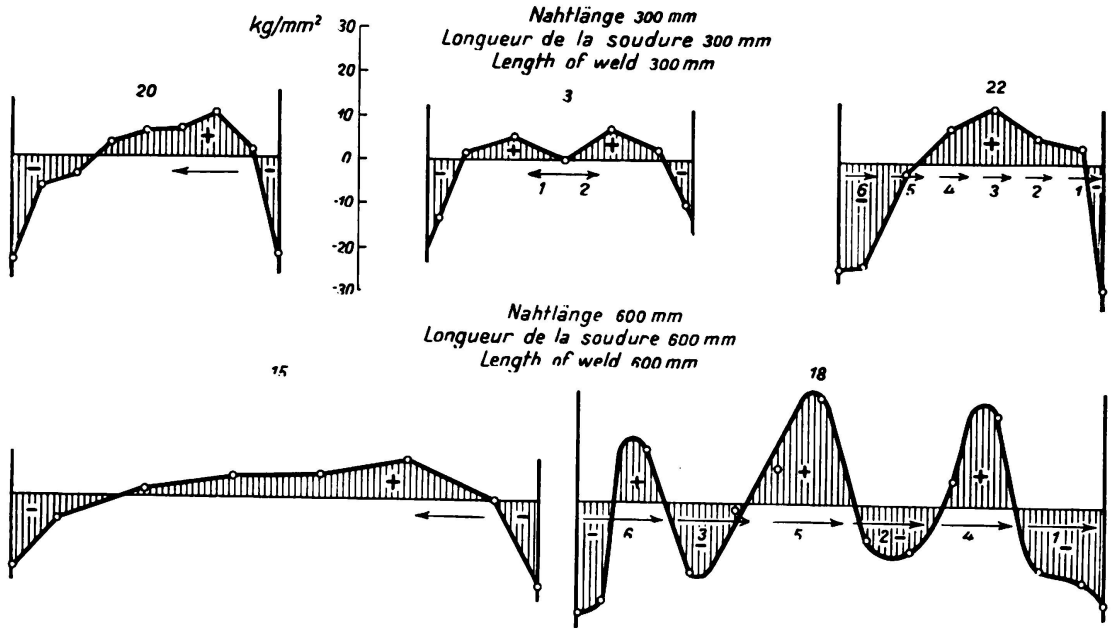


Fig. 11.

Werkstoff: St. 37. Plattendicke: 12 mm. Schweißverfahren: Lichtbogenschweißung. Schweißdrähte: Seelendrähte Böhler-Elite. Zahl der Lagen: 3.

Schweißquerspannungen für freie Schweißung bei verschiedenen Schweißwegen.

4. *Die Längsschrumpfspannungen.*

Die Längsschrumpfspannungen haben im Stahlbau besondere Bedeutung für die in der Hauptkraftrichtung lang durchlaufenden Nähte. Der Querschnitt der Nahtzonen nimmt allgemein nur einen kleinen Teil des Gesamtquerschnitts ein. Unter Nahtzone ist hierbei nicht nur der eigentliche Nahtquerschnitt, sondern dieser und der höher erhitzte und warmplastisch gestauchte Querschnittsanteil zu verstehen. Abgesehen von Ausnahmefällen wird der Gesamtquerschnitt (Schnitt senkrecht zur Naht) zum Nahtzonenquerschnitt immer sehr groß sein.

In den Nahtzonen treten hohe Zugspannungen auf, der andere Teil des Querschnitts ist vorwiegend auf Druck beansprucht. Die Spannungsverhältnisse in den Nahtzonen selbst sind für die im Betriebe zusätzlich auf Zug beanspruchten Teile von Bedeutung, die aus der Schweißung herrührenden Druckspannungen (Reaktionsspannungen) in den anderen Querschnittsteilen für auf Druck beanspruchte Teile.

Die Nahtlängsspannungen sind am größten bei sehr schmalen Erhitzungszonen und bei sehr festem Schweißgut bzw. Grundwerkstoff. Bei ungünstigem Werkstoff und besonders bei massigen Teilen liegt die Gefahr vor, daß die

Nähte Querrisse bekommen. Werkstoffe und Schweißdrähte, die hierzu Veranlassung geben, sind natürlich von vornherein auszuscheiden.

Die Größe der Nahtlängsspannungen kann durch breitere Erhitzungszone ermäßigt werden. Drähte mit größerer Wärmeentwicklung und entsprechende Schweißverfahren oder Schweißausführung sind in dieser Hinsicht günstig. Bei reinen Zuggliedern sollte man diesen Umstand beachten. Es darf aber nicht außer acht gelassen werden, daß mit größerer Erhitzungszone die auf größerer Breite wirkende resultierende Schrumpfkraft steigt und damit auch die gegenwirkenden Druckspannungen. Bei reinen Druckgliedern wird man deshalb lieber eine hohe, auf kleinem Gebiet wirkende Nahtzugspannung herstellen als kleinere, aber auf breiterem Gebiet wirkende Zugspannungen, die größere Druckspannungen nach sich ziehen. Auf die Drahtauswahl dürften diese Zusammenhänge nicht ohne Einfluß bleiben. Bei der Lichtbogenschweißung sollte man z. B. bei Druckgliedern diesen Gesichtspunkt anderen Forderungen, z. B. der der Formänderungsfähigkeit voranstellen. Im Trägerbau wird man wenigstens für die Längsnähte im Zuggurt zu schmale Erhitzungszonen vermeiden, während diese im Druckgurt so beschränkt wie möglich bleiben sollen. In der Praxis ist diese differenzierte Auswahl zur Zeit nicht üblich, eine Ausnutzung der vorhandenen Möglichkeiten würde jedoch sicher zur Verbesserung beitragen.

Über die Größe der Reaktionsdruckspannungen, die für die Konstruktion mit Rücksicht auf die Knickgefahr oder für die Werkstatt in ihrer Auswirkung als Verwerfungen besonders bei dünnen Teilen, Bedeutung gewinnen können, sind nur wenige exakte Unterlagen vorhanden. Für geschweißte I-Träger wurden die Reaktionsdruckspannungen in den Stehblechen von *Doernen*[6] ermittelt.

Man entnimmt dieser Untersuchung, daß der Konstrukteur die Nahtquerschnitte auf das wirklich notwendige Maß beschränken soll. Die Werkstatt muß andererseits in solchen Fällen bemüht sein, die Nahtzonenquerschnitte durch zweckmäßiges Vorgehen zu beschränken. Hierzu gehört Verwendung von Schweißdrähten ohne übermäßige Hitzeentwicklung und Einhaltung der angegebenen Nahtquerschnitte.

Fig. 12 zeigt das Ergebnis von Eigenspannungsmessungen an geschweißten Profilen, bei denen merkliche Kantendruckspannungen auftreten. Wenn auch anscheinend in derartigen Fällen selbst größere Eigendruckspannungen die Stabilität nicht stark beeinflussen, wie sich aus dem Ergebnis von Knickversuchen mit derartigen Baugliedern entnehmen läßt, die im Staatlichen Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem durchgeführt wurden, so müssen doch alle möglichen Maßnahmen der genannten Art getroffen werden, um eine hochwertige Konstruktion zu schaffen.

5. *Die Querverspannungen.*

a) *Äußere und innere Querverspannungen.*

In der Querrichtung kann eine Hemmung des Ausdehnungs- und Schrumpfungsvorganges vorliegen

1. durch *äußere Verspannungen.* Unter äußerer Verspannung ist die bereits vor dem Beginn der Schweißung einer Naht konstruktiv bedingte Fest-

[6] *J. Doernen:* Schrumpfungen an geschweißten Stahlbauten. Stahlbau 6 (1933) S. 22/24.

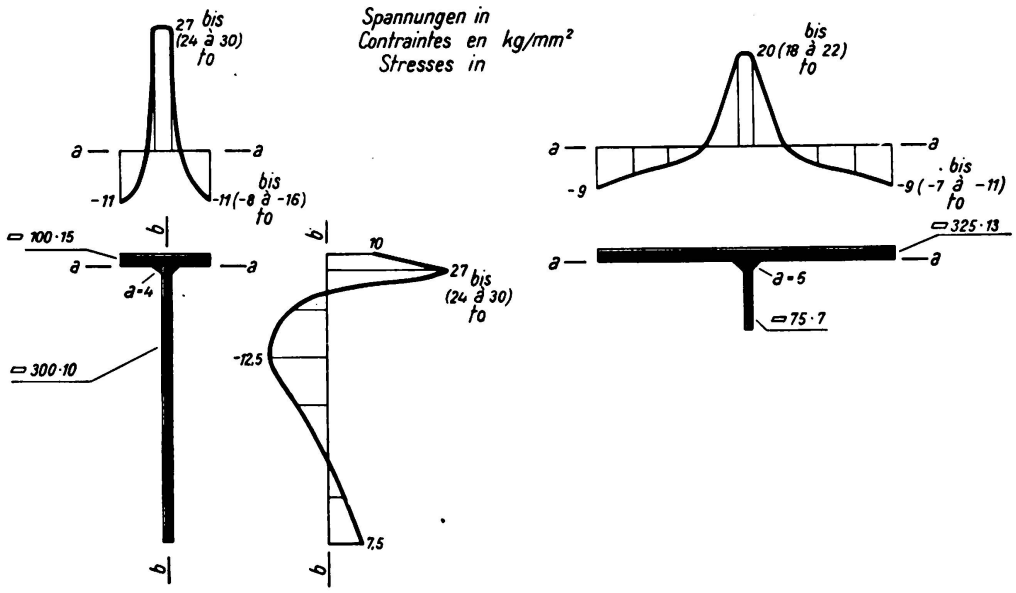


Fig. 12.

Schweißspannungen in Richtung der Nähte in Profilen, die durch Kehlnähte hergestellt wurden. Schweißverfahren: Lichtbogenschweißung.

