IIIc. Prüfung der Schweissnähte

Objekttyp: **Group**

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

Band (Jahr): **2 (1936)**

PDF erstellt am: **18.05.2024**

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

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

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

III c

Prüfung der Schweißnähte.

Contrôle des soudures.

Inspection and control of welded joints.

Leere Seite
Blank page
Page vide

III c 1

Berechnung der Schweißnähte unter Berücksichtigung konstanter Gestaltsänderungsenergie.

Calcul des soudures basé sur de la conservation de l'énergie de déformation.

Calculation of Welds under Consideration of Constant Deformation Energy.

Dr. N. C. Kist,
Professor an der Technischen Hochschule in Delft, Haag.

Aus Versuchen von Professor *Jensen* wird abgeleitet, daß die Theorie konstanter Gestaltsänderungsenergie die Verhältnisse zwischen den Bruchspannungen von elektrisch geschweißten Kehlnähten bei verschiedener Richtung der Belastung richtig angibt. Zur Berechnung von statisch unbestimmten Verbindungen wird von der Plastizität ausgegangen. Auf Grund von Theorie und Versuchen kommt der Verfasser zu den Schlußfolgerungen, die am Ende des Referates erwähnt sind.

In den deutschen Vorschriften für geschweißte Stahlbauten, DIN 4100, ebenso in dem amerikanischen „Code for Fusion Welding and Gascutting in Building Construction" und in anderen Vorschriften wird für die zulässige Spannung in einer Kehlschweißnaht ein gewisser Betrag angegeben, der für alle Richtungen, in denen die Belastung wirken kann, derselbe ist. Die Festigkeit ist aber viel größer, wenn die Kraft senkrecht zur Naht (Linie C D, Fig. 1) wirkt, als wenn sie in die Ebene der Naht fällt. Professor *Cyril D. Jensen* (U.S.A.) hat im „Journal of the American Welding Society" vom Februar 1934 die Ergebnisse einer sehr interessanten Versuchsreihe veröffentlicht, aus denen hervorgeht, wie groß die Festigkeit von elektrisch geschweißten Stirnnähten für verschiedene Werte des Winkels α zwischen Kraftrichtung A B und Kehle C D (siehe Fig. 1) ist. Die von Professor *Jensen* ermittelten Bruchspannungen $\sigma_{B\alpha}$ sind in Fig. 2 dargestellt und zwar in der Weise, daß die Länge eines Vectors die Größe der Bruchspannung angibt, und der mit der Abszissenachse gebildete Winkel gleich α ist. Professor *Jensen* hat nicht untersucht, ob die Ergebnisse seiner Versuche mit der Theorie konstanter Gestaltsänderungsenergie vereinbar sind.

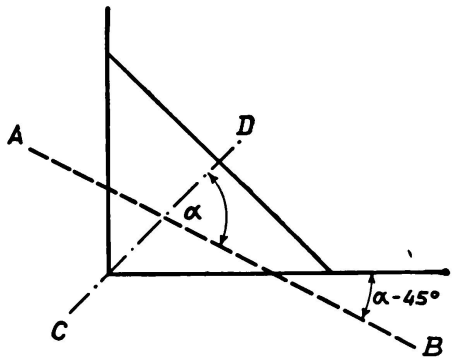


Fig. 1.

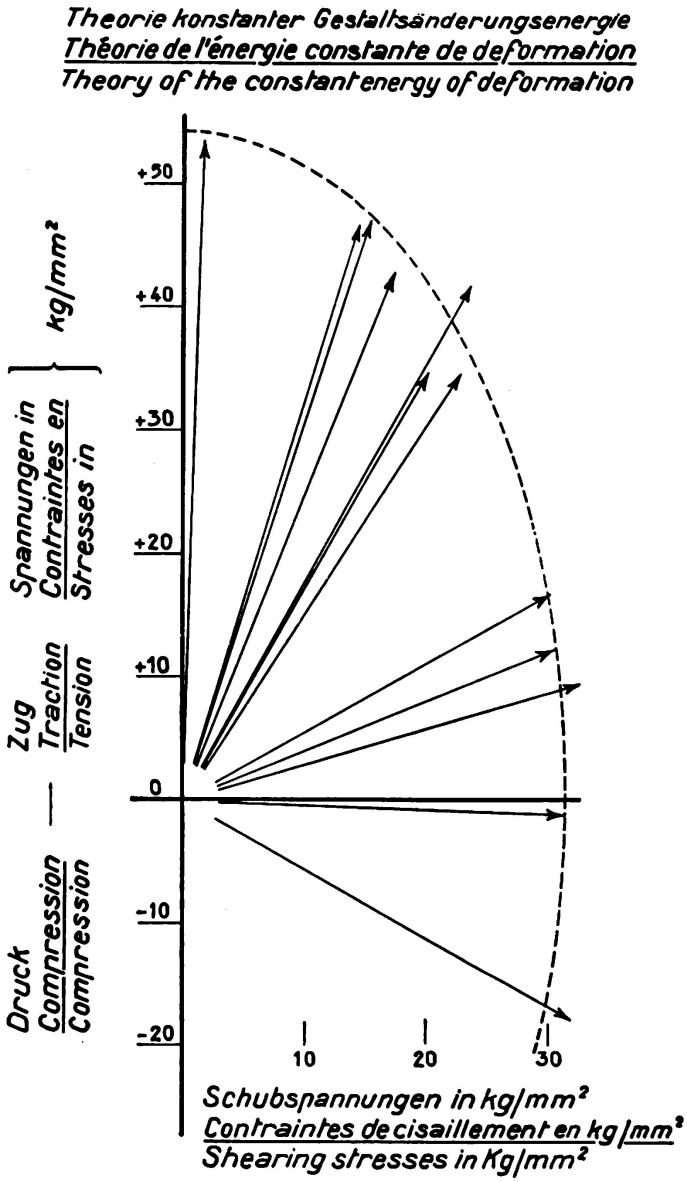


Fig. 2.

Führt man dies durch, so findet man eine auffallend gute Übereinstimmung. Die Strichlinie zeigt die Punkte, auf welche die Endpunkte der Vectoren nach dieser Theorie fallen sollten. Es sei:

$\sigma_{B\alpha}$ die Bruchspannung, wenn die Kraftrichtung mit der Naht den Winkel α bildet;

σ die Komponente normal zur Bruchfläche von $\sigma_{B\alpha}$;

τ die Komponente von $\sigma_{B\alpha}$ in der Bruchfläche;

$\sigma_{B\,Zug}$ die Bruchspannung bei normaler Belastung.

Nach der Theorie konstanter Gestaltsänderungsenergie tritt der Bruch ein, wenn

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sigma_{B\,Zug}$$

und ist

$$\sigma_{B\alpha} = \sigma_{B\,Zug} \frac{1}{\sqrt{\sin^2\alpha + 3\cos^2\alpha}}.$$

Aus den Versuchen von Professor *Jensen* ist der mittlere Wert von $\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$, wobei Bruch eintrat, abgeleitet, und aus diesem mittleren Wert die Werte $\sigma_{B\alpha}$, deren Endpunkte von der Strichlinie in Fig. 2 angezeigt werden.

Die Übereinstimmung der Versuchsergebnisse von Professor *Jensen* mit der Theorie konstanter Gestaltsänderungsenergie ist um so auffallender, als Professor *Jensen* mit den Ergebnissen seiner Messungen *andere* Bruchtheorien geprüft hat und zum Schluß gekommen ist, daß entweder die Bruchspannungen $\sigma_{B\alpha}$ nicht mit einer der ihm bekannten Bruchtheorien übereinstimmten, oder daß seine Versuche nicht genau waren. Wir stellen jedoch fest, daß die Bruchspannungen $\sigma_{B\alpha}$ mit der Theorie konstanter Gestaltsänderungsenergie sehr gut übereinstimmen und daß seine Versuche sehr genau waren.

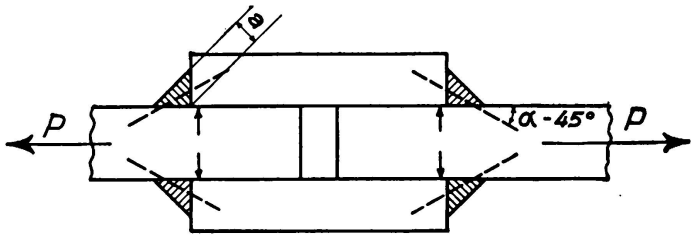
Die Versuche von Professor *Jensen* beziehen sich nur auf Stirnkehlnähte, die (Linie CD, Fig. 1) auf Zug und Schub, oder auf Schub und einen kleineren Druck beansprucht sind. Sie beziehen sich nicht auf Nähte, die hauptsächlich Druck unterliegen.

Weiter ist zu bemerken, daß die Prüfkörper so eingerichtet waren, *daß genau statisch festlag, in welcher Richtung die Kraft wirkte.* Dies war nötig, um die

genauen Werte von α zu kennen. Gewöhnlich liegt aber die Kraftrichtung statisch nicht fest. Die Berechnung von $\sigma_{B\alpha}$ soll deshalb ergänzt werden durch eine Berechnung von α bei statisch nicht bestimmter Kraftrichtung.

Wir schlagen vor, *auf Grund der Plastizitätslehre die Richtung der Kraft in den Nähten (Winkel α) so zu wählen, daß die Berechnung die größte von der Konstruktion zu übertragende Kraft berücksichtigt, die mit dem Gleichgewicht der Kräfte zu vereinbaren ist.*

Durch ein Beispiel möge dies erläutert werden. In Fig. 3 ist ein Probestück mit Stirnkehlnähten dargestellt, das von einer Zugkraft P belastet ist. Die



Fig, 3.

Wirkungslinien der von den Schweißnähten zu übertragenden Kräfte (die Strichlinien in Fig. 3) können, was das Gleichgewicht anbelangt, einen beliebigen Winkel mit der Horizontalen bilden. Dieser Winkel sei $\alpha - 45^0$. Der Winkel mit der Kehlnaht ist dann α (siehe Fig. 1). Wenn F die Oberfläche zweier Kehlnähte zusammen darstellt (CD Fig. 1), so ist die schräge Kraft in einer Schweißnaht, die zum Bruch führt:

$$\frac{1}{2} F \sigma_{B\alpha} = \frac{1}{2} F \frac{\sigma_{B\,Zug}}{\sqrt{\sin^2 \alpha + 3 \cos^2 \alpha}}.$$

Durch die schräge Richtung der Kräfte in den Schweißnähten werden die Seitenstücke stark gegen die Mittelstücke gepreßt. Zum Bruche des Probestückes muß die Reibung zwischen Mittel- und Seitenstücken überwunden werden. Die Bruchkraft P ist also die Summe der Horizontalkomponenten der schrägen Kräfte in zwei Nähten und des Reibungswiderstandes. Die Horizontalkomponenten der schrägen Bruchkräfte sind:

$$\frac{1}{2} F \cdot \frac{\sigma_{B\,Zug}}{\sqrt{\sin^2 \alpha + 3 \cos^2 \alpha}} \cos (\alpha - 45^0),$$

und die Vertikalkomponenten:

$$\frac{1}{2} F \cdot \frac{\sigma_{B\,Zug}}{\sqrt{\sin^2 \alpha + 3 \cos^2 \alpha}} \sin (\alpha - 45^0).$$

Wenn μ die Reibungszahl darstellt, ist also

$$P = 2 \cdot \frac{1}{2} F \frac{\sigma_{B\,Zug}}{\sqrt{\sin^2 \alpha + 3 \cos^2 \alpha}} \left[\cos (\alpha - 45^0) + \mu \sin (\alpha - 45^0)\right].$$

Da der Druck zwischen Seiten- und Mittelstücken auf die Enden letzterer konzentriert ist, ist die Druckspannung sehr hoch. Deshalb soll die Reibungszahl

höher gewählt werden als bei mäßiger Druckspannung. Wir schätzen diese Zahl so hoch wie bei Nietverbindungen, also etwa 0,2. Damit wird

$$P = F \frac{\sigma_{B\,Zug}}{\sqrt{\sin^2\alpha + 3\cos^2\alpha}} \left[\cos(\alpha - 45^0) + 0{,}2 \sin(\alpha - 45^0)\right].$$

Auf Grund der Plastizitätslehre soll nun der Wert von α so gewählt werden, daß P ein Maximum wird. Dies ist der Fall für $\alpha = 79^0$ und das Maximum beziffert sich auf

$$P = F \cdot \sigma_{B\,Zug} \cdot 0{,}91$$

(Konstruktionsform Fig. 3).

Wesentlich verschieden ist die Kraftwirkung, falls die Mittelplatten nicht zwischen die Seitenplatten durchgehen, wie es Fig. 4 zeigt. Da der Druck zwischen den Platten fortfällt, verlangt das Gleichgewicht der oberen Platte,

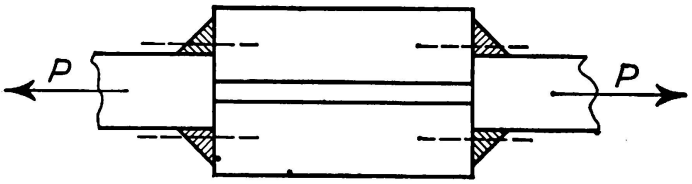


Fig. 4.

bzw. der unteren Platte, daß die von den oberen Schweißnähten, bzw. von den unteren Schweißnähten, zu übertragenden Kräfte einander entgegengesetzt sind. Aus der Symmetrie folgt nun weiter, daß diese Kräfte horizontal gerichtet sind, wie es die Strichlinien in Fig. 4 zeigen. Der Winkel α (Fig. 1) ist dann 45^0 und

$$P = F \frac{\sigma_{B\,Zug}}{\sqrt{\sin^2\alpha + 3\cos^2\alpha}} = 0{,}71\, F\, \sigma_{B\,Zug}.$$

(Konstruktionsform Fig. 4).

Auch wenn die Zugkräfte des Probestückes (Fig. 3) durch Druckkräfte ersetzt werden, fällt der Druck zwischen Seitenplatten und Mittelplatte fort. Auch dann ist also $\alpha = 45^0$ und $P = 0{,}71\, F\, \sigma_{B\,Zug}$.