Bemerkung: Die Zahlen in Klammern geben die in mehreren gleichartigen Untersuchungen festgestellten Grenzwerte an.

legung der zu verschweißenden Teile zu verstehen. Als Beispiele sind zu nennen Stehblechnähte zwischen durchlaufenden oder bereits verschweißten Gurtplatten und Gurtplatten und Stehblechnähte zur Verbindung sehr massiger Teile;

2. durch *innere Verspannungen.* Unter innerer Verspannung einer Naht verstehen wir die Verspannung zunächst frei gegeneinander beweglicher Teile durch die bereits fertiggestellten Nahtabschnitte oder Lagen, die ein querverspannungsfreies Schweißen der Naht über die ganze Länge oder über die ganze Nahthöhe unmöglich machen. Diese Spannungen entstehen durch die nicht gleichzeitig, sondern nacheinander erfolgende Einschmelzung, Erwärmung und Abkühlung der einzelnen Nahtabschnitte über die Nahtlänge und der einzelnen Lagen über die Nahthöhe;
3. einer äußeren Einspannwirkung ähnlich sind die *Verspannungen bei der Herstellung von Kehlnähten;*
4. Sonderfälle stellen die *Einschweiß- oder Aufschweißaufgaben* dar, also das Einschweißen von Flicken oder Aufschweißen von Platten in größeren Teilen mit Nähten über den ganzen Umfang. Auch bei gleichzeitiger Fertigstellung der ganzen Naht treten in diesen Fällen Querverspannungen auf. Die Verhältnisse gleichen also der äußeren Verspannung;
5. äußere Verspannung und innere Verspannung treten sehr häufig gleichzeitig auf.

b) *Die Abhängigkeit der Querspannungen von den Wärmebedingungen und den physikalischen Wärmeeigenschaften der Werkstoffe.*

Die thermische Ausdehnung der erwärmten, den Nahtzonen anliegenden Teile bewirkt bei Verspannungen im Bereich höherer Temperaturen Stauchungen der

Nahtzonen, die umso größer sind, je breiter die Erhitzungszonen sind. Die zusätzlichen Querschrumpfspannungen hängen also im wesentlichen von der Menge des zugeführten Schweißgutes und dem spezifischen Wärmeverbrauch pro Mengeneinheit des abgeschmolzenen Schweißgutes ab. Die in Fig. 3 dargestellten Querschrumpfungen stellen bereits einen Verhältnismaßstab für die Spannungsunterschiede bei verschieden großen Nahtquerschnitten dar, jedoch sind die dortigen Schrumpfungen nur das Ergebnis der Verengerung der Schweißfuge unter der Wärmewirkung und der Schrumpfung des eingeschmolzenen Materials, während sich bei der Einspannung infolge der Stauchwirkung in den erhitzten Zonen die Unterschiede noch vergrößern. Beim Schweißen ist zunächst immer der Schrumpfungsvorgang in der Naht gegenläufig der Ausdehnung der verschweißten Teile unter der Auswirkung der abfließenden Wärme. Beim Schweißen unter Verspannung wirkt diese Ausdehnung drückend auf die Nahtzonen. Von Bedeutung für diese Vorgänge sind die physikalischen Eigenschaften des Werkstoffes. Ausdehnungskoeffizient, spezifische Wärme, Wärmeleitfähigkeit und Streckgrenze, die keine Festwerte, sondern temperaturabhängige Größen sind und deshalb eine Errechnung sehr schwierig gestalten. Es läßt sich bei der Abschätzung der Auswirkung der genannten Faktoren jedoch wohl übersehen, daß bei großer zugeführter Wärmemenge sich viel ungünstigere Verhältnisse einstellen müssen, als bei geringer, wie es Versuche und praktische Erfahrungen auch bewiesen haben.

c) *Maßnahmen zur Herabsetzung der Verspannungswirkung.*

Die Geringhaltung der Nahtquerschnitte und Vermeidung von Drähten, die unnötig großen spezifischen Wärmeaufwand erfordern, ist deshalb eine der wichtigsten Bedingungen zur Herabsetzung der Verspannungen äußerer und innerer Art und zur Erreichung von Nähten ohne übermäßig große Querspannungen.

Die Verspannungen äußerer oder einer äußeren Verspannung ähnlichen Art werden am sichersten durch elastische Formung der an die Schweißfugen angrenzenden Teile und durch zweckentsprechende Reihenfolge der einzelnen Nähte ermäßigt. Leichte Vorwölbung der Schweißkanten aus der Blechebene (bei unsymmetrischen Nahtquerschnitten nach der Seite der größeren Öffnung), bei Einschweißung von Platten mit zwei parallel zu führenden Nähten und beim Ein- und Aufschweißen von Teilen um ihren ganzen Umfang leichte Wölbung dieser Teile zur Erzielung elastischer Nachgiebigkeit erleichtern schwierige Aufgaben beträchtlich. Ein wichtiges Beispiel ist der Stehblechstoß in einem Universalstoß in einem Träger (Fig. 13). Hier erleichtert die Anwendung eines nicht zu kurzen und ganz leicht zylindrisch gewölbten Zwischenstückes und die Schaffung von Dehnlängen in den angrenzenden Stehblechteilen durch vorläufige Offenlassung der anschließenden Halsnähte die Herstellung des Stehblechstoßes, auch wenn die Gurtlamellenstöße, wie zweckmäßig, bereits geschlossen sind. *Die Behinderung des Schrumpfens der Gurtplattenstöße infolge Reibungswiderstand kann durch Maßnahmen, die den Schrumpfvorgang unterstützen,* z. B. Ansetzen von Spannschlössern oder dergl. *beseitigt werden.*

Innere Verspannungen einer Naht, die nach der im Abschnitt 5a gegebenen Erläuterung *erst durch den Schweißvorgang innerhalb der Naht entstehen, sind*

dementsprechend *vor allem durch zweckentsprechende Schweißausführung zu vermindern. Von Bedeutung hierbei sind Schweißfolge innerhalb der Naht, Schweißgeschwindigkeit und Lagenzahl.*

Die eintretende Querverspannung über die Nahtlänge ist eine Folge der nacheinander erfolgenden Einschmelzung und Abkühlung. Diese Querverspannung *wird um so kleiner, je gleichmäßiger das Temperaturfeld zwischen der Stelle, bis zu der die Naht jeweils fertiggestellt ist, und dem Nahtanfang ist.* D. h. große Schweißgeschwindigkeiten dienen der Herabsetzung der Querverspannung über

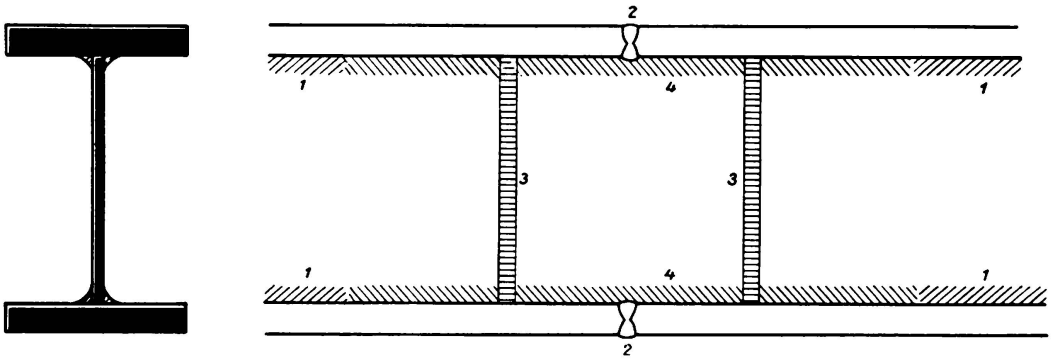


Fig. 13.
Zweckmäßige Schweißfolge bei einem Trägerstoß.

die Nahtlänge. Praktisch stark vermindern kann man diese Querverspannung durch Wärmeanwendung während der Schweißung (Abschnitt 7 a) oder wie heute üblicher, durch Anwendung der *schrittweisen Schweißung.* Am besten ist die *Pilgerschrittschweißung* entweder von einem Nahtende aus oder von der Mitte symmetrisch nach beiden Seiten fortschreitend (Fig. 14). *Besonders vorteilhaft ist diese Schweißfolge für die erste Lage,* da einmal die Rißgefahr

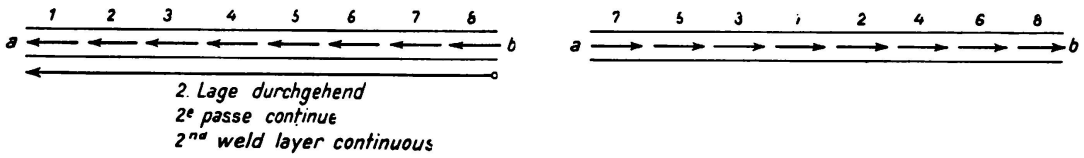


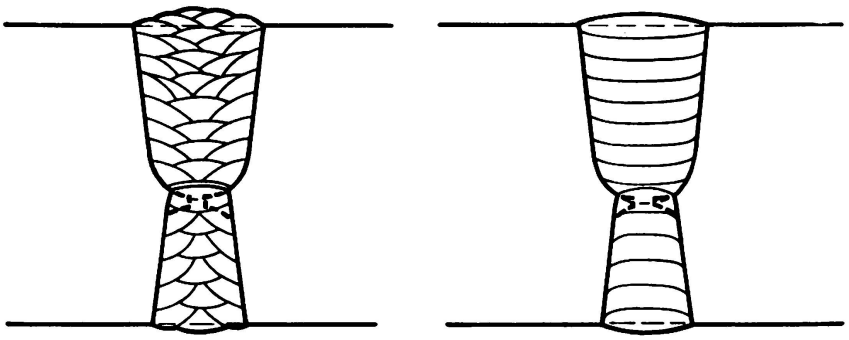
Fig. 14.
Pilgerschrittschweißung.

(Abschnitt 6) und die bei durchlaufender Schweißung leicht eintretende Überschiebung der noch nicht fertiggestellten Nahtenden infolge der voreilenden Wärme stark herabgesetzt wird, während die weiteren Lagen mit wechselnden Hauptrichtungen oft durchlaufend geschweißt werden. Die Schritte werden je nach der Nahtlänge und der Plattendicke zu 10 bis 40 cm, aber bei sehr langen Nähten bisweilen auch noch länger gewählt. Eine gute und enge Heftung im Abstand der Schrittlängen ist notwendig. Sehr ungünstig ist der sogenannte Sprungschritt, da er sehr große Querspannungen hervorrufen kann (Fig. 11, Platte 18).

Die Anwendung der Schrittschweißung hat vor allem im Schiffbau, wo sehr lange Nähte herzustellen sind, große Bedeutung gewonnen. Bei Einschweißungen von Platten ist ihre Anwendung kaum zu umgehen. Im Trägerbau kann sie für

die Herstellung von längeren Stehblechnähten, vor allem für die Schweißung der Wurzellage, vielleicht auch für die lang durchlaufenden Nähte, von Wert sein.

Bei kleinen Längen bis zu 400 mm bietet die Schrittschweißung keine Vorteile. Bei den mittleren im Stahlbau so häufigen Stumpfnahtlängen von 500 bis 800 mm oder etwas mehr ist ihre Anwendung vielleicht bei vorliegender äußerer Verspannung bei Herstellung der Wurzelnaht von Wert. In der Regel werden diese Nähte aber auch noch ohne Schwierigkeiten durchlaufend oder in zwei Abschnitten herzustellen sein. Bei Unterteilung in zwei Nahtabschnitte ist bei Fehlen einer äußeren Verspannung bei Schweißung von außen nach der Mitte oder von der Mitte nach außen auf jeden Fall eine große Druckspannung an den Nahtenden zu erwarten, bei äußerer Verspannung gibt die Schweißung von den beiden Nahtenden nach der Mitte zu besser Gewähr, daß an den Nahtenden Druckspannungen oder nur kleine Zugspannungen verbleiben.



Raupenanordnung
Disposition en chenille
Arrangement of passes

Lagenanordnung
Disposition en passes
Arrangement of weld layers

Fig. 15.

Schweißung von dicken Stumpfnähten.

Die Verspannungen über die Nahthöhe können durch die Art der Schweißausführung, vor allem der Fugenform und der Lagenzahl abgemindert werden. Man kann auf Grund von Überlegungen übersehen, daß bei einseitigen Nahtformen, die mit sehr vielen dünnen Lagen hergestellt werden, eine sehr ungleichmäßige Verteilung über die Höhe und größere Spannungsspitzen in den oberen Lagen auftreten müssen.

Symmetrische oder annähernd symmetrische Nahtquerschnitte, die nach Möglichkeit wechselseitig geschweißt werden, werden allgemein bevorzugt.[7] Hinsichtlich der Lagenzahl, über Raupenanordnung im Nahtquerschnitt und Drahtdurchmesser besteht in den verschiedenen Anwendungsgebieten der Schweißtechnik keine Einheitlichkeit. Der Behälterbau ist auf Grund langjähriger Erfahrungen in der Dickblechschweißung[8] mehr zur Anwendung dickerer Drähte übergegangen. Die Lagendicke wird jedoch nicht übermäßig groß gewählt, nicht größer als 3 bis 4 mm, aber auch nicht zu dünn. Die Schweißung erfolgt in breiten Lagen von einer Seite des Nahtquerschnittes zur anderen. Im Stahlbau

[7] *E. Höhn,* a. a. O. Fußnote, vor Fig. 3.

[8] *Joellenbeck:* Elektroschweißung 8 (1936).

ist demgegenüber die Anwendung dickerer Drähte noch sehr beschränkt. Man trifft sogar häufig im Verhältnis zur Materialdicke unverhältnismäßig dünne Schweißdrähte. Geschweißt wird meistens nicht in breiten Lagen, sondern raupenförmig (Fig. 15), wobei die in der Mitte liegenden Raupen zur Herabsetzung der Schrumpfspannungen *nach* den seitlichen Raupen gelegt werden. Das Schweißen in Raupen kann eher zu Fehlern führen als das lagenweise Schweißen, eine Annäherung an die Arbeitsweise des Behälterbaues scheint angezeigt. Besondere Maßnahmen können zur Herabsetzung der Verspannungen beitragen. (Abschnitt 7b).

d) *Die Schrumpfspannungen bei Kehlnahtverbindungen.*

Die Kehlnähte werden nur auf der Oberfläche der zu verbindenden Teile mit geringer Tiefenwirkung eingeschmolzen. Ausdehnung und Schrumpfung des Schweißgutes erfolgen unter stärkster Behinderung in der Längsrichtung und in

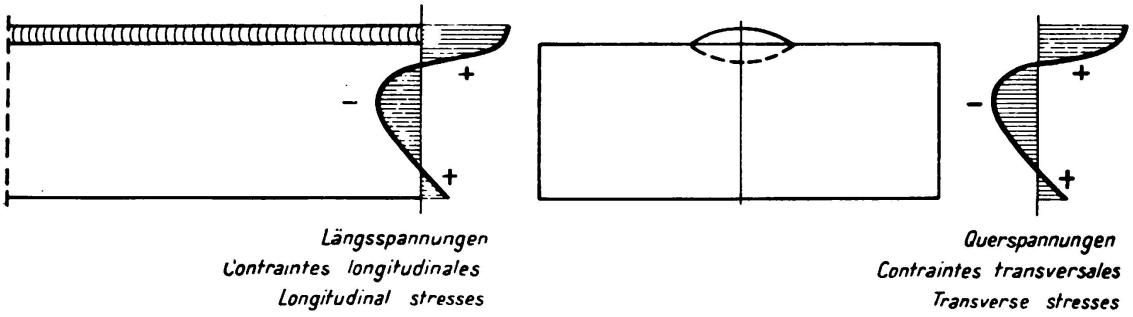


Fig. 16.

Längs- und Querspannungsanordnung beim Aufschweißen einer Raupe.

der Querrichtung durch das seitlich und unter der Raupe befindliche Material. Bei Herstellung einer Raupe auf einer Blechoberfläche ergeben sich die in Fig. 16 dargestellten Spannungsverhältnisse in der Längs- und in der Querrichtung, wobei die größten Zugspannungen in beiden Richtungen mindestens der Werkstoffstreckgrenze entsprechen. Zu dieser zweiachsigen Beanspruchung mit großen Längs- und Querspannungen tritt eine etwa senkrecht gerichtete große Beanspruchung durch die Schrumpfverspannung der aneinander gefügten Teile. Zumindesten die Zonen in Nähe sämtlicher begrenzender Einbrandflächen, wahrscheinlich aber auch der größte Teil der Naht, unterliegen einem hochgradigen räumlichen Spannungszustand allseitigen Zuges (Fig. 17).

Die Schrumpfverspannung bei ⊥ förmigen Verbindungen kann durch zeitlich nacheinander erfolgendes Schweißen der beiden parallel laufenden Nähte herabgesetzt werden, weshalb bei längeren Nähten oft ein versetztes Schweißen der beiden Nähte vorgenommen wird. Bei parallel verlaufenden Kehlnähten z. B. für das Aufschweißen von Platten ist ein größerer Abstand zwischen den Nähten durch entsprechende Anordnung günstig.

Die Kehlnahtverbindungen unterliegen im Verhältnis zu Stumpfnahtverbindungen infolge der viel ungünstigeren Eigenspannungsverhältnisse einer erhöhten Rißgefahr. Die kurzen Ausführungen an dieser Stelle sollen im nächsten Abschnitt, der sich allgemein mit dieser Frage beschäftigt, ergänzt werden.

6. *Die Rißgefahr.*

Risse können auftreten unmittelbar nach der Schweißung im heißen Zustand und bei der Abkühlung im Temperaturbereich verringerter Formänderungsfähigkeit, also bei 200—300° C (Blaubruchgebiet). Ob Risse infolge der Schweißspannungen auch erst bei voller Abkühlung ohne zusätzliche äußere Beanspruchung eintreten können, erscheint fraglich. Wahrscheinlich handelt es sich bei der Mehrzahl der Schadenfälle um Risse bei höheren Temperaturen; selbst Risse, die erst nach Beendigung der Schweißarbeiten festgestellt wurden, sind wahrscheinlich nur die Auswirkungen von Anrissen, die bei der Schweißung bereits eingetreten sind. (Von Heftstellenrissen und Rissen leichter Nähte, die

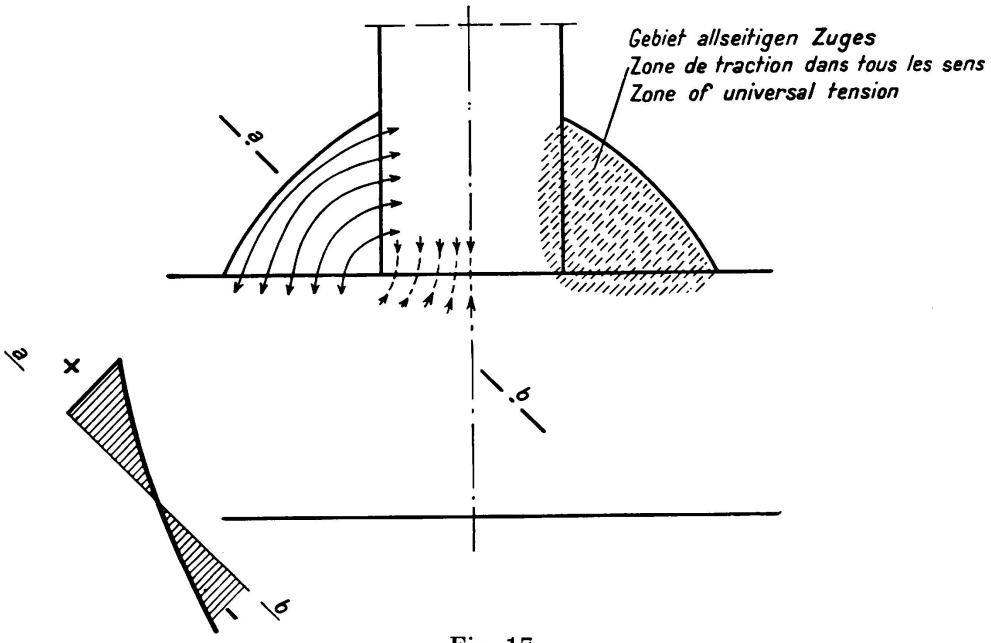


Fig. 17.
Schrumpfwirkung bei Kehlnähten.

durch das Schweißen anderer Nahtabschnitte eintreten, wird hierbei abgesehen.) In vielen Fällen konnten Risse als ausgesprochene Warmrisse ($t \geqq 600^0$ C) erkannt werden.

Die Beurteilung der Rißgefahr und Maßnahmen zu ihrer Verhütung müssen deshalb besonders auf den Vorgängen und Eigenschaften des Schweißgutes bei höheren Temperaturen beruhen. Die Betrachtung des im erkalteten Zustand verbleibenden Spannungszustandes allein kann leicht zu Fehlschlüssen führen. Als Schweißgut muß hierbei immer das sich ergebende Mischprodukt aus niedergeschmolzenem Draht und dem aufgeschmolzenen Grundwerkstoff angesehen werden.

Der thermische Ausdehnungskoeffizient für Stahl bei Raumtemperatur beträgt $1{,}1 \cdot 10^{-5}$ (pro Grad), er wird über 100^0 allmählich etwas größer. Die Gesamtschrumpfung des Schweißgutes bei völlig freier Schrumpfmöglichkeit bei einer Abkühlung von 700^0 C auf Raumtemperatur beträgt etwa 1 %. Bei Verspannungen tritt zu dieser Größe noch ein aus der Stauchung der höher erhitzten Nachbarzonen herrührender Schrumpfungsanteil, dessen Größe je nach den

gegebenen konstruktiven Bedingungen (Verspannungsgrad) und den Schweißbedingungen ausfällt. Eingehendere Betrachtungen hierüber sind von *Wörtmann* und *Mohr*[9] angestellt, die für einen bestimmten Fall unter sehr ungünstigen Verhältnissen für verschiedene Schweißbedingungen eine Gesamtschrumpfung von 4 bis 6,5 % errechnen. In Bezug auf die Dehnfähigkeit des niedergeschmolzenen Drahtes, die bei den heute allgemein verwendeten Drähten diesen Betrag, besonders im Bereich höherer Temperaturen, um ein Vielfaches übersteigt, wären Risse kaum erklärlich.

Bei der Herstellung von Kreuzstoßverbindungen von 12 mm dicken Blechen aus unlegierten Stählen bis zu höheren Kohlenstoffgehalten ($\leq 0{,}7$ %) wurde von *Zeyen*[10] bei $C > 0{,}4$ % bei Anwendung stark umhüllter Drähte E 52 h (Lieferungsbedingungen der Deutschen Reichsbahn) Warmrißgefahr festgestellt. Hingegen trat bei Anwendung von schwach umhüllten Elektroden und legierten Seelenelektroden, die in der Regel einen geringeren Biegewinkel und geringere Kerbschlagzähigkeit ergeben, keine Warmrißgefahr mehr auf. Diese Erscheinungen sind wohl so zu erklären, daß die bei den letztgenannten Drähten sich ergebende Vermischung mit dem Grundwerkstoff geringer sein dürfte und deshalb in diesem Fall günstiger ist als bei den Manteldrähten, so daß die hinsichtlich der Formänderungseigenschaften normalerweise ungünstigeren Drähte je nach den besonderen Verhältnissen die besser geeigneten werden können.