Wir werden nun eine Berechnungsweise prüfen, welche sich auf die drei folgenden Voraussetzungen stützt:

1. Der Bruch in einer Laschnaht findet statt in dem kleinsten Querschnitt der Naht. Wenigstens darf man dies bei der Berechnung annehmen.

2. Gemäß der Theorie konstanter Gestaltsänderungsenergie ist die Bruchspannung $\sigma_{B\alpha}$, die infolge einer unter einem Winkel α angreifenden Kraft entsteht, gleich der normalen Zugspannung, die zum Bruche führt, multipliziert mit

$$\frac{1}{\sqrt{\sin^2\alpha + 3\cos^2\alpha}}$$

3. Gemäß der Plastizitätslehre darf man statisch nicht bestimmte Größen so wählen, daß die Berechnung die größtmögliche Belastung aufweist, welche die Konstruktion zum Bruch führt. Dies bezieht sich sowohl auf den Winkel, unter

welchen die Kraft in einer Naht wirkt, als auch auf die Verteilung der Kräfte über verschiedene Nähte.

Falls die Berechnung auf Grund von Voraussetzung 3 kompliziert ist, darf man bezüglich der statisch unbestimmten Werte eine praktische Annahme machen. Diese Annahme kann nur dazu führen, daß eine Belastung berechnet wird, die kleiner ist als die wirkliche Bruchbelastung. Hervorzuheben ist weiter, daß Voraussetzung 3 nicht zutrifft für wechselnde oder schwellende Belastung, die sehr oft, z. B. eine Million mal, wiederholt wird, weil das Material dabei nicht plastisch ist. Das angegebene Berechnungssystem wird nur vorgeschlagen für Hochbauten und andere Konstruktionen, deren Belastung sich nicht viel oder nicht oft ändert.

Allerdings muß die oben angegebene Theorie durch Versuche geprüft werden.

Im Einvernehmen mit der Niederländischen Kommission zur Normung der Vorschriften für geschweißte Stahlbauten (36 C) und mit Unterstützung der Schweißdrahtfabriken „Willem Smit en Co's Transformatorenfabriek" zu Nijmegen, „Arcoselectrolasch" zu Amsterdam und „Nederlandsche Kjellberg Electrodenfabriek" zu Amsterdam sind an der Technischen Hochschule zu Delft (Niederlande) Versuche mit elektrisch geschweißten Probekörpern gemacht worden, um zu untersuchen, ob die obengenannten Voraussetzungen zutreffen. Die Ausbildung der Probestücke ersieht man aus den Skizzen in der Tabelle, die Art der Nähte aus der Spalte hinter den Skizzen und die Winkel zwischen der Kraftrichtung und dem kleinsten Querschnitt der Naht aus der nächsten Spalte.

In jeder Art sind drei Probestücke hergestellt worden, nämlich ein Stück mit Resistenz-Schweißdrähten von *Smit*, ein Stück mit Stabilend-Schweißdrähten von *Arcos* und ein Stück mit OK-Schweißdrähten von *Kjellberg*. Unter „Bruchspannung" sind die mittleren Quotienten von den von der Laschnaht übertragenen Kräfte (wobei die Nähte brachen) und die kleinsten Nahtquerschnitte eingetragen.

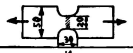
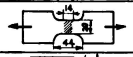
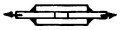
Die „Bruchspannungen" der geschweißten Probestücke sind verglichen mit den mittleren Bruchspannungen in runden Normalstäben (Φ 10, Meßlänge 50 mm), die vollständig aus Schweißgut hergestellt sind. Die mittlere Bruchspannung von neun solchen Stäben (drei hergestellt aus jeder Marke Schweißdrähte) ist gemessen und oben in der Tabelle hinter XVI eingetragen. Sie ist gleich 48,3 kg/mm².

Der Werkstoff der zusammengeschweißten Teile ist St. 37.

Die Verhältnisse zwischen den mittleren Bruchspannungen der geschweißten Probestücke und den mittleren Bruchspannungen der Normalstäbe aus Schweißgut sind in der sechsten Vertikalspalte der Tabelle eingetragen. In der siebenten Vertikalspalte ist angegeben, wie groß das Verhältnis sein sollte, wenn die obengenannten, zu prüfenden Voraussetzungen genau zutreffen. Der Vergleich der in diesen Spalten nacheinander eingetragenen Zahlen gibt die Kontrolle über die Richtigkeit der Voraussetzungen. Bevor wir diese Zahlen vergleichen, geben wir noch einige Erläuterungen betreffs der Proben.

Figur 5 zeigt die gesamten Probekörper vor dem Versuch.

Die Probekörper I, II, V und VI haben Stumpfnähte und sind nach dem Schweißen genau auf Maß bearbeitet (Dicke 10 bis 14 mm). Die übrigen Probekörper haben Kehlnähte, die mit dem Apparat von Dr. Ing. *H. Schmuckler* (dieser Apparat hat sich hierbei als sehr nützlich erwiesen) gemessen sind. Die Bruchspannungen sind bezogen auf den gemessenen Querschnitt (die gemessene Dicke a

Nr	Prüfkörper	Art der Nähte	Art der Beanspruchung	Bruchspannung in kg/mm²	Verhältnis zu XVI beobachtet	Verhältnis zu XVI berechnet	Spannung bei Eindrückung von 0,2 mm kg/mm²	Spannung bei Eindrückung von 0,2 mm Verhältnis zu XVI	Spannung bei Eindrückung von 1,0 mm kg/mm²	Spannung bei Eindrückung von 1,0 mm Verhältnis zu XVI	Bessel kg/mm²	Vogel kg/mm²	Dresdener Schweissversuche kg/mm²	Boston kg/mm²	Hohn kg/mm²	Mac-Gibbon kg/mm²	E.T.H. Zürich kg/mm²	R.S.W. kg/mm²	
XVI		ganz aus Schweißgut	Zug-normal	48,3															
I		Stumpfnaht	Zug-normal	49,3	1,02	1,00					36,0 [1]							34,0 [1]	[1] nicht ausgearbeitet
II		Stumpfnaht	Zug-normal	50,1	1,04	1,00											40,0		
VII		Stirnnaht	Zug-normal	57,1	1,19	1,00													
VIII		Stirnnähte	Zug unter 79° und Reibung	51,9	1,07	0,91						46,5		45,0	41,0		49,5	35,0	
IX		Stirnnähte	Zug unter 45°	33,4	0,69	0,71													
VI		Stumpfnähte	Abscherung	31,1	0,64	0,58													
X		Stirnnaht	Abscherung	29,9	0,62	0,58													
XIV		Flankennähte	Abscherung und sekundärer Zug	30,9	0,64	0,58					32,0	40,0		34,0	28,0	39,0	35,4	29,0	
XV		Flankennähte	Abscherung und sekundärer Druck	35,6	0,74	0,58						50,0				48,0			
XI		Stirnnähte	Druck unter 45°	40,6	0,84	0,71						42,5							
XII		Stirnnähte	Druck unter 72°	> 64,1	> 1,33	0,92	37,8	0,78	55,0	1,14			> 53,0						
V		Stumpfnähte	Druck	> 78,8	> 1,63	1,00	37,8	0,78	48,3	1,00			> 46,0						
XIII		Stirnnaht	Druck	> 70,7	> 1,46	1,00	61,6	1,27											

multipliziert mit der gemessenen Länge der Naht). Im allgemeinen waren die Kehlnähte 4 mm dick vorgesehen; die Messung zeigte aber meistens eine größere Dicke.

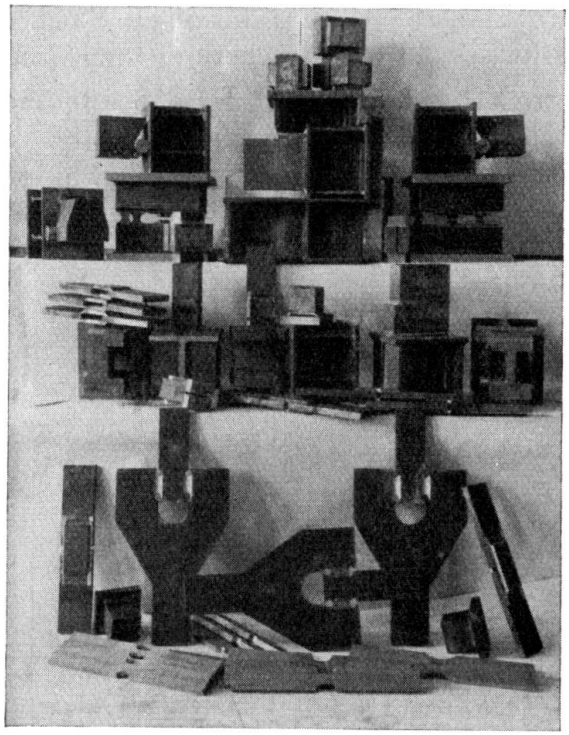


Fig. 5.

Figur 6 zeigt eines der Probestücke VII mit einer Bügelvorrichtung, um das Stück unter die Prüfmaschine setzen zu können. Das Kräftespiel, bei einer normal auf Zug beanspruchten Kehlnaht zeigt Figur 7. Ist P der Druck der Versuchsmaschine beim Bruch, b die Breite der Schweißnaht und a die Dicke der Naht (Fig. 7), so ist die Bruchspannung $P \frac{\sqrt{2}}{a \cdot b}$. Die Form dieses Probestückes ist, ebenso wie die Form des Probestückes X, im Prinzip dieselbe wie bei den Versuchen *Jensens*.

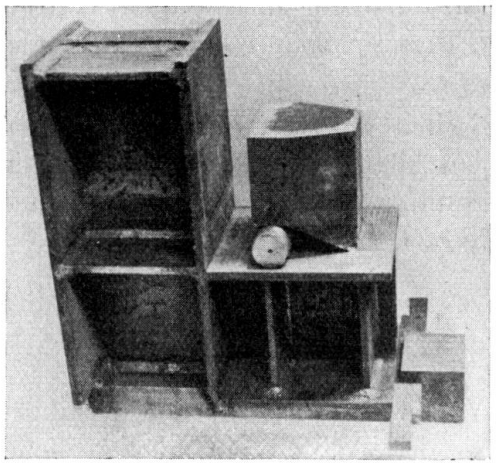


Fig. 6.

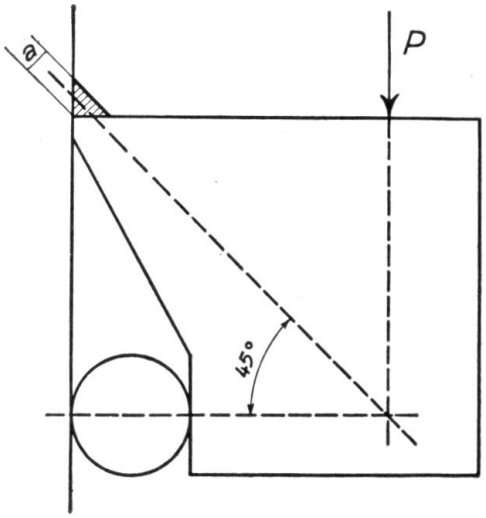


Fig. 7.

Das Kräftespiel bei den Probeformen VIII und IX ist früher erläutert.

Figur 8 zeigt einen der Prüfkörper VI nach dem Versuch.

Die Prüfkörper X sind den Prüfkörpern VII ähnlich. Nur ist die Schweißnaht unten gegen die obere Flansche eines T-förmigen Stückes gelegt. Demzufolge wird die Kehle der Schweißnaht auf Abscherung beansprucht.

Bei den Prüfkörpern XII, V und XIII, deren Schweißnähte auf Druck unter 72°, bzw. auf normalen Druck beansprucht sind, trat kein Bruch ein. Das Schweißgut dehnte sich aus, ohne zu brechen. Die Eindrückungen der offenen Nähte sind gemessen und die Spannungen in den Schweißnähten bei 0,2 mm

Fig. 8.

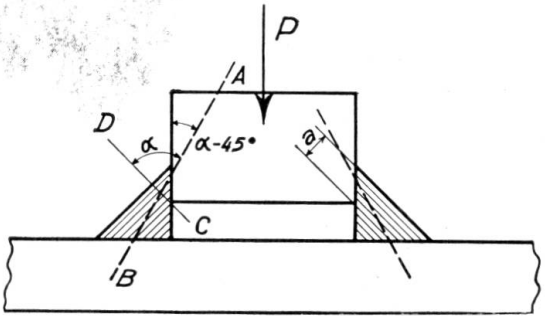


Fig. 9.

und bei 1,0 mm Eindrückung sind in der Tabelle eingetragen. In der Spalte „Bruchspannung" sind die Spannungen eingetragen, bei denen der Versuch nicht weiter fortgesetzt werden konnte.

Während des Schweißens lagen Kupferplättchen in den offenen Spalten der Proben XII und XIII, damit das Schweißgut nicht in die Spalten eintreten könne. Als Dicke dieser Nähte ist die Dicke a, Figuren 9 und 11, in die Berechnung eingeführt.

Bei Probeform XII ist der Winkel α zwischen der von einer Schweißnaht zu übertragenden Kraft (A B Fig. 9) und dem kleinsten Querschnitt der Naht statisch nicht bestimmt. Mit F gleich der Summe der kleinsten Querschnitte (C D) der beiden Nähte ist die schräge Bruchkraft für eine Naht

$$\frac{1}{2} F \sigma_{B\alpha} = \frac{\sigma_{B\,Zug}}{\sqrt{\sin^2 \alpha + 3 \cos^2 \alpha}}.$$

Die Richtung dieser Kraft bildet einen Winkel α—45° mit der Vertikalen. Da die Horizontalkomponenten der Kräfte in den Nähten einander aufheben, ist die von dem Probestück übertragene Kraft P die Summe der Vertikal-

komponenten. Also

$$P = 2 \cdot \frac{1}{2} F \cdot \frac{\sigma_{B\,Zug}}{\sqrt{\sin^2 \alpha + 3 \cos^2 \alpha}} \cos (\alpha - 45^0).$$

Diese Kraft wird ein Maximum für $\alpha = 72^0$ und beträgt dann:

$$P = 0{,}82\, F\, \sigma_{B\,Zug}.$$

Figur 10 zeigt eines der Probestücke V nach dem Versuch. Die Schweißnähte fallen in die vier verschmälerten Ecken. Die Stege der I-Stücke, die vor der Erprobung etwa 9 mm von einander entfernt waren, liegen an.