Da bei den Schweißspannungen immer ein zweiachsiger, meistens jedoch und besonders bei Kehlnahtverbindungen ein dreiachsiger Schweißspannungszustand vorliegt, sind Warmfestigkeit, Warmstreckgrenze und Dehnungsfähigkeit bei einer bestimmten Temperatur, die für den einachsigen Spannungszustand bestimmt sind, kein Maßstab für die Rißsicherheit. Da es kaum möglich ist, sich über die bei der vorliegenden Beanspruchung maßgeblicheren inneren Kohäsionsverhältnisse des Mischproduktes aus Draht und Grundwerkstoff bei höheren Temperaturen Aufschluß zu verschaffen, ist man gezwungen, empirische Versuche über die Rißneigung vorzunehmen, wie sie in Fig. 1 dargestellt sind. Bei derartigen Versuchen bekommt man ein summarisches Bild über die werkstoffliche und Formeignung des niedergeschmolzenen Schweißgutes. *Hierbei spielt* meines Erachtens *die Formfrage mit Rücksicht auf den Verlauf der Schrumpfstärke keine geringe Rolle.*

Bei den Kehlnähten ist nach Abb. 17 bei etwa geradliniger Begrenzung des Nahtdreiecks ein ungestörter Verlauf der Hauptspannungslinien infolge der Schrumpfkräfte zu erwarten; bei ausgesprochenen Hohlnähten muß eine Störung des Kraftlinienverlaufs nahe der Oberfläche mit entsprechenden Spannungsspitzen eintreten (Fig. 18). *Ausgesprochene Hohlnähte reißen deshalb erfahrungsgemäß leichter* als Nähte mit annäherndem Dreiecksquerschnitt. Der häufig beobachtete Rißansatz an hohlen Kraterenden dürfte nicht zuletzt auf diesen Umstand zurückzuführen sein. Die aus Erkenntnissen über das dynamische Verhalten veranlaßte stärkere Bevorzugung der Hohlnähte muß mit Rücksicht auf die Schrumpfwirkungen auf das Notwendige beschränkt bleiben, umso mehr, als

---

[9] *F. Wörtmann* u. *W. Mohr:* Wärmespannungen bei Schweißungen und der Einfluß auf die Sicherheit ausgeführter Konstruktionen. Schweiz. Bauzeitung Bd. 100, S. 243/246.

[10] *K. L. Zeyen:* Schweißen unlegierter Stähle höherer Festigkeit. Stahl u. Eisen 56 (1936) S. 654/657.

es bei wechselnden Beanspruchungen weniger auf die konkave Nahtoberfläche, als auf einen allmählichen Übergang der Blechoberfläche zur Nahtoberfläche ankommt und bei bestimmten Beanspruchungen (Schubnähten) auch diesem Gesichtspunkt keine überragende Bedeutung beizumessen ist.[11]

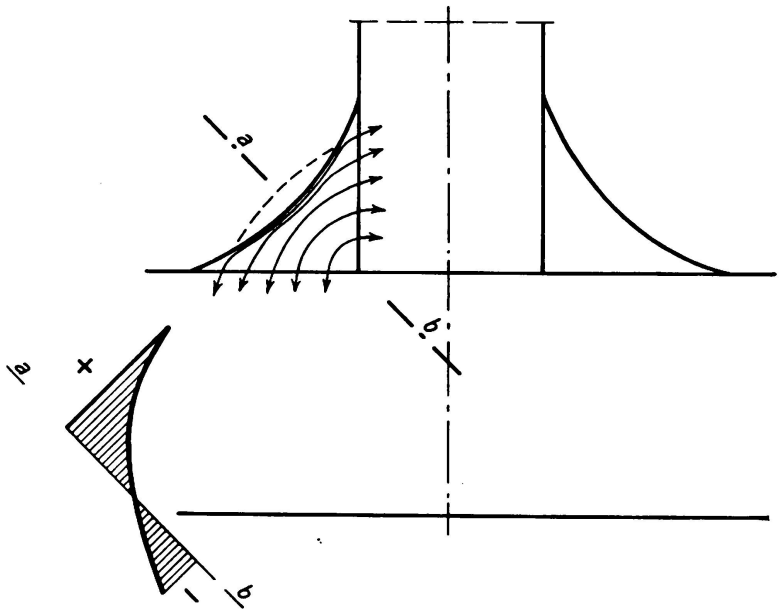


Fig. 18.
Schrumpfwirkung bei ausgesprochenen Hohlkehlnähten.

Auch bei Stumpfnähten hat bei vorliegender Verspannung die Form der einzelnen Lagen eine Bedeutung, da bei ungünstiger Raupenform unter sonst gleichen Verhältnissen leichter Risse eintreten als bei guter Raupenform (Fig. 19).

Im Verhältnis zur Werkstückdicke zu dünne Raupen, vor allem bei den Wurzellagen, führen leicht zu Rissen. Bei Stumpfnähten reißt eine zu dünne Wurzellage

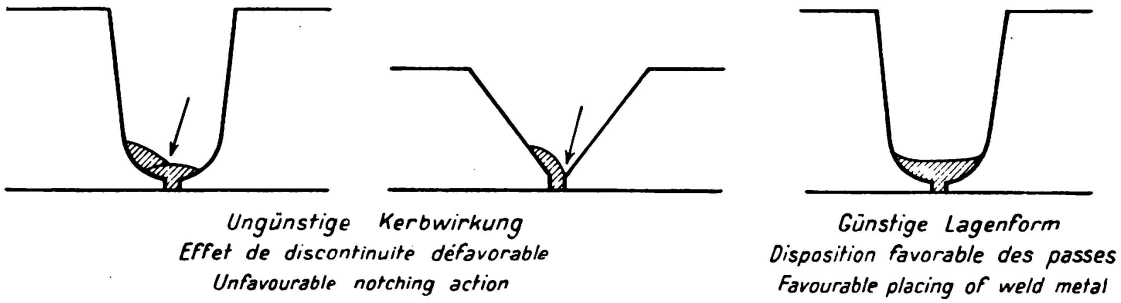


Fig. 19.
Rißgefahr bei ungünstiger Raupenform.

bei dickeren Platten bei den meistens vorliegenden Verspannungen, weil der Kraftfluß an sich schon sehr ungünstig ist (Fig. 20). Die meisten Risse nehmen ihren Ausgang von der Wurzel; im Behälterbau wird deshalb oft die Wurzellage mitsamt dem darunter befindlichen dünnen Steg des Grundwerkstoffes rückwärtig

[11] *G. Bierett:* Die Lehren der Spannungs- und Festigkeitsforschung für die Ausbildung und Ausführung geschweißter Konstruktionen. Elektroschweißung 6 (1935) S. 141/150.

ausgekreuzt (Abb. 15). *Zur Vermeidung von Rissen bei der Herstellung dicker Nähte sollen die Schweißarbeiten nicht unterbrochen werden, bis ein größerer Teil der Nahthöhe ausgefüllt ist.* Bei wechselseitigem Schweißen unter Drehen der Teile soll zunächst auf der einen Seite eine gewisse Höhe fertiggestellt werden. Bei Einschweißung von Platten[12] um den ganzen Umfang, Werkstoff St 52, konnten Rißbildungen dadurch vermieden werden, daß jeder Abschnitt der schrittweise hergestellten Naht über die ganze Dicke (in mehreren Lagen) fertiggestellt wurde, ehe die weiteren Abschnitte in Angriff genommen wurden.

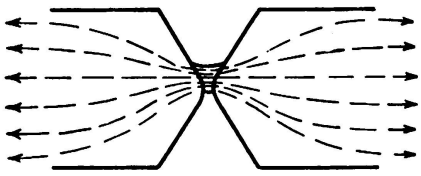


Fig. 20.
Gefährdung der Wurzellagen infolge ungünstiger Kraftwirkung.

Bei Kehlnähten führt eine im Verhältnis zur Werkstückdicke zu dünne Wurzellage fast immer zu Rissen. Bei der Schweißung dünner Raupen wird der aufzuschweißende Teil nicht genügend durchwärmt und über eine zu geringe Tiefe plastiziert, so daß die Verspannungswirkung sehr groß wird. (Abb. 21).

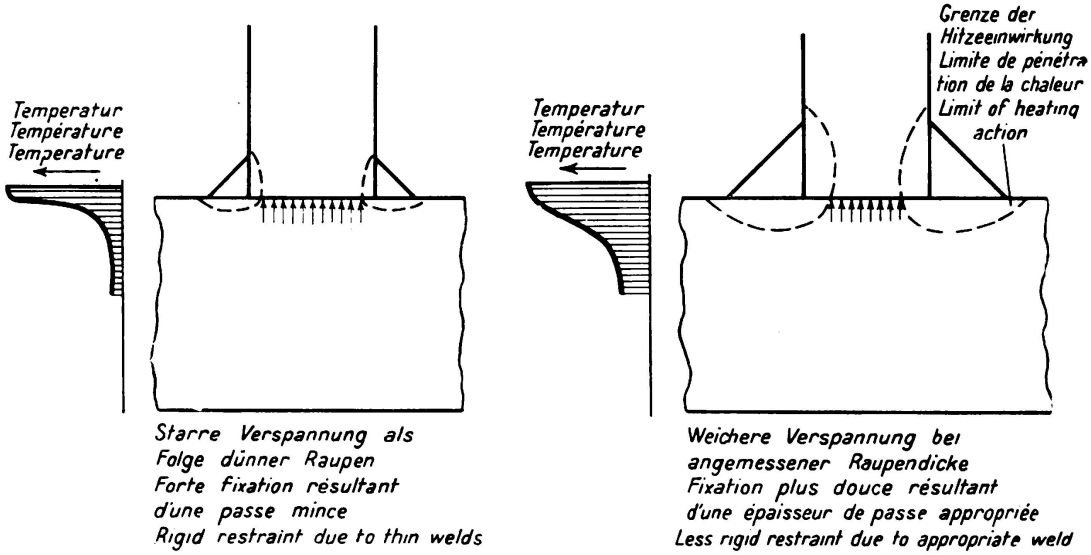


Fig. 21.
Verspannungswirkung bei Kehlnähten.

Bei dickeren Teilen kann beim Aufschweißen zu dünner Raupen die Abschreckwirkung so groß sein, daß bei festeren Stählen die unter einem dreiachsigen Spannungszustand stehenden Einbrandzonen Risse bekommen können. Man kann in diesem Fall ein Ausschälen der Raupe aus dem Werkstoff beobachten.

Die Raupendicke muß in einem angemessenen, nicht übermäßig kleinen Verhältnis zur Materialdicke stehen. (Zu beachten auch bei sogenannten Dichtungsnähten auf dicken Teilen). Bestehende Vorschweißbedingungen mit dünnen Drähten dürfen nicht zu eng gehandhabt werden.

---

[12] *H. Bühler* u. *W. Lohmann:* Beitrag zur Frage der Schweißspannungen. 3. Folge. Eigenspannungen bei der Flickenschweißung. Elektroschweißung 5 (1936) S. 221/229.

Im Trägerbau können bei den Halsnähten Schwierigkeiten der erörterten Art *durch Anwendung von Sonderprofilen* wie Nasenprofile (Union), Wulstprofile (Doernen) und S.T.-Profile (Krupp) *weitgehend vermieden werden.* Die besondere Bedeutung all dieser Profile liegt darin, daß die ausgewalzten, weniger massigen Teile: Nase, Wulst oder Steg, eine bessere Wärmehaltung herbeiführen und allzuschnelle Abkühlungen verhindern. Zur Vermeidung der Rißgefahr sollte man um so mehr diese oder ähnliche Profile verwenden, je größer die Dicke und je fester der Werkstoff ist.

7. *Besondere Maßnahmen zur Spannungsermäßigung und zur Vermeidung der Rißgefahr.*

a) *Wärmemaßnahmen.*

Besondere Wärmemaßnahmen können angewendet werden *vor, während und nach der Schweißung. Sie haben den Zweck abschreckähnliche Abkühlung zu vermeiden, die Rißgefahr während der Schweißung herabzusetzen, gleichmäßigere Spannungsverhältnisse über Nahtlänge und Dicke herbeizuführen und die Längsspannungen in den Nahtzonen zu ermäßigen.* Nach den besonderen Umständen steht einer oder der andere dieser Punkte im Vordergrund, so daß je nach den vorliegenden Verhältnissen die Wärmemaßnahmen vorzunehmen sind.

1. *Vorwärmungen* sind bei massigen Teilen und besonders bei festeren Stählen vor Legen der ersten Lage zu empfehlen. Der Stahlbau sollte von der Vorwärmung der Schweißkanten bezw. der Einbrandflächen mehr Gebrauch als heute üblich machen. Bei nur einseitiger Nahtanordnung, z. B. bei Herstellung eines ⊥ Profils, kann ein stärkeres Vorwärmen zur Erreichung eines verkrümmungslosen Endzustandes dienlich sein.

2. *Wärmungen der bereits fertiggestellten Nahtabschnitte während der Schweißarbeiten* beim Schweißen der weiteren können die Verspannungen bei langen Nähten und bei dicken Nähten und damit die Rißgefahr herabsetzen.[13] Bei langen, durchlaufend geschweißten Nähten empfiehlt sich Herstellung eines gleichmäßigeren Temperaturfeldes durch Nachwärmung der bereits geschweißten Länge vor allem bei den der Rißgefahr besonders ausgesetzten Wurzellagen.

Bei der Herstellung dicker Nähte unter äußerer oder innerer Verspannung, bei denen besonders bei den dünnen zuerstgelegten Lagen Rißgefahr vorliegt (Abb. 20), kann ein Warmhalten derselben durch Nachwärmung den Zweck erfüllen, die Schrumpfung zu verhindern, bis ein größerer und widerstandsfähiger Teil der Nahthöhe ausgefüllt ist. Bei dicken Nähten müßte ein rückwärtiges Nachwärmen der dem Schweißer jeweilig abgekehrten Seite imstande sein, die Verspannungen über die Dicke herabzusetzen. Doch werden diese wahrscheinlich sehr vorteilhaften Maßnahmen bis heute wenig angewandt.

Wärmungen der Zonen neben der Naht während der Schweißarbeiten können bei vorliegenden starken Verspannungen angewandt werden.

Die genannten Wärmemaßnahmen dienen der Vermeidung der Rißgefahr während der Schweißarbeiten. Es ist jedoch nicht zu erwarten, daß die ver-

---

[13] *G. Bierett:* Welche Wege weisen die Erkenntnisse über Schrumpfwirkungen den Arbeitsverfahren für die Herstellung von Stumpfnähten im Großstahlbau. Stahlbau 9 (1936) S. 69/71.

bleibenden durchschnittlichen Querspannungen kleiner sind als ohne Anwendung von zusätzlicher Wärme, eher das Gegenteil tritt ein. Zur Gegenwirkung können jedoch mechanische Maßnahmen, vor allem das Hämmern angewendet werden. (Abschnitt 7b).

3. Die *Nachwärmungen* können angewendet werden, um stark ungleichmäßige Spannungsverhältnisse innerhalb der Nahtlänge und über die Nahtdicke auszugleichen oder um die Längsspannungen der Nähte stark zu ermäßigen. Bei vorliegender äußerer Verspannung oder ähnlichen Verhältnissen (Einschweißaufgaben z. B. Flicken) ist jedoch mit einer Ermäßigung der durchschnittlichen Querspannungen nicht zu rechnen. Ein recht günstiger Ausgleich stark ungleichmäßiger Spannungen ist durch Erwärmung bis zur beginnenden Dunkelrotglut zu erreichen.[14] Streifenweises Nachwärmen der Nahtzonen kann bei entsprechenden Temperaturen (550 bis 600° C) die Nahtlängsspannungen sehr stark ermäßigen.[15] Es ist bereits bei der Schweißung sehr großer Rohre angewendet worden.[16] Bei so starken Erwärmungen können jedoch größere Verwerfungen auftreten, so daß diese Arbeiten mit großer Vorsicht auszuführen sind.

Allgemein kann eine verständnisvolle Verwendung der Wärme zur Verbesserung der geschweißten Teile beitragen. Trotzdem muß ihre systematische Verwendung auf besonderer Fachkenntnis begründet sein.

Vor Maßnahmen zur Beschleunigung der Abkühlung oder zur künstlichen Kalthaltung der zu verschweißenden Teile ist zu warnen. Sie dienen zwar zur Vermeidung von Verkrümmungen und Verwerfungen, erhöhen aber in der Regel die Spannungen. *Die Wärme soll von der Schweißnaht durch die zu verbindenden Teile ohne künstliche Maßnahmen abgeleitet werden.* (Sonderfälle, in denen vielleicht einmal eine künstliche Kühlung von Wert und ohne Schädigung sein könnte, kommen im Stahlbau kaum in Betracht.)

b) *Das Hämmern.*

Gehämmert werden die Nähte oder die der Naht benachbarten Zonen. Das Hämmern wird entweder im rotwarmen oder im kalten Zustande vorgenommen.

Das Rotwarmhämmern der Naht erfordert ein schmiedbares Schweißgut. Es wurde bisher meistens nur bei der Gasschmelzschweißung angewendet, wird heute aber auch schon bei elektrisch geschweißten Stumpfnähten angewendet. Es hat nicht den Zweck, die Spannungen zu ermäßigen, sondern die Naht zu verdichten: man wendet es auch zur Zurückrichtung an. Das *Rotwarmhämmern* der Zonen *neben der Naht* erleichtert bei starker Verspannung ein rißfreies Schweißen; es wird im Stahlbau m. W. selten angewendet.

Das *Kalthämmern der Naht erfordert vor allen Dingen ein geeignetes Schweißgut,* das durch das Hämmern keine Haarrisse bekommt und nicht spröde wird. Das Hämmern dient der Ermäßigung der zurückbleibenden Spannungen. Bei Hämmern der Naht werden Längs- und Querspannungen ermäßigt, bei Hämmern

---

[14] *G. Bierett* u. *G. Grüning:* Schrumpfspannungen in autogen geschweißten Teilen. Autog. Metallbearbeitung 27 (1934) S. 259/266.

[15] *Ebel* u. *Reinhardt:* Spannungsmessungen an geschweißten Rundnähten. Autog. Metallbearbeitung 27 (1934) S. 305/310.

[16] *R. Schmidt:* Einige Bemerkungen zur Frage der Wärmenachbehandlung großer geschweißter Werkstücke. Elektroschweißung 6 (1935) S. 231/232.

der Zonen neben der Naht voraussichtlich nur die Querspannungen. Bei dicken Nähten werden oft Zwischenhämmerungen einzelner Lagen zur Vermeidung von Überspannungen und Verkrümmungen vorgenommen, zweckmäßig durch Einstemmen von Fugen in Nahtmitte, die über die ganze Nahtlänge verlaufen.

Auch das Hämmern erfordert besondere Fachkenntnisse in Bezug auf den Werkstoff.

Zusammenfassung.

Die Schweißung ist ein schwieriger metallurgischer Vorgang. Die bei der Abkühlung der Nahtzonen stattfindenden Vorgänge können bei Werkstoffen gewisser Zusammensetzung und ungünstigen Abkühlungsgeschwindigkeiten zu Rißbildungen führen. Die Grundwerkstoffe und die Schweißdrähte für den Stahlbau müssen deshalb unter dem Gesichtspunkt der Vermeidung der Rißgefahr ausgewählt werden. Drähte, die ein zu Rissen neigendes Schweißgut ergeben, sind durch zweckentsprechende Prüfungen von vornherein auszuscheiden, ebenso Drähte, die unter übermäßig großer Wärmeentwicklung abschmelzen.

Das Schweißgut schrumpft bei völlig unbehinderter Bewegungsmöglichkeit nach allen Richtungen gleichmäßig. Praktisch ist diese freie Bewegungsmöglichkeit nur in der Querrichtung vorhanden und auch hier nur bei Stumpfnähten, die in sehr kurzer Zeit fertiggestellt werden. Die Größe der Querschrumpfung ist abhängig von der Größe des Nahtquerschnittes und des spezifischen Wärmeverbrauchs des Drahtes, die deshalb möglichst beschränkt bleiben sollen. Neben der Querschrumpfung tritt bei dickeren Nähten eine Winkelschrumpfung ein, deren Größe besonders von der Querschnittsform und Größe der Naht und von der Zahl der Schweißlagen abhängig ist. Bei Kehlnähten ist die Querschrumpfung geringer als bei Stumpfnähten. Die Längsschrumpfung ist immer viel geringer als die Querschrumpfung, da sowohl die Ausdehnungen der erhitzten Zonen wie die Schrumpfungen in dieser Richtung von den benachbarten kälteren Zonen gehemmt werden. Diese Behinderung verursacht große Längsspannungen, deren Größe und Verlauf beiderseits der Naht von der Breite der Erhitzungszone abhängt. Die Längsspannungen haben aus Gleichgewichtsgründen immer Querspannungen zur Folge; ein Schweißen ohne Querspannungen ist deshalb in keinem Fall möglich. Quer zur Naht treten an den Nahtenden große Druckspannungen und in der Mitte Zugspannungen auf. Dieser Querspannungszustand tritt annähernd auch noch bei Nähten mittlerer Länge und größerer Dicke auf.

Die Längsschrumpfspannungen haben besondere Bedeutung für die in der Hauptkraftrichtung lang durchlaufenden Nähte. Da die Nahtlängsspannungen sehr groß sind, empfiehlt es sich, bei zusätzlich auf Zug beanspruchten Nähten zu schmale Erhitzungszonen, die besonders hohe Nahtspannungen verursachen, zu vermeiden. Bei Baugliedern, die der Knickgefahr unterliegen, soll dagegen vor allem Wert darauf gelegt werden, die den Nahtlängsspannungen das Gleichgewicht haltenden Reaktionsdruckspannungen klein zu halten, was durch Beschränkung der Nahtquerschnitte und Schweißausführung mit möglichst geringer Wärmezufuhr möglich ist.

Bei der Nahtherstellung treten praktisch fast immer mehr oder weniger große Querverspannungen auf. Zu unterscheiden sind hierbei äußere Verspannungen

und innere Verspannungen. Die äußeren Verspannungen sind konstruktiv bedingt. Die zu verschweißenden Teile sind hierbei bereits vor Beginn der Schweißung der Naht festgelegt. Die inneren Verspannungen in einer Naht entstehen durch die nicht gleichzeitig, sondern nacheinander erfolgende Einschmelzung, Erwärmung und Abkühlung der einzelnen Nahtteile. Starke Verspannungen treten bei Kehlnahtverbindungen auf und beim Einschweißen oder Aufschweißen von Platten in größere Teile.

Eine der wichtigsten Bedingungen zur Herabsetzung der Verspannungen äußerer und innerer Art ist die Geringhaltung der Nahtquerschnitte und die Vermeidung von Drähten, die unnötig großen spezifischen Wärmeaufwand erfordern. Die Verspannungen äußerer Art werden am sichersten durch elastische Formung der an die Schweißfugen angrenzenden Teile und durch zweckentsprechende Reihenfolge der einzelnen Nähte ermäßigt. Die Behinderung des Schrumpfens z. B. durch Reibungswiderstand massiger Teile kann durch Maßnahmen, die den Schrumpfvorgang unterstützen, beseitigt werden. Innere Verspannungen einer Naht über Nahtlänge und Nahthöhe sind vor allem durch größere Schweißgeschwindigkeit, Schweißfolge und Vermeidung zu vieler Lagen zu bekämpfen. Die Schrittschweißung ist vorteilhaft bei langen Nähten vor allem bei Herstellung der der Rißgefahr besonders ausgesetzten Wurzellage. Die Verspannungen über die Nahthöhe können durch symmetrische Fugenform, wechselseitiges Schweißen der Lagen beider Seiten und Beschränkung der Lagenzahl ermäßigt werden.