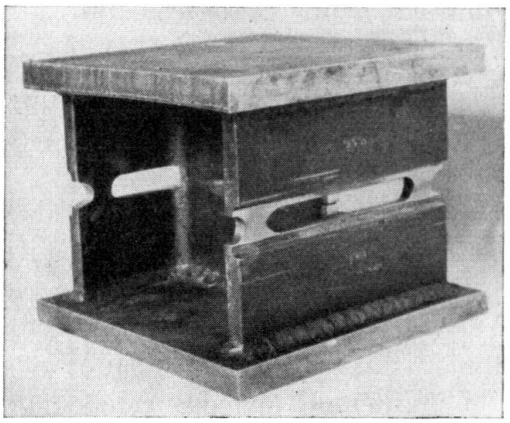


Fig. 10.

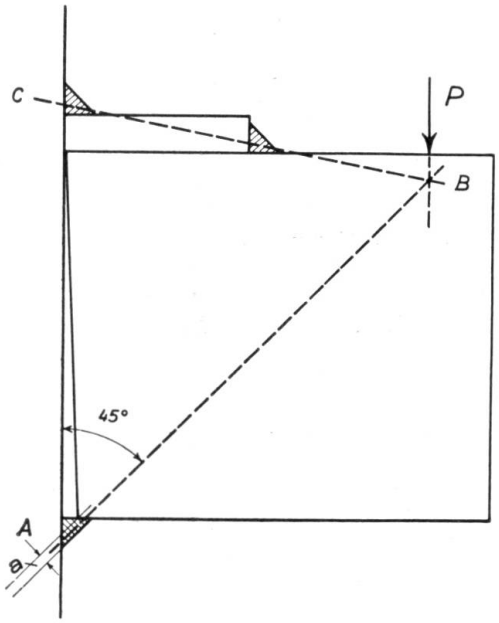


Fig. 11.

Das Kräftespiel in den Probekörpern XIII wird erläutert durch Figur 11. Die untere Kehlnaht ist in der Richtung B A, also normal auf Druck beansprucht. Die Kraft ist

$$P \frac{AB}{AC}, \text{ die Spannung } P \frac{AB}{AC} : a\,b$$

(b die Länge der Naht). Obgleich die oberen Nähte 8 mm dick waren, die untere Naht (a) nur 3 mm, brachen die oberen Nähte zu früh. Der Versuch, der für die untere Naht gilt, konnte demzufolge nicht durchgeführt werden bis die Stücke anlagen oder 1 mm Eindrückung erreicht war. Für 0,2 mm Eindrückung der Spalte ist die Spannung jedoch gemessen und in der Tabelle eingetragen.

Untersucht wurde weiter, ob die Versuche von anderen Beobachtern mit der oben beschriebenen Theorie übereinstimmen. Diese Versuche dehnen sich aber nicht über die ganze Reihe der Belastungsarten der Nähte aus. Dadurch ist es schwer, die Theorie nach diesen Beobachtungen zu prüfen; man darf die Versuche von verschiedenen Beobachtern nicht ohne weiteres miteinander ver-

gleichen. In Betracht sind nur solche Versuche gezogen, die sich über möglichst viele Belastungsarten ausdehnen. Es sind die Versuche von:

C. Bessel, publiziert in „Der Stahlbau" 1931, Heft 23. Sie sind in der Tabelle kurz angedeutet mit „Bessel".

Andrew Vogel — Journal of the American Welding Society, April 1929 — kurz angedeutet mit „Vogel".

Die Dresdener Schweißversuche — „Der Stahlbau" 1931, Heft 12.

Report of tests, Boston Section — Journal of the American Welding Society — kurz angedeutet mit „Boston".

E. Hohn — Congrès Int. de la Construction Métallique zu Lüttich, September 1930 — kurz angedeutet mit „Hohn".

F. P. Mac Gibbon — First Communications of the New International Association for Testing Materials, Seite 155 — kurz angedeutet mit „Mc. Gibbon".

Eidgenössische Materialprüfungsanstalt der E. T. H. zu Zürich — Bericht Nr. 86, Seite 5 — kurz angedeutet mit „E. T. H. Zürich".

Report of Structural Steel Welding Committee of the American Bureau of Welding — kurz angedeutet mit „R. S. W."

Die Bruchspannungen sind in der Tabelle unter den kurzen Andeutungen („Bessel", „Vogel" usw.) eingetragen. Meist ist das Mittel der äußersten Werte der Serien eingeschrieben.

Prüfen wir jetzt die oben beschriebene Theorie an den Zahlen in der Tabelle. Die Reihenfolge der Versuchskörper ist derart, daß oben Prüfkörper aufgenommen sind (I, II und VII), deren Nähte in ihrem kleinsten Querschnitt normal auf Zug beansprucht sind. Dann folgen Versuchskörper, deren Nähte schräg auf Zug beansprucht sind und zwar unter allmählich kleiner werdenden Winkeln (VIII und IX). Dann folgen die Prüfkörper zur Untersuchung des Widerstandes gegen Abscherung usw. Die letzten Prüfkörper in der Reihe haben Nähte; die normal auf Druck beansprucht sind.

Vergleicht man die beobachteten und berechneten Verhältnisse zwischen den Bruchspannungen der Nähte und den Bruchspannungen der Normalstäbe aus Schweißgut, so sieht man, daß erstere im allgemeinen ein wenig höher sind als letztere. Bis zu Probekörper XII sind die Verhältnisse ziemlich gleich. Die unter 72° gedrückten (XII) oder normal gedrückten (V und XIII) Schweißnähte sind aber viel stärker, wie aus der Berechnung abgeleitet ist. Für Druck unter mehr als 45° ist die angegebene Theorie also nicht zulänglich. Dies stimmt mit dem Gebrauch überein, die zulässige Spannung in den Nähten für Druck größer anzusetzen als für Zug. Daß der Widerstand der Nähte gegen Druck sehr groß ist, gilt nicht nur für Stumpfnähte, sondern auch für Kehlnähte. Die gedrückten Kehlnähte XIII sind außerordentlich stark. Bei einer Eindrückung von 0,2 mm ist die Spannung schon das 1,27fache der Zugbruchspannung des Schweißgutes. In der Praxis ist der Widerstand bei Verbindungen gemäß den Versuchskörpern XII und XIII noch viel größer, wie es die Versuche angeben, weil das Eindringen des Schweißgutes in die Spalte in der Praxis nicht, wie bei der Anfertigung der Versuchskörper, durch Einlegen von Kupferplättchen während des Schweißens gehindert wird. Da Verbindungen wie XII bei Säulenfüßen (wenn die unteren

Seiten der Stützen nicht genau bearbeitet sind) und Verbindungen wie XIII bei Anschlüssen von Trägern und Stützen vorkommen, wäre es wichtig, Versuche mit derartigen Versuchskörpern durchzuführen, wobei aber das Eindringen des Schweißgutes in die Spalte nicht gehindert ist. Die Dresdener Schweißversuche enthalten eine solche Probe gemäß Versuchskörper XII, aus der aber nur hervorgeht, daß die Bruchspannung[1] größer ist als 52,5 kg/mm².

Abgesehen von den Versuchskörpern XII, V und XIII, deren Nähte unter 72° oder normal auf Druck beansprucht sind, weisen die Versuchskörper XI die größte Abweichung von der Theorie auf. Die aus dem Versuche abgeleitete Bruchspannung ist das 0,74fache der Zugbruchspannung des Schweißgutes. Nach der Theorie müßte sie das 0,58fache sein. Diese Versuchskörper sind also $\frac{0,74}{0,58} = 1,27$ mal stärker als berechnet. Sie haben Flankennähte, die auf Abscherung belastet sind, und unterscheiden sich dadurch von dem Versuchskörper XIV, daß die verbundenen Teile gedrückt anstatt gezogen werden. Die Naht wird dadurch bei der Belastung kürzer anstatt länger. Die Versuche von *Vogel* und *Mac Gibbon* bestätigen, daß Flankennähte zwischen gedrückten Stücken widerstandsfähiger sind als Flankennähte zwischen gezogenen Stücken. Die Tatsache ist dadurch erklärlich, daß die Naht während des Abkühlens nach dem Schweißen kürzer werden würde, wenn die verbundenen Teile es nicht verhinderten. Die Naht hat dadurch beim Anfang des Belastungsversuches eine Zugvorspannung in Längsrichtung, die bei Druckbelastung des Versuchskörpers kleiner wird. Nach der Plastizitätslehre würde dies die Bruchfestigkeit aber nicht beeinflußen.

Die darauf folgenden größten Abweichungen der Theorie findet man bei den Prüfkörpern VIII und VII. Der Widerstand ist dabei $\frac{1,07}{0,91} = 1,19$ bzw. $\frac{1,19}{1,00} = 1,19$ mal so groß als berechnet.

Bei den übrigen Versuchskörpern (I, II, IX, VI, X und XIV) geht die Abweichung zwischen der beobachteten Bruchspannung und der durch Berechnung aus der Zugfestigkeit des Schweißgutes abgeleiteten bis zu 10 % und zwar in dem Sinne, daß erstere, mit einer Ausnahme (IX), größer ist.

Im allgemeinen ist die Bruchspannung, welche aus den Versuchen ermittelt wurde, etwas größer als die durch Berechnung aus der Bruchspannung bei normalen Prüfstäben aus Schweißgut abgeleitete. Dies gilt ebensogut für Kehlnähte wie für Stumpfnähte. Die Bruchspannungen ändern sich mit dem Winkel, unter welchem die Kraft auf den kleinsten Querschnitt der Nähte wirkt und zwar in gleicher Weise. Eine normal gedrückte Kehlnaht (VII) ist sehr stark.

[1] Mit „Bruchspannung" ist gemeint die Kraft auf die Verbindung dividiert durch die Summe der kleinsten Querschnitte der Nähte.

Schlußfolgerungen.

Aus Obenstehendem ziehen wir die folgenden Schlußfolgerungen bezüglich der Berechnung von geschweißten Verbindungen bei statischer Belastung (Hochbauten):

1. daß es nicht richtig sei, für alle Kehlnähte die zulässige Spannung auf denselben niedrigen Betrag zu stellen, wie es in „DIN 4100" und „Code for Fusion Welding and Gascutting in Building Construction" vorgeschrieben ist.

2. daß in den Vorschriften die gleichen zulässigen Spannungen für Kehlnähte und Stumpfnähte vorgeschrieben werden sollten und der Betrag abhängig gemacht werden sollte von dem Winkel zwischen der Kraftrichtung und dem kleinsten Nahtquerschnitt.

3. daß die Theorie konstanter Gestaltsänderungsenergie das Verhältnis zwischen der normalen Zugbruchspannung und einer schrägen Bruchspannung richtig angibt. Normal oder schräg unter einem Winkel $> 45^0$ gedrückte Nähte sind aber viel widerstandsfähiger, als durch Berechnung aus der Zugbruchspannung abgeleitet wird.

4. die Annahme, daß der Bruch in dem kleinsten Querschnitt einer Kehlnaht, also in der Kehle (C D Fig. 1) stattfindet, und die Annahme, daß bei statisch unbestimmten Konstruktionen die Kraft gemäß der Plastizitätslehre die günstigste mit der Gleichgewichtslehre verträgliche Richtung annimmt. führt zu praktisch gut verwendbaren Ergebnissen.

Zusammenfassung.

Zu Beginn des Beitrages schildert der Verfasser die Anwendung der Theorie auf Schweißverbindungen. Dann beschreibt er eigene Versuche und vergleicht sie mit schon veröffentlichten. Diese bestätigen die Gültigkeit der Theorie der konstanten Gestaltänderungsenergie für dieses Gebiet.

IIIc 2

Prüfungsmethoden im Werk und auf der Baustelle.

Méthodes d'essai à l'atelier et sur le chantier.

Testing Methods in Workshop and ad Site.

M. Pinczon,
Ingénieur en Chef Conseil des Chantiers et Ateliers de Saint Nazaire.

Das Laboratorium für mechanische Versuche, das der Schweißwerkstatt der Werft in Penhoët angegliedert wurde, ist nicht zu dem Zweck errichtet worden, theoretische Versuche über die Schmelzschweißung anzustellen. Der Zweck dieses Laboratoriums ist vielmehr der, eine wissenschaftliche und möglichst methodische und laufende Kontrolle der Schweißarbeiten jeder Art, die in dieser Werkstatt geleistet werden, sicherzustellen.

Diese Arbeiten sind in der großen Mehrzahl Lichtbogenschweißungen, und von dieser besonderen Art der Schmelzschweißung wird im vorliegenden Bericht ausschließlich die Rede sein. Wir werden somit weder von der Widerstandsschweißung noch von der Punktschweißung reden, wenngleich beide für die Stahlkonstruktionen von Interesse sind. Auch die Schmelzschweißung mittels des Brenners, deren Anwendung auf unserer Werft nur in beschränktem Maße vorkommt, werden wir nicht behandeln.

Diese Werft ist, wie wir glauben, hinreichend bekannt; es sei nur erwähnt, daß auf ihr der Übersee-Dampfer „Normandie" gebaut worden ist. Außer Schiffskörpern werden hier noch Dampf- und Verbrennungsmaschinen, Land- und Schiffskessel hergestellt. Es ergeben sich somit viele und verschiedenartige Anwendungen für die Lichtbogenschweißung; immer mehr verdrängt sie die Nietung beim Verbinden von Blechen und Profilen, sowie das Gießen für gewisse Bau- und Maschinenteile.

Auf diese letzteren Anwendungen wollen wir nicht eingehen; wir beschränken uns auf die Schweißnähte der Baukonstruktionen aus Stahl und wollen hier lediglich von der Auswahl der Werkstoffe und von deren Verwendung sprechen.

Zur Erforschung dieser beiden Fragen wurde ein mechanisches Versuchslaboratorium eingerichtet, und wir wollen im nachstehenden die Methode der Kontrollen erläutern, die von uns angewandt wird, sowie die Versuchsergebnisse besprechen, die wir erhalten haben.