Die Schweißspannungsverhältnisse in Kehlnähten sind wesentlich ungünstiger als in Stumpfnähten, da die Nahtzonen einem räumlichen Spannungszustand allseitigen hohen Zuges unterliegen. Zeitlich nacheinanderfolgendes Schweißen der beiden Nähte bei ⊥ förmigen Verbindungen, nicht zu geringe Dehnlänge zwischen parallel verlaufenden Kehlnähten setzen die Verspannung herab. Im allgemeinen unterliegen die Kehlnähte besonders der Rißgefahr.

Risse treten in der Regel auf im heißen Zustand und bei der Abkühlung im Temperaturbereich verringerter Formänderungsfähigkeit (Blaubruchgebiet). Die Beurteilung der Rißgefahr und Maßnahmen zu ihrer Verhütung müssen deshalb besonders auf den Vorgängen und Eigenschaften des Schweißgutes bei höheren Temperaturen beruhen. Die für den einachsigen Zustand vorhandene Dehnungsfähigkeit ist kein Maßstab zur Bewertung der Rißgefahr. Die Vornahme von zweckentsprechenden Proben zur Feststellung der Rißsicherheit ist deshalb unerläßlich. Die Querschnittsform der Naht ist für die Rißsicherheit nicht ohne Bedeutung. Ausgesprochene Hohlnähte reißen leicht gegenüber der Naht mit annäherndem Dreiecksquerschnitt, da bei Hohlnähten ungünstigere Eigenspannungsverhältnisse auftreten. Raupenformen mit starken Kerben neigen zu Rissen. Im Verhältnis zur Werkstückdicke zu dünne Raupen, vor allem bei den Wurzellagen, führen leicht zu Rissen. Die Raupendicke muß deshalb in einem angemessenen Verhältnis zur Werkstückdicke stehen. Bei der Herstellung dicker Stumpfnähte sollen die Schweißarbeiten nicht unterbrochen werden, bis ein größerer Teil der Nahthöhe ausgefüllt ist. Im Trägerbau können bei den Halsnähten die Schweißarbeiten durch Anwendung von Sonderprofilen erleichtert werden.

Besondere Wärmemaßnahmen vor, während und nach der Schweißung haben den Zweck, abschreckähnliche Abkühlung zu vermeiden, die Rißgefahr während der Schweißung herabzusetzen, gleichmäßigere Spannungsverhältnisse über Nahtlänge und Dicke herbeizuführen und die Längsspannungen in den Nahtzonen zu ermäßigen.

Das Kalthämmern der Naht erfordert ein Schweißgut, das keine Haarrisse bekommt und durch das Hämmern nicht spröde wird, es dient zur Ermäßigung der zurückbleibenden Spannungen.

IIIb 4

Ausbildung und Herstellung geschweißter Bauten.

Projet et exécution des ouvrages soudés.

Design and Execution of Welded Structures.

Dr. Ing. St. Bryła,
Professor an der Technischen Hochschule, Warschau.

In jeder geschweißten Verbindung entstehen in der Naht wie auch im Konstruktionsstoff Nebenspannungen und Schrumpfungen. Die Innenspannungen in der Naht werden durch den Temperaturunterschied zwischen der Naht und der Nachbarzone hervorgerufen. Sie sind unabhängig von der Festklemmung der zu schweißenden Elemente und entstehen immer in der Naht, also auch, wenn die zu schweißenden Teile nicht durch Spannbacken festgeklammert sind. Ihre Ursache liegt in der Erwärmung und nachträglichen Schrumpfung der erwärmten Zone, wobei der nicht erwärmte oder wenig erwärmte Stoff, welcher die Naht umringt, eine freie Schrumpfung desselben während der Abkühlung verhindert. Im Grundstoff der zu verbindenden Elemente entstehen dagegen Konstruktionsspannungen, welche die Folge der Einspannung dieser Elemente mittels Spannbacken, die das Verschieben derselben während der Erwärmung verhindern, sind. Je größer die erwärmte Zone, desto kleiner die Spannung in der Naht und desto größer die Konstruktionsspannungen. Es entstehen deshalb größere Konstruktionsspannungen bei der Azetylenschweißung und größere Schrumpfspannungen in der Naht bei der Lichtbogenschweißung. Diese Spannungen sind sehr hoch und erreichen oft beinahe die Plastizitätsgrenze. Infolge der Hemmung der Deformation durch unregelmäßige Nahtschrumpfung erhöht sich die Plastizitätsgrenze oft beträchtlich.

Die Stärke der zu schweißenden Elemente hat auf die Größe der Innenspannungen einen großen Einfluß. Die Spannungen vergrößern sich nicht im gleichen Verhältnis zur Stärke dieser Elemente; sie wachsen jedoch beträchtlich. Die Schrumpfspannungen wachsen auch mit der Länge der Nähte. Je länger die Nähte, desto kleiner ist auch im allgemeinen die Gleichmäßigkeit der Spannungsverteilung in denselben und folglich auch deren Festigkeit. Die vom Verfasser und von Dr. Ing. Poniž in Lwów durchgeführten Versuche haben bewiesen, daß die Spannungen an den Enden der Nähte viel größer — oft doppelt so groß — als die Spannungen in deren Mitte sind.[1] Bei einer gewissen Länge der Naht erreicht man eine Grenze, oberhalb welcher die Festigkeit der Naht praktisch konstant bleibt. Die Schrumpfspannungen wirken hier nur einiger-

[1] Aehnlich verteilen sich die Spannungen auch in den genieteten Verbindungen.

maßen, indem sie erst mit den Elastizitätsbedingungen der Verbindung die totale Spannung ergeben. Den wichtigen, in manchen Fällen sogar überwiegenden Einfluß derselben beweist u. a. die Tatsache, daß ähnliche Erscheinungen bei unterbrochenen Nähten entstehen, wo die Randnähte viel größere Spannungen als die Mittelnähte aufweisen. Allenfalls ist die Verteilung der Spannungen in unterbrochenen Nähten etwas gleichmäßiger.

Diese hohen Spannungen in den Nähten sind aber nicht gefährlich. Vor allem, weil die Außenkräfte im allgemeinen nur in einer Richtung wirken und die Schrumpfspannungen in drei, und des weiteren infolge der Plastizitätseigenschaften des Stahles. Als Beweis dienen die Erfolge sämtlicher Versuche, die bis zum Bruch geführt wurden, als auch die bewiesene Güte der gut ausgeführten Nähte. Wenn auch — übrigens äußerst selten — geplatzte Nähte vorkommen, so liegt die Ursache dafür nicht in den Schrumpfspannungen, sondern in der Spröde der Nähte, die aus ungeeignetem Stoff ausgeführt worden sind oder in der mangelhaften Ausführung derselben.

Wie unsere Versuche beweisen, verhält sich jene Naht am besten, die dem Grundmaterial möglichst ähnliche Eigenschaften usw., in erster Linie eine ähnliche Plastizitätsgrenze, besitzt. Es ist also nicht immer ratsam, Elektroden aus einem Stoff, welcher eine viel größere Festigkeit als das zu schweißende Material hat, zu benutzen. Es handelt sich eher um Erzeugung von Nähten von denselben Elastizitätseigenschaften. Es ist dagegen empfehlenswert, umwickelte Drähte zu benutzen, mit denen man viel bessere Erfolge erzielt als mit den nackten.

Es gibt verschiedene Methoden der Nahtverbesserung zwecks Verminderung der inneren Spannungen. Alle unsere Versuche mit diesen Mitteln sind jedoch insofern eher negativ, als sich der Arbeitsaufwand bei Anwendung derselben nicht lohnt. Die Verminderung der Schrumpfspannungen ist nämlich bei Anwendung dieser Methoden verhältnismäßig gering und daher zwecklos. In Anbetracht der mehrmals bewiesenen Unschädlichkeit der Schrumpfspannungen gibt es keinen Grund die nachträgliche Verminderung derselben besonders zu bezwecken. Diese Methoden haben eher eine andere Bedeutung, z. B. fördert das Ausglühen das Entstehen einer feinkörnigen Struktur und erhöht dadurch die Widerstandsfähigkeit des Stoffes. Die zweiseitige Schweißung wirkt ebenfalls einigermaßen ausglühend und trägt zur Beseitigung von Schweißfehlern bei. Ähnlich wirkt bei Lichtbogenschweißung das mehrschichtige Schweißen, bei welchem die schon ausgeführten Schichten durch die nächsten ausgeglüht werden.

Konstruktionsspannungen (Montagespannungen) sind diejenigen Innenspannungen, welche im Grundmaterial während des Schweißens infolge der Festklemmung der zu schweißenden Teile mittels Spannbacken entstehen.

Indem wir durch deren Anwendung die Deformation der Konstruktion auf ein Minimum vermindern, oder sie praktisch sogar gänzlich beseitigen, verursachen sie in den zu schweißenden Teilen innere Spannungen, die proportional zu den gehemmten Deformationen und Verschiebungen sind. Die Größe dieser Bewegungen ist von der Größe der zu schweißenden und erwärmten Teile abhängig. Diesen Faktoren entsprechend wachsen deshalb auch die Konstruktionsspannungen.

Die Konstruktionsspannungen haben keinen räumlichen Charakter und bilden

flache und sogar lineare Systeme. Sie verursachen auch keine Vergrößerung der Plastizitätsgrenze des Stoffes und ihre Werte sind viel geringer als die Schrumpfspannungen in der Naht.

Obwohl die Schrumpfspannungen an sich bei geeignetem Stoffe und einwandfreier Ausführung der Nähte gar keine Gefahr bilden, trachten wir doch bei allen Stahlkonstruktionen die Nebenspannungen womöglich zu beseitigen: Dieselbe Bestrebung besteht auch bei geschweißten Konstruktionen und deren Schrumpfspannungen. Es ist ratsam, die Elemente derart zusammenzuschweißen, daß sie von vornherein möglichst keine Spannungen erhalten. Man muß dabei die Eigenschaft mancher Einflüsse, die sich gegenseitig einigermaßen aufheben, in Betracht ziehen. Dies erfolgt z. B. in dickeren Nähten (vergleiche oben), wo sogar die Bestimmung der verhältnismäßigen Größe der Einflüsse nicht ganz klar ist. Die dünnen Nähte müssen außerdem länger sein, was in Bezug auf Schrumpfspannungen als ein negativer Faktor angesehen werden kann. Es ist kein Wunder, daß die Meinungen betreffs Anwendung stärkerer oder dünnerer Nähte verschieden sind. Der Verfasser ist auf Grund zahlreicher Versuche eher der Ansicht, daß dünne Nähte besser und fester sind; sie sind außerdem noch billiger. Der negative Einfluß ihrer unvermeidlich größeren Länge kann auf die Weise beseitigt werden, daß man sie in kurzen Abschnitten ausführt und nachträglich die vorläufig gelassenen Lücken ausfüllt. Eine zweite, immer ihre Geltung behaltende Hinweisung besteht in der Notwendigkeit der Verwendung von Elektroden aus einem Stoff, der möglichst ähnlich dem Grundmaterial ist und zwar hauptsächlich in Bezug auf Elastizität. Die Vergrößerung der Festigkeit, obwohl sie auch sehr wertvoll ist, hat eine verhältnismäßig kleinere Bedeutung. Es wird empfohlen ummantelte Elektroden zu verwenden. Drittens soll die Form der Nähte womöglich mild ohne Ecken verlaufen.

Andere, die Schrumpfspannungen einschränkende Einflüsse dürfen als von nebensächlicher Bedeutung angesehen werden.