1. Der Werkstoff.

Bei einer geschweißten Konstruktion ist der Werkstoff und das Schweißgut zu unterscheiden. Wir behandeln zunächst den ersteren. Die Auswahl der mechanischen Eigenschaften, die er haben muß, wird nicht durch schweißtechnische

Überlegungen bestimmt; dasselbe gilt jedoch nicht von seiner chemischen Zusammensetzung, denn der Einfluß dieser Zusammensetzung auf die Eigenschaften der Schweißverbindung und sogar auf die Möglichkeit der Ausführung dieser Verbindung unterliegt keinem Zweifel.

Es gibt in der Tat schweißbare und nicht schweißbare Stahlarten. Es genügt übrigens nicht, diese Einteilung zu rubrizieren, man muß auch deren Sinn ererläutern; außerdem ist eine Versuchsmethode auszuarbeiten, die es gestattet, eine gegebene Stahlsorte in die eine oder andere Kategorie einzuordnen.

Was ist also ein schweißbarer Stahl? Bevor wir die Frage beantworten, erinnern wir daran, daß man in jeder Schweißverbindung drei verschiedene Zonen unterscheidet: in der Mitte das Schweißgut, an den Seiten den Werkstoff und zwischen beiden eine wenig ausgedehnte Zone, die man Zwischenzone nennt.

Diese drei Zonen sind durch ihren Ursprung und durch ihre thermische Behandlung verschieden. Das Schweißgut stammt von der Elektrode und, in gewissem Maße, von deren Umkleidung; es wurde durch vollständiges Schmelzen bei einer mehr oder weniger hohen Temperatur und durch schnelle Abkühlung erhalten.

Die Zwischenzone wird durch die mehr oder weniger innige Mischung des Elektrodenmetalles und des Werkstoffes gebildet. Im Laufe des Schweißvorganges lag die Temperatur zwischen der der mittleren Zone und der des beginnenden Schmelzvorganges.

Schließlich wurde der Werkstoff in der Nähe der Zwischenzone im Augenblick des Schweißens auf eine hohe Temperatur gebracht, die allerdings niedriger ist als die Schmelztemperatur, und dann an der Luft mehr oder weniger schnell abgekühlt. Diese thermische Behandlung hat seine mechanischen Eigenschaften in einem bestimmten Grade abgeändert.

Es sind dies wohlbekannte Tatsachen, auf die hier näher einzugehen nicht nötig ist. Sie bildeten den Gegenstand eines gründlich durchgearbeiteten Vortrages an der Liller Universität am 23. Februar 1933, den der Vortragende, Herr *Portevin*, mit dem Vorschlage beschloß, die Schweißbarkeit wie folgt zu definieren: „Es ist die Fähigkeit der Metalle, bei Befolgung durchgebildeter Regeln der Schweißtechnik ein kompaktes und kontinuierliches Ganzes zu bilden, welches frei von physikalischen Fehlern und dabei so homogen wie möglich ist, d. h., daß es in der bestmöglichen Weise die Gleichförmigkeit derjenigen Eigenschaften verwirklicht, die die Verwendung des Schweißstückes verlangt.“ Diese Definition kann in ihrer Gesamtheit angenommen werden, obschon sie Anlaß gibt zu einigen Beschränkungen, auf die hier indessen nicht eingegangen werden soll. Welche Methode muß herangezogen werden, um obige Definition bezüglich der Frage der Schweißbarkeit eines Stabes anzuwenden? Theoretisch müßte man alle drei Teile der Schweißverbindung von einander trennen: Schweißgut, Werkstoff in der angewärmten Zone und Zwischenzone, und deren metallurgische und Festigkeits-Eigenschaften bestimmen, um sie mit denen des Werkstoffes in seinem ursprünglichen Zustand zu vergleichen. Hierin liegt, sofern es sich um das Schweißgut handelt, keinerlei Schwierigkeit, denn man kann Probekörper in normalen Abmessungen aus ihm herstellen, die man nach üblichen Methoden und mittels der gebräuchlichen Maschinen prüfen kann.

Anders verhält es sich mit der angewärmten Zone und mit der Zwischen-

zone. Beide, und im besonderen die letztere, weisen in der Querrichtung der Schweißnaht sehr geringe Ausdehnung auf und eignen sich schlecht zur Entnahme von Prüfkörpern normaler Art, mit Ausnahme derjenigen für die Kerbschlagprobe. Darauf weist denn auch *H. Portevin* in seinem Vortrag hin:

„Die Prüfmethoden, die zur Verwendung kommen, müssen notwendigerweise auf lokale Untersuchung zugeschnitten sein . . .; sie sollen zweckdienlich mit sehr kleinen Prüfkörpern und mittels eigens zu dem Zweck konstruierter Maschinen durchgeführt werden."

Solche Maschinen sind in einer Mitteilung von *H. Pierre Chenevard* an die französische Akademie der Wissenschaften vom 30. Januar 1935 behandelt worden (siehe «Technique Moderne» vom 1. Mai und 1. Juni 1935); aber, wenn Forschungen dieser Art im Laboratorium eines Hüttenwerkes angebracht sind, da wo es sich um die Durchbildung einer Formel und um die Ausarbeitung eines Herstellungsverfahrens für einen neuen Stahl handelt, so bieten sie dem Industriellen keine Handhabe, der weder über die Zeit noch über die erforderliche Ausrüstung verfügt, und der lediglich, schnell und ohne große Unkosten, zu erfahren sucht, ob ein Stahl, den er zu verwenden gedenkt, praktisch schweißbar ist, d. h. ob es im Handel Elektroden gibt, mit denen dieser als Werkstoff gedachte Stahl praktisch homogene Schweißverbindungen herzustellen gestattet.

Wenn die Frage so gestellt wird, scheint es, als ob sie einer einfachen Lösung zugänglich wäre, die wir bereits vor mehreren Jahren anzuwenden Gelegenheit hatten, und zwar bei Schweißarbeiten an Bord des Ozeandampfers „Paris".

Diese Lösung besteht darin, die angewärmte Zone und die Zwischenzone zu gleicher Zeit an einem in folgender Weise hergestellten Prüfkörper zu erforschen. Aus dem ursprünglichen Werkstoff schneidet man einen gewöhnlichen Prüfkörper für Zugversuche mit rechteckigem Querschnitt (Fig. 1). Auf diesen Prüfkörper wird mittels der Elektrode, die man zu verwenden gedenkt, eine Längs-Schweißnaht, symmetrisch zur Achse des Prüfkörpers und diese völlig überdeckend, gelegt. Das aufgetragene Metall wird weggeschliffen und es verbleibt dann ein Prüfstab, der in seinem Molekularzustand ein praktisch hinreichend treues Abbild der zu erforschenden beiden Zonen darbietet.

Damit dem so sei, muß die Dicke des Prüfstabes gering sein. Sie hängt vom Durchmesser der Elektrode, die man bei der Schweißarbeit zu verwenden gedenkt, ab. Für eine Elektrode von 3,8 mm Φ hat der Prüfstab eine Stärke von 10 mm.

Dieser Stab wird auf einer der üblichen Maschinen geprüft (wir verwenden im Laboratorium eine Amsler-Maschine von 50 t) und man vermerkt Elastizitätsgrenze, Bruchlast, Dehnung und Einschnürung.

Vorher sind ähnliche Messungen auf demselben Stab des Werkstoffes, jedoch ohne Auftragung einer Schweißnaht, vorgenommen worden.

Der Vergleich der beiden Meßreihen ermöglicht bereits eine erste Schätzung der Homogenität der Verbindung; man ergänzt sie indessen durch einen anderen Versuch, der die Dehnung des Werkstoffes in der Zwischenzone ins Licht rückt. Dazu stellt man einen Prüfstab für den Biegeversuch her (Fig. 2), auf dessen eine Seite wieder eine Schweißnaht aufgetragen wird; nachdem diese weggeschliffen ist, führt man den Versuch durch, indem man die Seite, auf die

die Schweißnaht aufgetragen wurde, nach der auf Zug beanspruchten Seite anordnet. Der Vergleich des vor Rißbildung auftretenden Biegewinkels mit dem beim ursprünglichen Metall gefundenen ergibt die Grundlage für den Vergleich der Dehnungen.

Ein dritter Versuch ist endlich die Kerbschlagprobe. Wir verwenden im Allgemeinen die Mesnager-Prüfstäbe und legen die Schweißnaht (Fig. 3) auf eine der senkrecht zur Kerbe gerichteten Längsseiten. Wie bei den früher besprochenen Versuchen wird die Schweißnaht weggeschliffen und es wird ein Vergleichs-Prüfstab dem ursprünglichen Werkstoff entnommen.

Gewiß erhält man mit diesem Verfahren eine geringere Anzahl Meßergebnisse als mit der von *H. Portevin* ins Auge gefaßten Versuchsreihe und man kann den Einwand machen, daß hinsichtlich der Zugprobe nicht zwischen den beiden Zonen unterschieden wird. Indessen ermöglicht das Verfahren billig und schnell eine hinreichende Klärung, ob es sich um schweißbare oder nicht schweißbare Stahlsorten handelt und wir haben bisher mit seiner Verwendung niemals Schwierigkeiten gehabt.

Hier folgen einige typische Ergebnisse.

Alle Versuche, die wir im folgenden anführen, wurden mit derselben Elektrodentype durchgeführt, die wir mit E_1 bezeichnen und die uns bereits früher zufriedenstellende Ergebnisse geliefert hatte.

Das Elektrodenmetall hatte folgende mechanische Eigenschaften:

$$E = 47{,}3 \qquad R = 59 \qquad A = 20$$

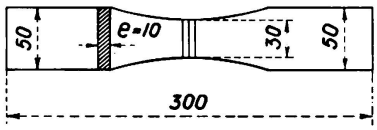
$$\rho \text{ (Mesnager)} = 6{,}42 \qquad \alpha = 135^0$$

(E = Streckgrenze und R = Bruchspannung in kg/mm², A = Dehnung in % ρ = Schlagarbeit in m kg/cm², α = Biegewickel. Red.)

Die Prüfstäbe Nr. 1 sind diejenigen der Figuren 1 bis 3; die Prüfkörper Nr. 2 sind in den Figuren 4 bis 6 dargestellt und wurden stumpfgeschweißt.

Wir bezeichnen die einzelnen Stahlsorten, die den Proben unterlagen, mit A, B, C usw.

Fig. 1.



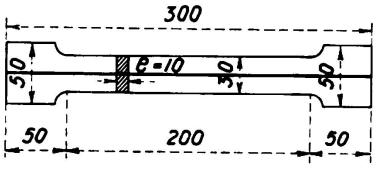
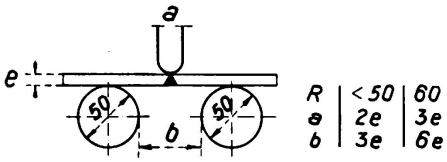


Fig. 4.

Fig. 2.



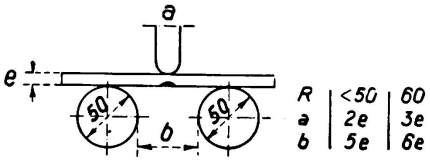
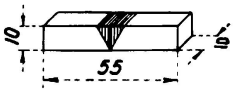


Fig. 5.

Fig. 3.



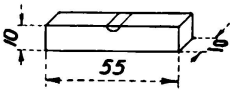


Fig. 6.

Charakteristiken		Grundwerkstoff	Prüfstäbe Nr. 1	Verhältnisse 3/2	Prüfstäbe Nr. 2
1		2	3	4	5
		Stahlsorte A			
Zug	E	35,9	46,2	1,29	
	R	62,4	64,6	1,04	55,3
	A	24 %	7 %	*0,29*	
	R + 2 A	110	79	0,72	
	Einschnürung	64 %	32 %	0,50	
Biegeprobe	Erster Riß	180°	62°	*0,35*	
	Bruch	—	69°	—	
Kerbschlag (Mesnager)		7,4	3,1	0,42	6,6
		Stahlsorte B			
Zug	E	36,9	—	—	
	R	54,7	57	1,04	52,7
	A	25 %	16,4 %	0,64	
	R + 2 A	105	90	0,86	
	Einschnürung	56 %	31 %	0,55	
Biegeprobe	Erster Riß	—	—	—	
	Bruch	180°	147,0	0,82	
Kerbschlag	(Mesnager)	21,6	9,1	*0,42*	
	U. F.	10,9	7,9		5,5
		Stahlsorte C			
Zug	E	42,1	48,6	1,16	37,9
	R	68,2	56,8	*0,83*	50,7
	A	25 %	3 %	*0,12*	
	R + 2 A	118	63	0,53	
	Einschnürung	54	8 %	0,15	
Biegeprobe		180°	39°	*0,22*	
Kerbschlag		6,8	0,9	0,13	6,9
		Stahlsorte D			
Zug	E	34,6	33	0,96	Keine Aufnahme
	R	54,5	59,5	1,09	
	A	23 %	17 %	0,74	
	R + 2 A	100	94	0,94	
	Einschnürung	52	33	0,64	
Biegeprobe		180°	107°	0,60	
Kerbschlag		7,8	7,5	0,97	

Bezeichnungen und Angaben		Elektroden			Schweißstrom		Gewichtsverlust pro kg Schweißgut		pro kg Schweißgut benötigte Zeit		Elastizitätsgrenze	Bruchlast	Dehnung auf 50 mm	Winkel der Rißbildung	Winkel der Biegung ohne Rißbildung	Kerbschlagprobe		Brinellhärte	Bruchfestigkeit des Werkstoffes
		Φ	Gewicht	Länge	Amp.	Volt	Verflüchtigung	Insgesamt	Schmelzzeit	Insgesamt						Mesnager	UF		
		mm	gr	cm			gr	gr			kg	kg	%						kg
E_1	Schweißgut	4	44	45	160	22	137	261			44,2	55,2	16,5	125°			7,2	142	
	Stumpfschweißung P	4	44	45	155	22	180	270	46 m 30 s	1h 1 m		55,9		146°			6,6	142	55
E_2	Schweißgut	4	44	45	160	26	59	179			47,3	59	20				8,2	155	
	Stumpfschweißung P	4	44	45	150	26	109	227	44 m 6 s	1h 37 m		59,7		120°			7,03		60
E_5	Schweißgut	4	39	40	147	19	185	330	1h 17 m	2h 30 m	32	40	15,6	16°		4		113	
	Stumpfschweißung P	4	39	40	130	22	93	222	1h 8 m	2h 46 m		42		88°					40
	Stumpfschweißung V	4	39	40	145	21	103	233	1h 8 m	2h 17 m		40							
	Stumpfschweißung T	4	39	40	140	20	157	310	1h 17 m	2h 42 m		44							
E_9	Schweißgut	4	44	45	170	22	75	222			48,7	57,8	27			21,6	13,7	155	
	Stumpfschweißung P	4	44	45	170	22			48 m 30 s	1h 27 m		61,6			180				60
	Stumpfschweißung V	4	44	45	170	22						62,6							
	Stumpfschweißung T	4	44	45	170	22						64,6							

Letztere Stahlsorte ist von den vier geprüften die beste; sie gibt eine praktisch homogene Verbindung mit dem aufgetragenen Schweißgut. Von den Stahlsorten A und C gilt dies nicht. Bei letzterer ist zu bemerken, daß sie als einzige einen Wert R aufweist, der in der angewärmten Zone kleiner ausfällt als im ursprünglichen Werkstoff. Das liegt daran, daß die hohe Festigkeit des ursprünglichen Werkstoffes durch Ausglühen beim Walzen erhalten wurde; die Wirkung dieses Ausglühens wurde durch die Erwärmung aufgehoben und die Festigkeit hat nachgelassen.