Die durch die Konstruktionsspannungen hervorgerufenen Formänderungen sind in ihrer Auswirkung wichtiger als die Konstruktionsspannungen selbst. Ich bin gar nicht der Meinung, daß sämtliche Formänderungen um jeden Preis vermieden werden sollen. Die Spannbacken jedoch sind fast immer notwendig, da der Charakter der zu schweißenden, aus einzelnen Teilen bestehenden Elemente, sie benötigt. Blechträger, Gitterbalkengurte und dergleichen geschweißte Elemente besitzen nämlich keine Winkelstähle, die wie in den genieteten Konstruktionen als Verbindungsstücke dienen müssen und auch gleichzeitig die Bleche gegeneinander in ihrer Lage bestimmen. Dies ist oft einer der Faktoren, die in den geschweißten Konstruktionen eine Ersparnis an Stoff verursachen, anderseits wird aber dadurch die Zusammensetzung schwieriger, und es entsteht eine Notwendigkeit der Anwendung von Spannbacken. Es kommt noch eine Neigung zu Formveränderungen als Folge der Montagespannungen hinzu, sodaß sogar nach der einstweiligen Festlegung der Querschnitte zueinander die Spannbacken noch immer zwecks Vermeidung dieser Deformationen notwendig sind.

Dadurch ist die Form und Konstruktion der Spannbacken bedingt. Die Spannbacken müssen zur Form des zusammengesetzten Elementes passen und es dicht und auf die Weise umspannen, um die Einführung der Bestandteile zu ermöglichen. Aus diesem Grunde werden die Spannbacken meistens mit zuziehenden

Teilen versehen — meistens Rundeisen mit angeschnittenen Gewinden und Muttern —. Als Beispiel solcher Spannbacken können die schon im Jahre 1928 beim Bau der Brücke auf der Sludwia bei Lowicz bei den Querbalken und Gurten angewendeten Spannbacken dienen (Fig. 1), die sich als so vorteilhaft erwiesen haben, daß man noch im Jahre 1934 gleiche Spannbacken beim Bau der Brücke auf der Straße Wiesbaden—Frankfurt a. M. (1935 N.) angewendet hat. Als ein zweites Beispiel können die beim Bau der Postsparkasse in Warschau angewendeten Spannbacken dienen (Fig. 2). Als anderes Beispiel diene Fig. 3.

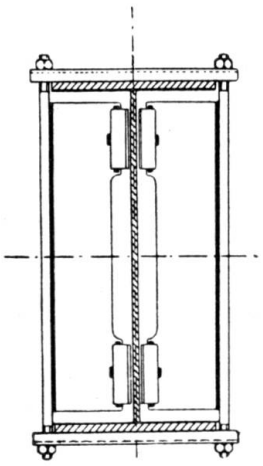


Fig. 1.

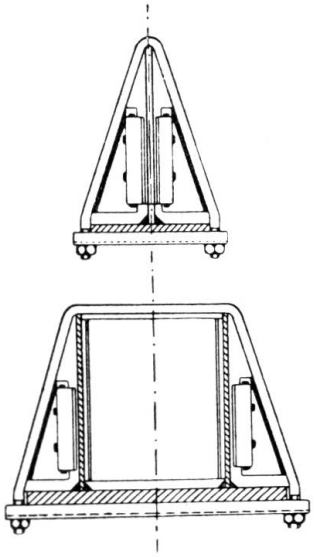


Fig. 2/3.

Schließlich stellen die Fig. 4 und 5 vollkommenere, aber auch kompliziertere Spannbacken dar, die beim Bau der Jagellonischen Bibliothek in Krakau zur

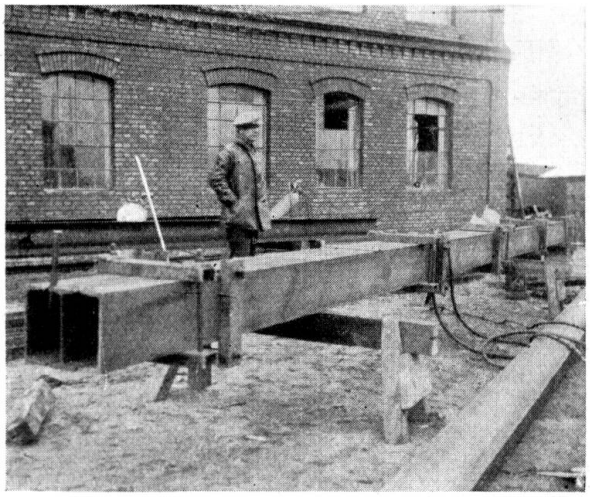


Fig. 4.

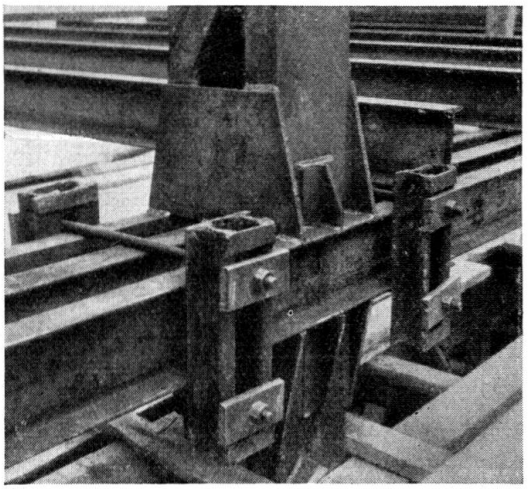


Fig. 5.

Anwendung gelangten, wo es sich besonders um ganz glatte Formen und um gänzliche Beseitigung jeglicher Formänderungen handelte.

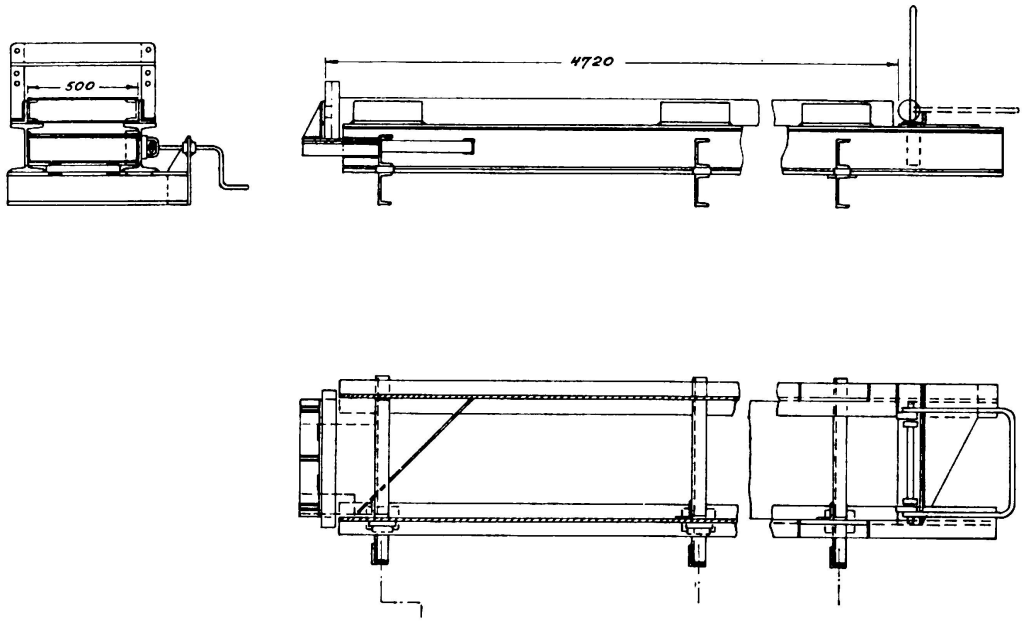


Fig. 6.
Formen zur Ausführung von Säulen der Jagellonischen Bibliothek in Krakau.

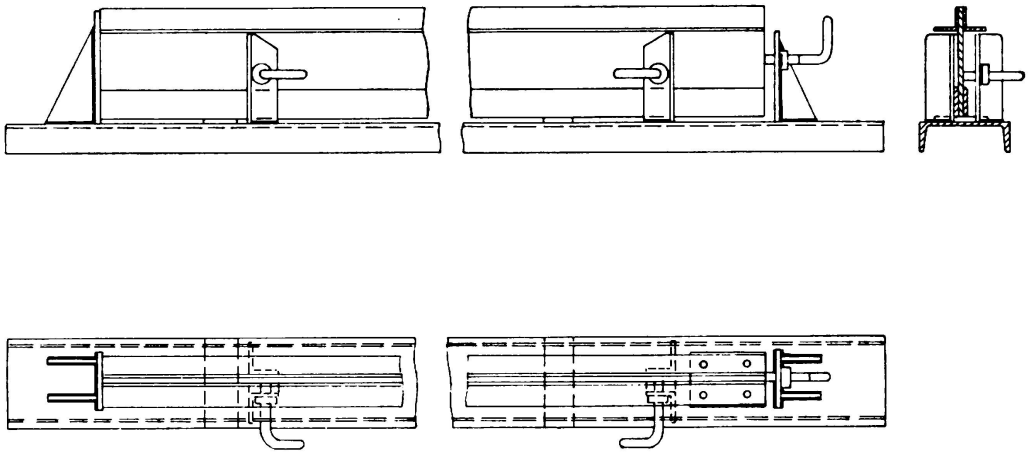


Fig. 7.
Spannbacken für Unterzüge und Balken der Jagellonischen Bibliothek in Krakau.

Zusammenfassung.

Nachdem der Verfasser über Neben- und Schrumpfspannungen gesprochen hat, beschreibt er die Mittel, um diese Spannungen zu vermindern. In dieser Hinsicht spielen die Spannbacken eine große Rolle, weshalb der Autor verschiedene in Polen verwendete Typen von solchen Spannbacken beschreibt.

Leere Seite
Blank page
Page vide

IIIb 5

Schrumpfungen in geschweißten Fachwerken.

Retraits dans les poutres réticulées soudées.

Shrinkage of Welded Trussed Structures.

Dr. sc. techn. S. Mortada,
Brückenbau-Ingenieur der Ägyptischen Staatsbahnen, Kairo.

Die Schrumpfung ist die Änderung im Werkstück, die durch innere Widerstände der Metallteile gegen das Zusammenziehen der erwärmten Zonen bei der Abkühlung hervorgerufen wird. Es entstehen dadurch Längenänderungen in der Ebene, sowie Verbiegungen und Verdrehungen. Die Schrumpferscheinungen und die dadurch entstehenden inneren Spannungen bedingen in den geschweißten Fachwerken besondere Beachtung, da die Tragfähigkeit solcher Tragwerke, besonders für dynamische Belastungen, durch die Schweißspannungen in sehr hohem Maß gefährdet werden kann. Es wurden von uns in letzter Zeit an einem Versuchsträger aus Normalstahl Schrumpfmessungen durchgeführt; der Träger wurde nachher in der E.M.P.A. an der E.T.H. Zürich eingehend statisch und dynamisch geprüft.

Zweck dieser Messungen war die Feststellung der Art und der Größe der Schrumpfungen, wie sie in fertigen geschweißten Bauwerken vorkommen.

Der Versuchsträger war 6 m lang und 1,5 m hoch, er war für eine Belastung von 50 Tonnen in Trägermitte dimensioniert.

Der Untergurt bestand aus 2 ⌊ 80 × 12, der Obergurt aus 2 ⌊ 100 × 12 mit einem Gurtblech von 100 × 12. Alle Diagonalen waren aus 2 T Nr. 14 gebaut. Die Verbindungen der einen Hälfte des Trägers wurden mit 12 mm wurzelseitig geschweißten V-Nähten, diejenigen der anderen Trägerhälfte dagegen durch Stirn- und Kehlnähte in verschiedener Stärke und Länge ausgeführt.

Die Anschlüsse einer Diagonale bestanden aus 8 mm starken und 27 cm langen Kehlnähten, die andere Diagonale dagegen war mittels 11 mm starken und 19 cm langen Nähten angeschlossen.

Der Obergurt hatte zwei 12 mm V-Nähte, die sich auf eine Gurtlänge von 3,60 m erstreckten. Die Anschlüsse der Diagonalen und Knotenbleche am Obergurt sowie am mittleren Punkt des Untergurts waren durch zwei 60 cm lange und 12 mm starke V-Nähte gewährleistet. Die erwähnten Nahtstärken waren durch die erforderliche Kräfteübertragung bedingt. Sie sind im Vergleich zu den kleinen Abmessungen des Versuchsträgers als verhältnismäßig groß zu bezeichnen. Es waren daher von vornherein große Schrumpfungen zu erwarten, aus welchem Grunde auch ihre Entstehung möglichst bekämpft wurde; sie gänzlich zu vermeiden, war jedoch nicht möglich.

Es wurden umhüllte Elektroden verwendet, da sie vom metallurgischen Standpunkt aus vorzuziehen sind, obwohl sie die Schrumpfmasse etwas erhöhen. Die Stromstärke wurde hoch gehalten, um die Schmelzgeschwindigkeit zu erhöhen. Zur Schweißung wurden Elektroden Ø 4 mm Arcos Stabilend verwendet, die am positiven Pol angeschlossen wurden. Der verwendete Gleichstrom erreichte während der Schweißung eine Stärke von 200 Amp. bei zirka 27 Volt-Spannung.

Ausführung der Schweißung.

Die Schweißung des Trägers erfolgte in der Weise, daß für die zu schweißenden Teile immer die Möglichkeit der freien Ausdehnung ohne äußere Hemmung bestand. Bei den Enddiagonalen war dies nicht mehr möglich, da der Träger endlich total zusammengeschweißt werden mußte. Zuerst wurde jeder aus mehreren Stücken bestehende Trägerteil für sich fertig geschweißt, indem mit der in der Mitte liegenden Schweißnaht begonnen wurde, um die freie Ausdehnung der Stückteile gegen die Enden hin zu ermöglichen. Die Schweißung erfolgte von der Mitte aus symmetrisch. Die gleiche Anordnung wurde bei der Schweißung des ganzen Trägers innegehalten.

Wir haben somit versucht, die Reaktionsspannungen infolge der Verhinderung der Ausdehnung der erwärmten Teile zu vermindern.

Trotz dieser Maßnahmen hat sich die Schrumpfung stark bemerkbar gemacht. Besonders hervorzuheben ist der Einfluß der langgestreckten Nähte im Obergurt, wo starke Verdrehungen an den Obergurtwinkeln und Verkleinerung des Lichtabstandes zwischen deren inneren Seiten von 100 auf 96 mm festgestellt wurden. Es ist zu erwähnen, daß zur Festhaltung des Abstandes von 100 mm zwischen den Gurtwinkeln während der Schweißung Walzprofilabfälle von 100 mm Höhe als Distanzierung verwendet wurden. Die Wirkung der Zusammenziehung nach der Erkaltung des fertig geschweißten Obergurts war so groß, daß das Heraustreiben dieser Distanzierungsprofile große Schwierigkeiten machte. Die Stege zweier dieser Profile waren ausgebeult, bei einem Profil mußte der Steg durchgebrannt werden, um Zwangsmittel zu vermeiden.

Messung der Schrumpfung und Meßergebnisse.

Die Ermittlung der Schrumpfung beruht auf der genauen Messung des Abstandes zwischen zwei Punkten in einem Trägerteil vor und nach der Schweißung. Die festgestellten Änderungen entstehen hauptsächlich durch die Schrumpfungen; ein kleiner Teil derselben kann vielleicht Folge der Montage sein, jedoch können diese Werte infolge der großen Sorgfalt, die wir auf die Zusammenstellung der Trägerteile verwendet haben, nur klein sein.

Zur Längenmessung wurde eine Meßuhr der Bauart *Huggenberger,* ein sogenannter Deformeter, verwendet. Dieser Apparat erlaubt die Messung von Längenänderungen bis auf 0,00261 mm. Die Meßlänge beträgt 10 cm, was die Messung von Querschrumpfungen schwierig machte, so daß hauptsächlich Schrumpfungen parallel der Nahtrichtung und der Knotenblechränder gemessen wurden.

Bei jedem Profilanschluß wurden Messungen an beiden Rändern und in der Mitte durchgeführt. Die Randstrecken wurden so nahe als möglich neben den

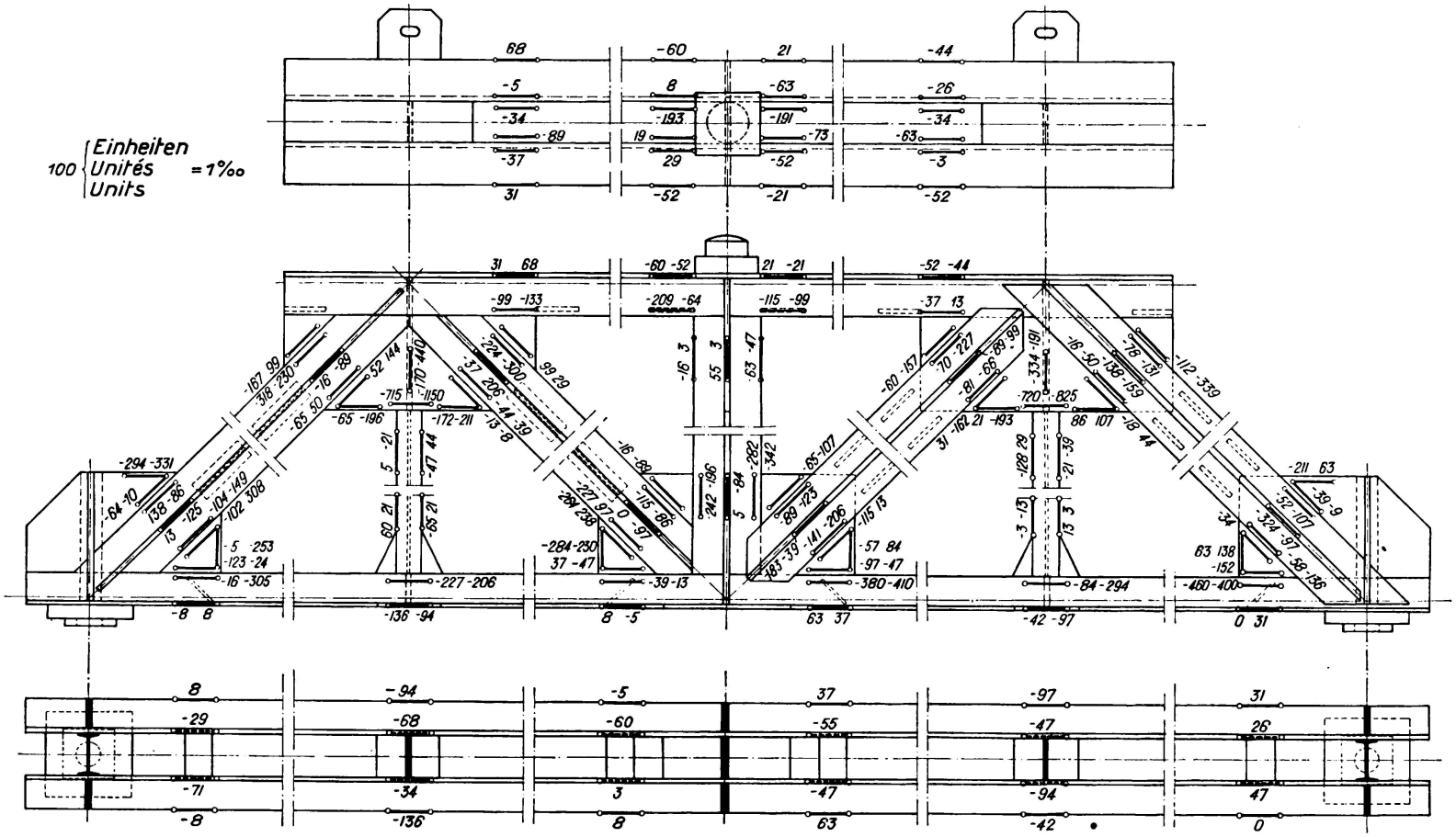


Fig. 1.

Gemessene Schrumpfungen.

Nähten gewählt. Weitere Messungen wurden an den Knotenblechen längs der Nähte vorgenommen. Im ganzen waren 212 Meßstrecken vorhanden. Jede Strecke wurde viermal gemessen, indem nach jeder Messung die Spitzen des Meßapparates gewechselt wurden. Der Unterschied zwischen den vier Ablesungen durfte nicht mehr als zwei Teilstriche der Meßuhr = 0,00522 mm betragen. Die jeweiligen Temperaturunterschiede während der Messungen wurden berücksichtigt.

Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Fig. 1 angegeben, die + Zeichen bedeuten Verlängerungen, die — Zeichen Verkürzungen. Die für jede Meßstrecke angegebenen zwei Werte entsprechen der Vorder- respektive Rückseite des Trägers. Die Zahlenwerte sind stark gestreut, von Gesetzmäßigkeit kann hier nicht gesprochen werden.

Dicht neben den Nähten traten starke Schrumpfungen auf, die Verdrehungen in den Profilen erzeugten, so daß starke Längenänderungen in den äußeren Profilkanten festgestellt wurden.

Die auftretenden Spannungen sind nicht den Schrumpfungen proportional, da die letzteren zum großen Teil bei hohen Temperaturen des Materials zustandegekommen sind und zwar praktisch ohne Spannungen zu erzeugen. Die großen Schrumpfungen erregen aber große innere Spannungen, die das Material an einigen Stellen bereits schon zum Fließen brachten. Risse wurden keine festgestellt.

Die Dauerversuche unter einer zwischen 0 und der Nutzlast wechselnden Belastung, d. h. ohne Überbelastung, hatten den Bruch des Trägers bereits nach 1,4 Millionen Lastwechsel zur Folge.

Aus diesen Untersuchungen ergeben sich folgende Schlußfolgerungen:

1. Die Schrumpfungen treten unregelmäßig auf, es ist keine Gesetzmäßigkeit in ihrer Entstehung festzustellen.
2. Die Schrumpfungen sind bei dem untersuchten Fachwerk infolge seiner verhältnismäßig kleinen Abmessungen und der großen Nahtstärken beträchtlich. Dadurch treten starke Verdrehungen in den Profilen und Verbiegungen in den Knotenblechen auf.
3. Die inneren Spannungen infolge des Schweißvorganges können so groß sein, daß sie das Material zum Fließen bringen können.
4. Der Widerstand der geschweißten Fachwerke gegen Wechselbelastungen ist durch die Schweißspannungen beträchtlich herabgesetzt. Die Ursprungsfestigkeit des Materials wurde bereits unter der Wirkung der Nutzlast überschritten.

Bei der Verwendung geschweißter Fachwerke ist in allen Fällen, wo starke, andauernde Wechselbeanspruchungen zu erwarten sind, allergrößte Vorsicht geboten.

Zusammenfassung.

In diesem Beitrag beschreibt der Verfasser eigene Versuche über die Größe der Schrumpfung. Neben der Schweißausführung wird die Messung erläutert. Er empfiehlt größte Vorsicht gegenüber Wechselbeanspruchungen bei geschweißten Fachwerken.