Wir gehen nicht weiter hierauf ein. Die Versuche, von denen wir einige Ergebnisse mitteilten, haben uns in den Stand gesetzt, eine Auswahl zwischen den einzelnen Zusammensetzungen von Stahlsorten zu treffen, die uns für einen ganz besonderen Verwendungszweck, nämlich halb-rostfreier Stahl mit hoher Festigkeit für den Schiffskörper eines Ozeandampfers, angeboten worden waren.

2. Das Schweißgut.

Die Erforschung des Schweißgutes ist identisch der Erforschung der verschiedenen Elektroden-Eigenschaften. Elektrodenfabrikate kommen im Handel in stets wachsender Anzahl vor. Ihre Hersteller betonen der einkaufenden Industrie gegenüber die Eigenschaften, die sie für ihre Erzeugnisse in Anspruch nehmen. Diese Behauptungen sind zweckdienlich durch eigene Versuche nachzuprüfen und das tun wir denn auch laufend.

Unsere Versuche gelten nicht nur der Feststellung der mechanischen Eigenschaften; wir beziehen in sie auch andere Daten hinein, die vielleicht weniger wissenschaftlich aber dafür wirtschaftlich wichtig sind.

Die Versuche umfassen im Allgemeinen:

1. *für das Schweißgut:*
   a) einen Zugversuch an zylindrischen Prüfstäben,
   b) einen Kerbschlagversuch am UF- oder Mesnager-Prüfstab, je nach dem Kunden, für den das geschweißte Werkstück bestimmt ist; die Versuchsmaschine ist ein Charpy-Bock,
   c) eine Biegeprobe,
   d) die Messung der scheinbaren Dichte;
2. *für eine stumpfgeschweißte Verbindung:*
   a) einen Zugversuch am rechteckigen Prüfstab (ohne Messung der Dehnung),
   b) eine Biegeprobe;
3. *in beiden Fällen:* die praktische Aufnahme der erreichten Schweißgeschwindigkeit und des durch Verflüchtigung oder Verspritzung verlorenen Elektrodengewichtes.

Als Beispiel geben wir nachstehend eine vollständige Tabelle der Ergebnisse, die mit einer Elektrodenmarke E_2 gewonnen wurden.

Diese Ergebnisse werden den Lieferanten im Allgemeinen mitgeteilt, damit sie in den Stand gesetzt werden, die vorgebrachten Beanstandungen zu berücksichtigen.

So haben wir bei Elektroden Marke E_3 folgende allgemeine Ergebnisse gefunden:

Aufgetragenes Metall: R = 43; E = 38; A = 48

$\alpha = 18^0$; ρ (M) = 11,1.

Versuch an der Stumpfschweißung: R = 47 kg.

Nachdem der Leiter der Firma, die diese Elektrodentype geliefert hatte, bei uns vorgesprochen und unser Laboratorium besichtigt hatte, wurde uns wenige Monate später eine neue Type E_4 angeboten, die folgende Kennzeichen aufwies:

Schweißgut: R = 48,7 E = 40,1 A = 27,9

ρ (M) = 13

Versuch an der Stumpfschweißung: R = 52,5 $\alpha = 132^0$.

Hieraus ist zu ersehen, daß, zugleich mit einer Erhöhung der Bruchfestigkeit, die anderen Eigenschaften der Schweißnaht und vor allem ihre Dehnbarkeit beträchtlich verbessert wurden. Die Stoßkanten-Schweißverbindung wurde mit Blechen von 50 kg/mm² Bruchfestigkeit vorgenommen, jedoch eignet sich diese Elektrode ganz gut für übliche Veritas-Stahlsorten von 48 kg/mm² max. Bruchfestigkeit und gibt mit diesen Stahlsorten homogene Schweißnähte.

Schließlich erscheint es uns wichtig, die Fortschritte zu beleuchten, die in wenigen Jahren bei der Erforschung der Lichtbogen-Schweißelektroden erzielt wurden und zu dem Zwecke in der Tabelle der Seite 539 die Versuche aufzuführen, die zu verschiedenen Zeiten mit den Erzeugnissen desselben französischen Lieferanten vorgenommen wurden.

Die E_6-Elektroden sind zur Verschweißung eines Metalles bestimmt, das folgende mechanische Kennzeichen aufweist und andererseits als mittels dieser Elektroden schweißbar erkannt wurde, wobei dieses Wort in dem von uns definierten Sinn zu deuten ist:

R = 60 A = 20 ρ (UF) = 6.

Die Homogenität der Schweißnaht ist, was die Abstimmung des Schweißgutes auf den Werkstoff betrifft, möglichst gut verwirklicht worden. Im übrigen hat der Schweißbarkeitsversuch bewiesen, daß diese Homogenität in den Übergangszonen genügend groß bleibt.

Man kann deshalb zuverlässig annehmen, daß dieser Stahl bei geeigneter Verwendung Schweißnähte herzustellen gestattet, die jegliche Gewähr bieten.

Wir können diese kurze Übersicht mit der Feststellung beschließen, daß es bereits jetzt eine Auswahl von Elektrodentypen gibt, mit denen homogene Schweißverbindungen hergestellt werden können, deren Zugfestigkeit 40 bis 60 kg/mm² beträgt, bei Dehnungen und Kerbschlagfestigkeiten, die mit denen des Werkstoffs verglichen werden können.

3. *Ausführung.*

a) *Das Personal.* — Wir müssen jetzt noch zeigen, wie die Kontrolle der Ausführung organisiert werden kann.

Gegen die Verallgemeinerung der Verwendung der Schmelzschweißung wurde hauptsächlich folgender Einwand erhoben: Die Qualität der Schweißverbindung

ist wesentlich bedingt durch die Gewandtheit und die Gewissenhaftigkeit des Schweißers. Wie sorgfältig der Ingenieur auch immer die herzustellenden Schweißnähte anordnen und angeben möge und wie gründlich die Forschungen auch seien, die durch geeignete Auswahl der Werkstoffe homogene Verbindungen zu erhalten suchen, das alles ist nutzlos, wenn die Schweißarbeit schlecht ausgeführt wird. Und da es kein praktisches Mittel zur Prüfung der Güte der Schweißarbeit gibt, so ist die Sicherheit, die man zu gewinnen hoffte, illusorisch.

Hierzu möchten wir zunächst bemerken, daß diese angebliche Unmöglichkeit, an dem fertigen Werkstück die Qualität der Ausführung nachzuprüfen, nicht ausschließlich für die Lichtbogenschweißung gilt. Sie gilt auch für Eisenbeton und man hat oftmals versucht, Unfälle bei Eisenbeton-Bauwerken durch schlechte Verarbeitung zu erklären.

Andererseits konnte man vor wenigen Jahren die ernsthaftesten Bedenken gegen die beruflichen Fähigkeiten derjenigen Arbeiter hegen, die sich Schweißer nannten. Aber dies trifft heute nicht mehr zu. Es gibt heute in allen Ländern zahlreiche Schweißerschulen, von denen die Mehrzahl ihr Entstehen der Privatinitiative verdankt, was u. E. sehr gut ist; die Kunst des Lichtbogenschweißens ist jedoch weit davon entfernt, ihre Entwicklung abgeschlossen zu haben. Jedes Jahr erfährt sie Wandlungen und Verbesserungen und nichts wäre ihr verderblicher als amtliche Bevormundung. Wir fordern also für die Schweißtechnik die Freiheit des Unterrichts und wir lehnen auch die Vergebung mehr oder weniger amtlicher Zeugnisse ab, die den Arbeitern als Bescheinigung der Teilnahme am Unterricht in einer Schule ausgestellt werden sollten.

Berufliche Gewandtheit schwindet in jedem Handwerk, am meisten vielleicht gerade in der Schweißerei, wenn sie nicht durch Ausübung aufrechterhalten wird. Zeugnisse hätten also nur für eine gewisse Zeit wirklichen Wert und infolgedessen wäre der Zweck ihrer Einführung hinfällig: Die Notwendigkeit periodischer Prüfungen, die unseres Erachtens unbedingt gegeben ist, wird in der Tat nicht durch die Zeugnisse behoben.

Unsere Schweißerschule wurde 1930 gegründet; die Arbeiter, die durch sie hindurchgegangen sind, führen Stumpf- und Kreuzschweißungen in den drei Hauptstellungen aus: waagerecht, senkrecht und über Kopf. Von den Schweißstücken werden Prüfstäbe entnommen und die Ergebnisse der damit durchgeführten Zugversuche werden ausgewertet, um die Arbeiter einzuteilen. Diejenigen, die in einer bestimmten Stellung ein gewisses Minimum nicht erreicht haben, werden nicht ermächtigt, in dieser Stellung zu schweißen. Diese Maßnahme gilt besonders für die Überkopfschweißung, hinsichtlich welcher, wie wir nebenbei bemerken, durch gewisse Vorschriften ein übertriebenes Mißtrauen an den Tag gelegt wird. Zwei Drittel unserer Schweißer sind imstande, Überkopf-Nähte auszuführen, deren Versuchsergebnisse denen der waagrechten Nähte ebenbürtig sind und in Wirklichkeit werden solche Schweißnähte laufend im Schiffbau hergestellt, ohne daß bislang Mißhelligkeiten daraus entstanden wären. Die Herabsetzung der für über Kopf ausgeführte Schweißnähte zulässigen Beanspruchung ist unberechtigterweise verfügt worden. Es würde genügen, zu bestimmen, daß diese Schweißnähte ausschließlich von Schweißern auszuführen sind, die bei den Eignungsprüfungen bewiesen haben, sie einwandfrei herstellen zu können.

Das ursprünglich für die Zulassung zum Schweißen verlangte Minimum war 35 kg/mm² bei der Stumpfschweißung und 28 kg/mm² beim Versuch der Kreuzschweißung. Dadurch, daß die Qualität der Elektroden verbessert wurde, konnte das Minimum heraufgesetzt werden und beträgt jetzt bei E_6-Elektroden und Blechen mit 50 kg/mm² Bruchfestigkeit 46 kg/mm² beim Versuch auf Stumpfschweißung und 33 kg/mm² beim Versuch auf Kreuzschweißung.

Die Schweißer-Schulung dauert durchwegs sechs Wochen bis zwei Monate. Es kann natürlich nicht behauptet werden, daß eine so kurze Spanne Zeit genügt, um einen Schweißer vollständig auszubilden. Dieser wird vielmehr, während der ersten Monate der Ausübung seines neuen Berufes, fortfahren, seine Handfertigkeit zu steigern.

Daher ist es elementare Vorsicht, ihm anfänglich nur Arbeiten anzuvertrauen, die für die Sicherheit des Bauwerkes unerheblich sind und obendrein durch Kontrollversuche, die häufig wiederholt werden, die Fortschritte zu beobachten, die er macht und die gegebenenfalls Rückschritte sein können. Anfänglich hatten wir als Grundsatz angenommen, während des ersten Jahres der Ausübung die Versuche zur Einteilung der Schweißer alle drei Monate zu wiederholen. Die Erfahrung hat uns gezeigt, daß diese Zeit etwas länger bemessen werden kann und diese Proben finden nunmehr alle vier Monate statt.

Nach einem Jahr kann ein Arbeiter, der seine berufliche Eignung aufrechterhalten hat, Vertrauen erwecken und man kann ihm dann Arbeiten anvertrauen, deren Wichtigkeit der Klasse entspricht, in die er eingeteilt wurde, aber nach wie vor wird nachgeprüft, daß er an Gewandtheit nichts einbüßt und die periodischen Versuche werden nicht fortgelassen; die Häufigkeit dieser Proben wird lediglich eingeschränkt und man nimmt sie nur noch alle sechs Monate vor.

Diese Methode hält das Personal dauernd im Zuge und die einzelnen Schweißer wetteifern miteinander, ein Umstand der sowohl ihnen wie auch dem Werke, das sie beschäftigt, zum Vorteil gereicht.

In der folgenden Tabelle sind die Prüfungsergebnisse der in unserer Schule ausgebildeten Arbeiter zusammengestellt:

Bruchfestigkeit von Stumpfschweißnähten.

Prüflingsnummer:		38.022	38.027	38.049	38.050	38.098
Versuch bei Schulentlassung	H	39.4	41.1	49.9	48.9	38.0
	V	34.8	35.7	45.8	45.5	31.4
	T	36.4	35.7	43.0	45.8	20.5
Erster Trimesterversuch	H	47.9	42.0	49.9	44,5	39.4
	V	39.1	38.1	45.3	45.3	41.9
	T	40.6	30.9	39.5	40.9	39.0
Zweiter Trimesterversuch	H	44.1	37.2	46.5	44.6	41.1
	V	38.6	40.8	40.8	42.2	45.9
	T	34.7	35.2	31.1	45.6	44.2
Dritter Trimesterversuch	H	44.4	43.5	47.6	45.7	45.4
	V	43.5	42.3	42.6	41.2	42.3
	T	43.8	36.1	47.2	42.0	47.6

Prüflingsnummer:		38.022	38.027	38.049	38 050	38 098
Erster Semesterversuch	H	45.6	40.7	48.7	46.9	46.6
	V	41.6	43.3	44.8	44.1	43.5
	T	45.6	42.4	44.2	44.0	41.2
Zweiter Semesterversuch	H	47.1	41.8	45.6	49.1	41.8
	V	40.2	42.8	44,8	44.6	42.1
	T	45.3	38.0	46.0	44.4	41.8

H = waagerechte V = senkrechte T = Überkopfschweißung

Alle diese Versuche wurden mit denselben Elektroden durchgeführt, deren Schweißgut eine geringste Bruchfestigkeit von 40 kg/mm² aufwies, wobei die verwendeten Bleche von der üblichen Güte waren. Seit ungefähr einem Jahre verwendet man Elektroden mit einem Schweißgut höherer Festigkeit und Bleche aus einem Werkstoff von entsprechender und kontrollierter Güte.

Die letzte Prüfung, die den obigen Schweißern unter diesen Umständen abgenommen wurde, ergab folgendes Bild:

H	55,3	64,9	58,4	62,9	54,3
V	55,8	73,0	57,0	57,3	46,5
T	59,8	70,0	57,9	63,2	59,1
Werkstoff	50	60	50	60	50 kg/mm²

Die Daten dieser Tabelle zeigen, daß ein aus der Schule hervorgegangener Arbeiter, der einwandfrei Flachnähte ausführen kann, erst nach einjähriger Praxis dauernd senkrechte oder Überkopfnähte herzustellen in der Lage ist.

Zugleich geht daraus die große Bedeutung hervor, die den von uns seit Anfang der Schule eingeführten periodischen Prüfungen beizumessen ist. Diese stellen gewiß eine Erhöhung der allgemeinen Unkosten der Werkstatt dar, aber wir sehen darin die Gewähr gegen Unfälle, die durch fehlerhafte Schweißungen entstehen könnten. Wir sind der Ansicht, daß kein Werk mit der Ausführung geschweißter Bauwerke, die die öffentliche Sicherheit beeinträchtigen können, betraut werden dürfte, falls es nicht nachweist, daß ihm seit wenigstens einem Jahre eine ähnliche Organisation zu Gebote steht. Die Vorschrift, die man in Pflichtenheften findet, und die lediglich Einzelprüfungen am Anfang der Arbeiten vorsieht, bietet keine genügende Gewähr.

b) *Das Material.*

Wir haben gesehen, wie man ein Schweißerpersonal ausbilden und erhalten kann, das imstande ist, die verschiedenartigsten Arbeiten zu bewältigen. Um diesem Personal Gelegenheit zu geben, seine Befähigung bestens zur Geltung zu bringen, muß man es in geeigneter Weise ausrüsten. Der wichtigste Teil dieser Ausrüstung ist derjenige, der die Stromzuführung übernimmt. Es fällt nicht in den Rahmen dieses Berichtes, die einzelnen Verfahren der Stromverteilung und die Bedingungen, die erfüllt werden müssen, um eine einwandfreie Schweißung zu gewährleisten, zu besprechen. Wir begnügen uns damit, daran zu erinnern, daß die Regelung der Stromstärke eine der wichtigsten dieser Bedingungen ist. Unseres Erachtens ist es somit unerläßlich, daß jeder Schweißer ein in Reihe mit der Elektrode geschaltetes Ampèremeter im Sichtbereich hat.

Die Angaben dieses Stromzeigers werden dem Arbeiter nicht nur dadurch dienen, daß er die ihm vorgeschriebene, geeignete Stromstärke wählen kann, sondern sie werden auch den Vorarbeiter in den Stand setzen, nachzuprüfen, ob die einzelnen unter seiner Leitung arbeitenden Schweißer diesen Vorschriften nachkommen, wobei seine Kontrolle leicht und schnell möglich ist. Der Ausschlag des Ampèremeters gibt also über die gute Ausführung der Arbeit eine direkte und dauernde Auskunft und dies ist unsere zweite Antwort auf den Einwand gegen die allgemeine Anwendung der Lichtbogenschweißung bei Stahlkonstruktionen, den wir oben streiften. Nicht nur wird die Auswahl des Schweißerpersonals so methodisch wie in keinem anderen Beruf durchgeführt, sondern es kann dazu einer der Hauptfaktoren der Ausführung zu jeder Zeit kontrolliert werden.

Wir verwenden zwei Arten der Stromverteilung. Bei der ersten verfügt jeder Schweißer über einen Umformersatz, dem der Netzstrom unter 440 V zugeführt wird und der den niedriggespannten Schweißstrom hergibt. Wir haben Wert darauf gelegt, daß jeder Satz nicht nur mit einem Stromstärkemeßgerät, von dem wir eben sprachen, sondern auch mit einem Spannungsmeßgerät ausgerüstet wurde, dessen Angaben natürlich nicht vom Schweißer abgelesen werden können, die aber wohl dem Vorarbeiter eine sehr nützliche Handhabe für die Beurteilung der Schweißarbeit bieten.

Bei der zweiten Art der Verteilung ist eine von einer Zentrale gespeiste Niederspannungsverteilung vorgesehen, die drei Hellinge und zwei schwimmende Fertigbaustellen bedient und wobei der Netzstrom (5000 V-Wechselstrom) in der Zentrale in Gleichstrom von 45 V umgeformt wird. Die Querschnitte dieser Verteilung wurden so bemessen, daß die Mindestspannung 35 V beträgt. Jeder Schweißer kann eine „Regler" genannte Spezialsteckdose an einem beliebigen Punkte des Netzes anschließen; sie enthält Widerstände, die nicht nur dazu dienen, die Stromstärke des Abzweigs zu regeln, sondern auch dazu, beim Zünden des Lichtbogens und bei jedem Kurzschluß, den die Oszillogramme des Schweißstromes aufzeigen, eine zusätzliche Spannung von 20—25 V zu liefern. Die Stabilität des Lichtbogens wird somit völlig gewährleistet. An jedem Regler befindet sich ein Ampèremeter, jedoch kein Voltmeter, denn der Regler ist einpolig geschaltet; die Rückleitung führt direkt vom Schweißstück zur festverlegten Leitung.

Diese Art der Stromverteilung wurde in einem Artikel der „Technique Moderne" vom 1. Juni 1932 besprochen und die damit gewonnenen Ergebnisse waren so zufriedenstellend, daß im Jahre 1935 eine zweite Zentrale, die einen anderen Teil unserer Werft bedient, erstellt und in Betrieb genommen wurde.

4. Versuche an Schweißverbindungen.

Wir haben an Hand von zahlenmäßigen Angaben über die Ergebnisse von Versuchen mit geschweißten Konstruktionen zeigen wollen, daß die in den vorhergehenden Darlegungen beschriebenen Methoden wohl die Sicherheit gewährleisten, für die sie durchgebildet wurden; indessen haben wir diese Methoden nur bei Schiffskörpern angewandt und bisher wurden noch keine zuverlässigen Versuche an fertiggestellten Konstruktionen durchgeführt. Erst nach einer gewissen Zeit und unter mehr oder weniger ungünstigen Verhältnissen der Schif-

fahrt kann man aus dem Fehlen oder Vorhandensein von örtlichen Formänderungen oder Brüchen schließen, ob die Schweißarbeit wertvoll war oder nicht.

Wir müssen uns somit darauf beschränken, daran zu erinnern, daß die Presse vor ungefähr einem Jahre über die Probefahrten berichtete, die der von unserer Werft für die französische Marine gebaute Kreuzer „Emile Bertin" ausgeführt hat. Beim Bau dieses Schiffes war die Schweißung in reichlichem Maße herangezogen worden. Etliche Probefahrten wurden bei sehr hohem Seegang durchgeführt; trotzdem wies keine Schweißverbindung Spuren von Ermüdung oder Dichtigkeitsmangel auf. Nach sechsmonatiger Winterfahrt im Atlantik führte die Nachprüfung des Schiffskörpers des „Emile Bertin" zu denselben günstigen Feststellungen.

Beim Bau des Ozeandampfers „Normandie" wurde eine große Anzahl Schweißverbindungen hergestellt; zeitweise waren an Bord dieses Dampfers nicht weniger als 140 Schweißer beschäftigt. Indessen sind die wesentlichen Teile dieses Dampfers nicht in geschweißter Konstruktion ausgebildet worden; andererseits ist das Schiff noch nicht lange genug im Dienst, um Schlüsse ziehen zu können.

Wir wollen daher, wenn auch diese Art Arbeiten nicht direkt in den Rahmen der auf dem Kongreß behandelten Gebiete fallen, einige Beobachtungen mitteilen, die wir beim Schweißen von Stahl gemacht haben. Sie beziehen sich auf die Stumpfschweißung starker Bleche, und Schweißungen dieser Art können im Stahlbau (z. B. Gurtplatten von Brücken) vorkommen.

Zunächst möchten wir den Fall einer aus zwei Blechen von 20 mm Dicke mit 60 kg/mm^2 Bruchlast bestehenden Fundamentplatte erwähnen. Sie war waagerecht gelagert und konnte im Laufe der Arbeiten nicht gewendet werden. Da wegen der großen Stärke eine X-Schweißnaht gewählt wurde, ergab sich die Notwendigkeit, den oberen Teil der Platte flach und die untere Hälfte über Kopf zu schweißen.

Die Arbeit wurde wie folgt durchgeführt. Die beiden zu verschweißenden Bleche wurden auf beiden Seiten unter einem Winkel von 60^0 abgeschrägt, dann unter Belassung eines 5 mm großen Luftspaltes zwischen vorstehenden Kanten parallel angeordnet.

Ein Kupferdraht von 10 mm Φ wurde in die untere Abschrägung gelegt und eine erste Schweißnaht flach aufgetragen. Die hierbei verwendete Elektrode hatte einen Durchmesser von 6,4 mm. Es war die im Obigen mit E_6 bezeichnete Type; sie ist stark umkleidet und dieser Umstand führte dazu, den negativen Pol mit dem Schweißstück zu verbinden, was eine Abweichung von unserer üblichen Praxis darstellt.

Nachdem die Naht 1 aufgetragen war, wurde sie von unten mit dem Meißel bearbeitet, um die auf die Berührung mit der Luft während des Auftragens zurückzuführenden Unregelmäßigkeiten und oberflächlichen Fehler zu beseitigen, die trotz des Vorhandenseins des Kupferdrahtes entstanden waren; dann wurde eine symmetrische Naht 2 auf der ganzen Länge des Stoßes aufgetragen, diesmal von unten, also über Kopf.

Die folgenden Nähte wurden dann von oben und von unten durch zwei Schweißer aufgetragen, die zu gleicher Zeit arbeiteten und ihr Vorrücken so abstimmten, daß sie sich stets auf derselben Senkrechten befanden.

Das Auftragen der Naht erfolgte durch Schwenken der Elektrode von rechts

nach links und von links nach rechts, so daß zur Achse des Stoßes senkrechte Striche statt paralleler Striche entstanden. Dadurch gelang es, den Einfluß des Schrumpfens beträchtlich herabzusetzen.

Die Kontrolle nach Ausführung wurde in doppelter Weise vorgenommen. An jedem Ende des Stoßes belassene Ansätze wurden in derselben Weise und zugleich mit der Naht verschweißt und darauf die üblichen Prüfstäbe entnommen:

Die mechanischen Versuche dieser Prüfstäbe ergaben folgendes:

$R = 61{,}5\ kg/mm^2$
Biegewinkel (ohne Rißbildung) 118^0 [1]
ρ (UF) = 7,6.

Andererseits wurde die Schweißstelle selber auf ihrer ganzen Länge mit Röntgenstrahlen geprüft, um örtliche Fehler aufzusuchen und gegebenenfalls zu beseitigen.

Der Apparat, den wir zu diesem Zweck benutzen, ist ein Philips-Fabrikat. Wir erreichen bei diesem Apparat eine Spannung von 180 kV zwischen Anode und Kathode und bei Dicken bis 90 mm gibt er noch zufriedenstellende Aufnahmen.

Wir geben das Bild einer Aufnahme wieder, die bei der Erforschung der fraglichen Platten gemacht wurde. Die weißen Kreise, die man auf diesem Bilde sieht, dienen als Anhalt um die Röntgenaufnahme auf die Platte zu übertragen und den Fehlerort wieder aufzufinden. Zu beachten ist, daß man zwei Röntgenaufnahmen in verschiedener Achsrichtung herstellen muß, um den Fehlerort im Raume zu bestimmen (Fig. 9).

Als zweites Beispiel möchten wir die Verschweißung, und zwar abermals Stumpfschweißung, von merklich dickeren Blechen als die vorigen aufführen. Diese Bleche hatten folgende Merkmale:

A = 49,6 R = 27,8 ρ (Mesnager) = 14

Die Blechdicke ging bis 55 mm. Solche Bleche dürften im Stahlbau kaum Verwendung finden, aber unsere Beobachtungen können bei etwas weniger dicken Blechen, z. B. von 25 bis 30 mm, von Wichtigkeit sein (Fig. 10).

Bevor mit der eigentlichen Ausführung angefangen wurde, sind Versuche mit Blechausschnitten von 600×300 mm, die stumpfgeschweißt wurden, vorgenommen worden.

Wegen der Blechstärke wurde das Profil der Abschrägung in Gestalt zweier U-Buchstaben mit gemeinsamer Grundlinie (siehe Fig. 7) gewählt. Es wurde dieselbe Elektrode wie im vorhergehenden Fall verwendet. Die Aufeinanderfolge der Arbeitsgänge, die Stromstärke und die Spannung wurden anfänglich gemäß folgender Tabelle eingestellt:

Durchmesser der Elektroden	Reihenfolge der Arbeitsgänge	T Amp.	V Volt
3,25	1	80	24—26
4	2, 3, 4, 5	180	24—26
5	6—17	230—240	20—24
6,4	18—29	320—350	20—24

[1] Der Versuch wurde abgebrochen, als die Dehnung der auf Zug beanspruchten Faser das im Pflichtenheft vorgesehene Minimum erreicht hatte.

Um den ersten Arbeitsgang durchzuführen, wurde in die untere Hälfte des Stoßes ein Streifen Tombak gelegt; die Schweißnähte wurden sämtlich flach aufgetragen, wobei das Werkstück so oft als nötig gewendet wurde. Zwischen Naht Nr. 3 und Naht Nr. 4 wurde Naht 1 abgemeißelt, um ihr die obere Schicht zu entfernen, die in Berührung mit der Luft trotz Vorhandenseins des Tombaks entstanden war, damit Naht Nr. 4 nur auf unbedingt gesunde Unterlage aufgetragen werde.

Trotz dieser Vorkehrung zeigten mechanische Versuche, die an Prüfkörpern durchgeführt wurden, welche teilweise an der Oberfläche der Naht, teilweise in der Mitte (wobei letztere also den Arbeitsgang Nr. 1 enthielten) entnommen worden waren, beträchtlichen Unterschied in der Dehnbarkeit zwischen Oberfläche und Mitte der Schweißstelle, was dazu Anlaß gab, ein etwas anderes Verfahren anzunehmen.

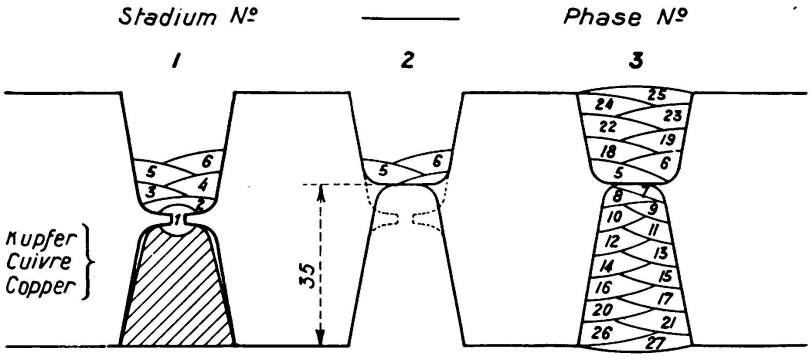


Fig. 7.

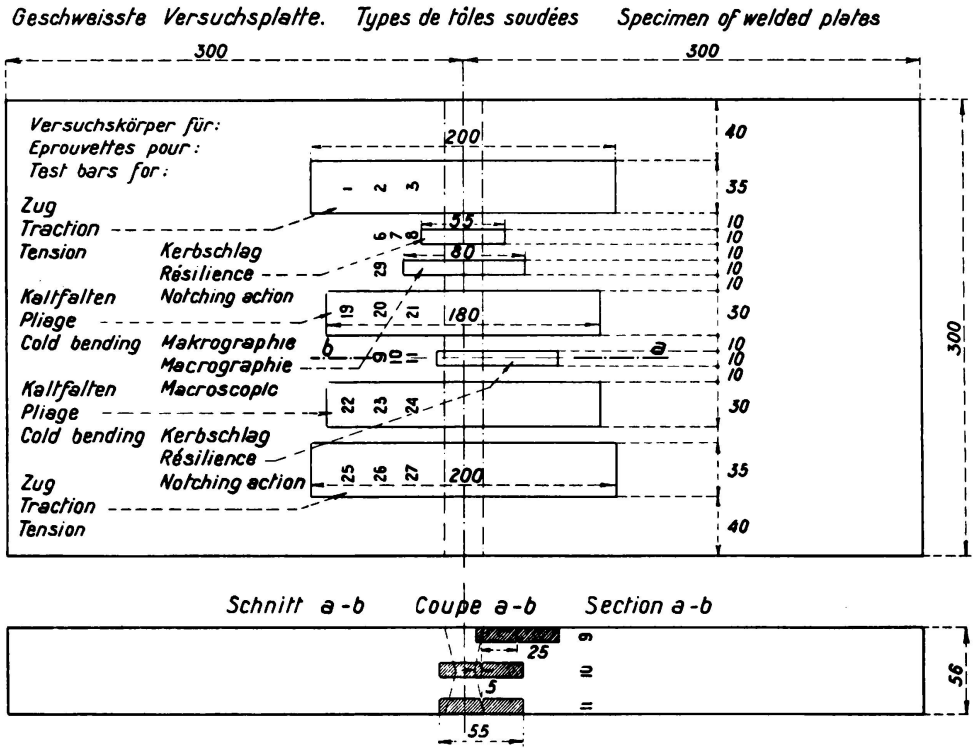


Fig. 8.

Es wurden ohne vorheriges Abmeißeln die Arbeitsgänge 1 bis einschl. 6 durchgeführt, dann wurde alles Metall von den Arbeitsgängen 1 bis 4 entfernt (einschl. des Werkstoffes in der Nähe des eingeschnürten Teiles, wie Fig. 7 zeigt) und schließlich wurden die Arbeitsgänge 7 und folgende ausgeführt.

Das Werkstück wurde dann bei 640° geglüht, und zwar während 2 Stunden und 17 Min. (1 Stunde pro 25 mm Dicke).

Dann wurden Prüfstäbe für Zug- und Kerbschlagversuche, die einen an der Oberfläche des Werkstückes, die anderen in der Mitte der Dicke, entnommen; Fig. 8 zeigt die Verteilung der einzelnen Prüfkörper.

Wie die nachstehende Tabelle zeigt, ergab diese Methode ganz zufriedenstellende Ergebnisse:

Zug						Biegung			Kerbschlag		
Reihe	Abm. der Prüfst.	Querschnitt	Bruchlast			Reihe	Biegungswinkel	A % äuß. Faser auf 20 mm²	Reihe	ρ (Mesnager)	Mittelwert
		mm²	Gesamt	kg/mm²	Mittelwert						
1	19.8×13.6	270	12 800	47.4					7 F_1	15.4	
									7 F_2	12.4	14.4
3	18.6×13.6	254	12 100	47.6		20	130°	38	7 F_3	15.4	
					47.9						
25	19.5×13.6	266	12 800	48.1		23	107°	36	7 F_4	14	
									7 F_5	14	14
27	19.8×13.7	272	13 300	48.8					7 F_6	14	

Die Röntgenaufnahme zeigte keinen nennenswerten Fehler; wir lassen eine Wiedergabe einer bei diesen Versuchen hergestellten Röntgenaufnahme folgen.

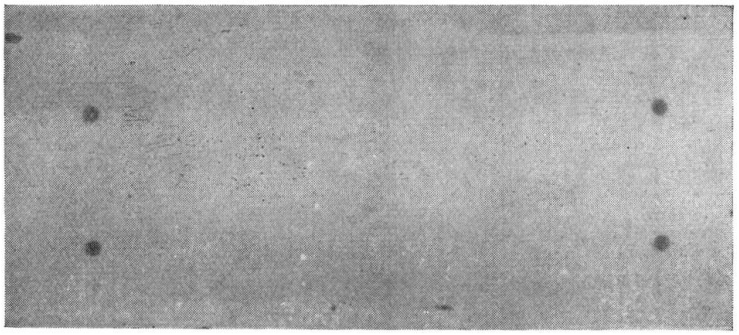


Fig. 9.

Röntgenaufnahme einer Stumpfschweißung zwischen zwei Blechen von 20 mm.

Fig. 10.

Röntgenaufnahme einer Stumpfschweißung zwischen zwei Blechen von 55 mm. Die Schweißstelle liegt in allen Fällen zwischen den langen Seiten des von den vier schwarzen Punkten bestimmten Rechteckes. Das Kontrollzeichen des Bureau Veritas erscheint unten links in der zweiten Röntgenaufnahme. Die verschiedene Färbung der beiden Röntgenaufnahmen ist aus der verschiedenen Dicke zu erklären.

Schlußfolgerungen.

Die bei der Verwendung der Lichtbogenschweißung für die verschiedenartigsten Arbeiten gewonnene Erfahrung ermächtigt zur Feststellung, daß diese Art der Verbindung bei guter Organisation der Kontrolle der Werkstoffe und bei deren guter Verarbeitung eine ebenso gute Sicherheit bietet wie die anderen Konstruktionsmethoden, wie etwa Nietung oder Eisenbeton. Ein Vorbehalt ist indessen geboten. Die Versuche, die wir bisher durchgeführt haben, sind entweder statische oder Stoßversuche. Sie hätten durch Dauerversuche unter veränderlicher Belastung ergänzt werden müssen. Wenn wir auch unserem Laboratorium einen Amslerschen Pulsator-Apparat, der solche Versuche durchzuführen ermöglicht, hinzugefügt haben, so haben wir die fraglichen Versuche bisher nur in beschränkter Anzahl ausgeführt.

Radiographische Untersuchungen können bis zu einem gewissen Grade die fehlenden Ermüdungsprüfungen ersetzen, denn sie zeigen örtliche Fehler wie Blasen oder Einschlüsse auf, die nur geringen Einfluß auf die Festigkeit bei statischen Versuchen ausüben, aber bei wechselnder Belastung zu vorzeitigem Bruch führen würden. Sie sind also überall zu empfehlen, wo sie praktisch möglich sind. Aber es wäre schwer, ihre Anwendung zu verallgemeinern, wenigstens bei Stahlkonstruktionen. Der Apparat, mit dem sie ausgeführt werden, ist verhältnismäßig schwer und umfangreich. Vorkehrungen sind zu treffen, um das Personal gegen die Sekundärstrahlen zu schützen. Schließlich, und vor allem, sind die Röntgenaufnahmen von Werkstücken merklich verschiedener Dicke ziemlich undeutlich, eben wegen des Vorhandenseins der Sekundärstrahlen. Eine Röntgenaufnahme von Kreuznahtverbindungen ist also beinahe unmöglich. Man kann dies zwar mittels der γ-Strahlen erreichen, aber die hohen Anschaffungskosten der Apparatur und die Gefahren dieser Strahlen für das Personal machen sie in der nicht spezialisierten Industrie unverwendbar.

Wir haben geglaubt, in diesem Bericht die übrigens wenig zahlreichen Versuche, die wir über das Schrumpfen angestellt haben, nicht streifen zu sollen. Sie hatten auch nicht den Zweck, die auf das Schrumpfen zurückzuführenden Restspannungen zu bestimmen, sondern lediglich die Änderungen der Abmessungen und der Form bei den Bauteilen eines Schiffsgerüstes, sowie die zu befolgende Methode zu deren Beseitigung im voraus. Daher haben wir uns damit begnügt, die Gesamt-Formänderungen zu erwähnen, die nach vollständiger Erkaltung auftreten, was allerdings nicht ermöglicht, die Restspannungen mit Sicherheit abzuschätzen.

Zusammenfassung.

In einer Schweißwerkstätte kann man zum vornherein eine Kontrollorganisation schaffen, welche jede Sicherheit bietet. Diese Kontrolle kann in Sonderfällen durch Röntgenaufnahmen ergänzt werden. Es scheint jedoch, daß die Verwendung der Röntgenstrahlen nicht verallgemeinert werden kann.

IIIc 3

Prüfung der Schweißnähte.

Contrôle des soudures.

Testing of Welds.

R. Berthold,
Leiter der Röntgenstelle beim Staatlichen Materialprüfungsamt, Berlin-Dahlem.

Zwei Erscheinungen kennzeichnen die Weiterentwicklung der Prüfung von Schweißnähten seit dem 1. Internationalen Kongreß der IVBH.:

Die Anwendung von Dauerfestigkeitsversuchen und die Einführung der zerstörungsfreien Prüfverfahren, insbesondere der Röntgendurchstrahlung. Beide Erscheinungen stehen miteinander in ursächlichem Zusammenhang.

A. Die Dauerfestigkeitsversuche.

Während für die statischen Prüfungen (Zugversuch, Faltversuch, Kerbschlagversuch) heute in vielen Ländern, u. a. in Deutschland, Richtlinien und Normen bestehen, die sich mit der Frage der Form und Abmessungen der Prüfstäbe und der Versuchseinrichtungen befassen, fehlen diese Festlegungen noch weitgehend für Dauerfestigkeitsversuche. In Deutschland besteht nur die DIN 4001, in der einerseits die Begriffbestimmungen für die Dauerfestigkeitsprüfung genormt sind, andererseits als Schwingfestigkeit für Stahl diejenige Grenzspannung festgelegt ist, bei der der Prüfstab eben noch 2 Millionen Lastperioden aushält.

Darüber hinaus bestehen noch die Vorschriften der Deutschen Reichsbahngesellschaft für geschweißte vollwandige Brücken, in denen für Stahl 37 und Stahl 52 bestimmte Schwingfestigkeitswerte für Prüfstäbe bestimmter Abmessungen und Formen in bearbeitetem und unbearbeitetem Zustand, sowie für Quer- und Längsnähte vorgeschrieben sind. Beispielsweise werden für unbearbeitete Quernähte aus Stahl 37 bzw. 52 Schwingfestigkeitswerte von 15 bzw. 16 kg/mm², für bearbeitete Nähte Schwingfestigkeitswerte von 18 bzw. 19 kg/mm² vorgeschrieben. Ob diese Reichsbahnvorschriften zur allgemeinen DIN-Vorschrift werden, steht noch dahin.

Alle weiteren Prüfvorschriften über Dauerbeanspruchung sind noch in Bearbeitung.

Bei der Durchführung der Dauerfestigkeitsversuche hat sich gezeigt, daß aus den an Probeschweißungen bei statischer Beanspruchung gewonnenen Festigkeitswerten keine Rückschlüsse auf die Dauerfestigkeit dieser Proben, geschweige denn der Bauwerke gezogen werden können. So sagt *Thum* in den noch ununveröffentlichten „Richtlinien für die konstruktive Durchbildung geschweißter Maschinenteile", daß hohe Zerreißfestigkeit, Dehnung und Kerbzähigkeit keine

Gewähr für hohe Dauerhaltbarkeit bieten, weil im Falle der Dauerschwingbelastung der Werkstoff anders als im Falle gleichbleibender Belastung beansprucht wird. An anderer Stelle weist *Bierett* [1] [1] darauf hin, daß die Kerbverhältnisse viel wesentlicher für die Dauerfestigkeit der Schweißverbindung sind als die Güteeigenschaften des Schweißgutes.

Es ergab sich also übereinstimmend, daß im Falle der Dauerschwingbeanspruchung immer dort ein Bruch ansetzen wird, wo die größte Kraftliniendichte vorhanden ist. Das heißt, daß die für statische Beanspruchungen nicht so sehr wichtigen Einflüsse von Schlackenzeilen, Wurzelfehlern, Bindefehlern, Einbrandkerben, Wulstübergängen, Poren usw. neben der Formgebung der Nahtverbindungen nunmehr die ausschlaggebende Rolle für die Dauerhaltbarkeit einer Schweißverbindung spielen.

Mit dieser Erkenntnis entstand aber das dringende Bedürfnis nach einer Prüfung, die den Zustand der Schweißnaht am fertigen Bauwerk ermitteln läßt, wie sie ausschließlich auf zerstörungsfreiem Wege ermöglicht wird.

In der Röntgendurchstrahlung, die seit etwa 1923 auch für die technischen Anwendungsgebiete entwickelt wurde, konnte der Schweißtechnik ein grundsätzlich geeignetes zerstörungsfreies Verfahren zur Verfügung gestellt werden.

B. Die Röntgenprüfung von Schweißnähten.

1. *Allgemeine Grundlagen.*

Die allgemeine Grundlagen der Röntgendurchstrahlung sind im Schrifttum mehrfach beschrieben worden [2] und werden daher als bekannt vorausgesetzt.

2. *Die Leuchtschirm-Prüfung.*

Der neuzeitliche Leuchtschirm besteht aus einer Zinksulfid-Schicht, die je nach der Intensität der auffallenden Röntgenstrahlen mehr oder weniger hell aufleuchtet. Der dadurch gegebenen Untersuchungsmöglichkeit mit dem Leuchtschirm sind frühzeitige Grenzen gesetzt [3], weil die erreichbaren Leuchthelligkeiten und die Bildschärfe nicht ausreichen, um kleine Helligkeitsunterschiede erkennen zu lassen. So müssen beispielsweise Poren bei 10 mm Stahldicke mindestens 0,6 mm Durchmesser haben, um eben noch erkennbar zu sein. Vollends unsicher ist der Nachweis feiner Risse oder Bindefehler, so daß die Leuchtschirm-Prüfung nur geeignet ist, um beim Anlernen von Schweißern die ausgeführten Arbeiten rasch zu überprüfen und grobe Fehler sofort nach Herstellen der Schweiße sichtbar zu machen.

3. *Röntgenaufnahmen auf Röntgenfilm mit und ohne Verstärkerschirm.*

Die besten Untersuchungsmöglichkeiten bietet der doppelt begossene Röntgenfilm mit und ohne Verstärkerschirm. Verstärkerschirme bestehen aus Kalzium-Wolframat-Schichten, die beiderseits an den Röntgenfilm angepreßt werden und unter der Einwirkung der Röntgenstrahlen schwach aufleuchten.

Die Anwendung der Verstärkerfolien erlaubt, die Belichtungszeiten sehr wesentlich zu verkürzen; doch tritt gleichzeitig eine Verschlechterung der Bildschärfe ein, die bei kleinen Werkstoffdicken die Bildgüte merklich herabsetzt. Unter-

[1] s. Schrifttumverzeichnis.

suchungen über den Einfluß von Verstärkerschirmen [4] auf die Fehlererkennbarkeit haben zu der Ermittlung zweckmäßiger Betriebsdaten geführt, die in Fig. 1 wiedergegeben sind. Es ergibt sich daraus, daß man zum Erzielen höchster Fehlererkennbarkeit bis höchstens 10 mm Stahldicke *ohne* Schirm, von hier bis etwa 35 mm Dicke mit scharf zeichnenden Schirmen geringer Verstärkerwirkung, darüber hinaus mit unscharf zeichnenden Schirmen hoher Verstärkerwirkung arbeiten soll.

Die in Fig. 1 angegebene Fehlererkennbarkeit, gemessen an Drähten, die röhrennah auf das Stahlblech aufgelegt und mitphotographiert wurden, erreicht man nicht beim Nachweis von Rißbildungen. Hier tritt als Folge des räumlich ausgedehnten Brennflecks der Röntgenröhre eine Überstrahlung der Fehlstelle ein,

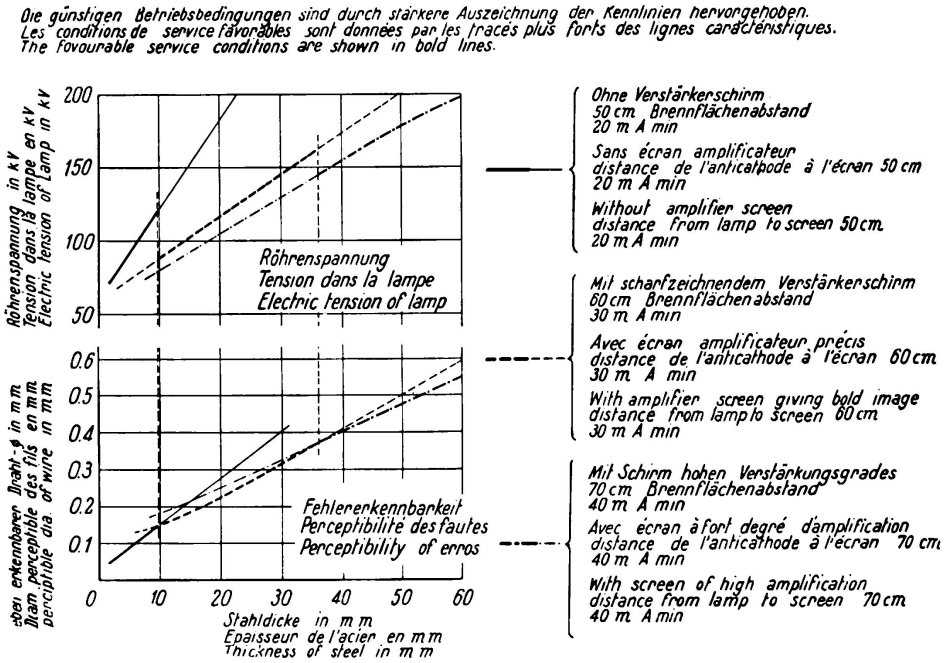


Fig. 1.

Zweckmäßige Betriebsdaten für die Röntgendurchstrahlung von Stahl.

die zum Auftreten von Halbschattengebieten und damit zu einer Verringerung der Schwärzungskontraste auf dem Film führt. Dadurch wird dem Nachweis feiner Rißbildungen eine Grenze gesetzt; insbesondere aber wird ihr Nachweis in Frage gestellt, wenn die Röntgenstrahlen den Riß nicht in Richtung seiner Tiefenausdehnung durchdringen. Tafel 1 zeigt den Einfluß des Winkels zwischen Röntgenstrahlen und Rißrichtung auf die eben erkennbare Rißbreite:

Tafel 1.

Kleinste röntgenographisch nachweisbare Rißbreite in Abhängigkeit vom Winkel zwischen Riß- und Strahlenrichtung (40 mm Stahl; 6 mm Rißhöhe).

Winkel-°	5	8	10	15	20	30	60	90
Rißbreite mm . .	0,03	0,06	0,09	0,13	0,16	0,21	0,32	0,40

Eine gewisse Schwierigkeit bietet auch die Untersuchung von Kehlnähten, wegen der in der Durchstrahlungsrichtung wechselnden Wanddicke; diese Schwierigkeit wird dadurch behoben, daß man der Kehlnaht einen Zinnkeil anlegt, dessen wechselnde Dicke der des zu durchstrahlenden Querschnitts entgegenwirkt [5].

4. *Normung.*

Zu dem Zeitpunkt, da die Röntgenprüfung nicht mehr die Angelegenheit wissenschaftlicher Institute, sondern der Werkstätten wurde, war es notwendig, *Richtlinien für die Schweißnahtprüfung mit Röntgenstrahlen* herauszugeben (DIN 1914, aufgestellt vom Deutschen Verband für Materialprüfungen der Technik und vom Fachausschuß für Schweißtechnik im VDI.). Ihr Zweck ist, einheitlich beurteilbare Durchstrahlungsbilder gleichmäßiger Güte bei allen röntgenographisch arbeitenden Stellen zu erzielen, um dadurch die Grundlage für ein geordnetes Abnahmewesen zu schaffen. Darum ist u. a. vorgeschrieben, daß ein Prüfkörper, bestehend aus Drähten verschiedenen Durchmessers, auf die Schweißnaht aufgelegt und mitbelichtet wird. In Abhängigkeit von der Blechdicke wird die Erkennbarkeit bestimmter Drahtdurchmesser verlangt. Tafel 2 gibt eine Zusammenstellung der in Deutschland gebräuchlichen Prüfkörper; Fig. 2 zeigt das Röntgenbild eines solchen Prüfkörpers.

Tafel 2.

Die Drahtstege nach DIN 1914 zur Überwachung der Bildgüte von Röntgen-Aufnahmen. (Die einzelnen Drahtstege aus je sieben Drähten sind zwischen Gummi gepreßt.)

Werkstoff des Prüfkörpers	Dicke des Prüfkörpers in mm	Werkstoff und Bezeichnung des Drahtsteges	Durchmesser der Drähte in mm	Kennzeichnung der Stege: Bleikugeln unter den Drähten	Farbe der Gummihülle
Leichtmetalle	0 bis 50	Al I	0,1/0,2/0,3 . . 0,7	• •	grau
	50 „ 100	Al II	0,8/1,0/1,2 . . 2,0	• ••	
	100 „ 150	Al III	1,5/2,0/2,5 . . 4,5	• •••	
Eisenlegierungen	0 bis 50	Fe I	0,1/0,2/0,3 . . 0,7	•• •	schwarz
	50 „ 100	Fe II	0,8/1,0/1,2 . . 2,0	•• ••	
	100 „ 150	Fe III	1,5/2,0/2,5 . . 4,5	•• •••	
Kupferlegierungen	0 bis 50	Cu I	0,1/0,2/0,3 . . 0,7	••• •	rot
	50 „ 100	Cu II	0,8/1,0/1,2 . . 2,0	••• ••	
	100 „ 150	Cu III	1,5/2,0/2,5 . . 4,5	••• •••	

Von der Übernahme der im amerikanischen Boyler-Code vorgeschriebenen Testkörper, bestehend aus einer Stahlplatte mit verschieden tiefen Nuten oder einer Filtertreppe mit Bohrungen, die neben die Schweißraupe gelegt werden, wurde Abstand genommen, weil sie nicht die Beurteilung der Fehlererkennbarkeit im Gebiet der Schweißraupe selbst zulassen.

Die deutschen Richtlinien geben noch eine Reihe von Anleitungen über Strahlenrichtung, Aufnahmeanordnung und Hilfsmittel bei der Prüfung verschiedener Schweißnahtprofile.

Im Anschluß an die Bearbeitung dieser Richtlinien wurden vom Deutschen Verband für die Materialprüfungen der Technik zusammen mit der Deutschen Röntgengesellschaft *neue Abmessungen für Röntgenfilme* genormt. Da die bisher allein üblichen Maße, ausgehend von den Bedürfnissen der ärztlichen Untersuchung, für Schweißnahtprüfungen ungeeignet sind, mußte sich jeder Anwender zunächst selbst geeignete Größen zurechtschneiden. Jetzt sind auf Grund der Vereinbarungen zwischen den Anwendern des Verfahrens und den Herstellern von Filmen, Verstärkerfolien und Kassetten die Filmgrößen 6 cm × 24 cm, 6 cm × 48 cm, 6 cm × 72 cm und 10 cm × 24 cm, 10 cm × 48 cm, 10 cm × 72 cm im Handel erhältlich.

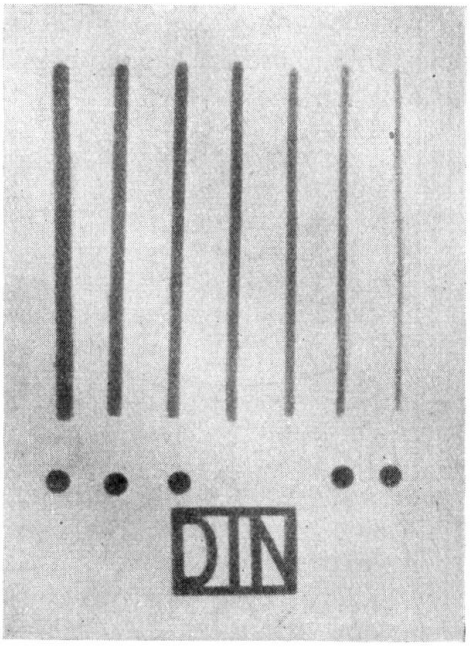


Fig. 2.
Röntgenbild (Positiv-Abzug) des Drahtsteges Cu II.

Vorschriften über die Ausführung der Röntgenanlagen unter dem Gesichtspunkt des Hochspannungsstrahlenschutzes wurden schon in den Jahren 1929 und 1930 in Deutschland aufgestellt (Din Rönt. 5 und 6) [6].

5. *Technische Hilfsmittel.*

Die Anwendung des Röntgenverfahrens an großen Brücken- oder Hallenträgern im Herstellerwerk, noch mehr aber seine Anwendung auf den Baustellen selbst, beeinflußte maßgeblich die Art und Gestaltung der technischen Hilfsmittel.

Kennzeichnend für neuzeitliche werkstattgerechte Röntgeneinrichtungen sind:

a) Sicherheit gegen das Berühren hochspannungführender Teile,
b) Strahlenschutz,
c) Beweglichkeit des Röntgenröhrenbehälters und
d) Tragbarkeit der Einzelteile.

Die Erfüllung dieser Forderungen wurde schließlich in weitgehender Übereinstimmung verschiedener Herstellerwerke durch folgende Maßnahmen gelöst:

a) Alle hochspannungführenden Teile sind von geerdeten, metallischen Leitern umgeben.

b) Zur Verwendung gelangen ausschließlich sogenannte „Strahlenschutzröhren", bei denen nur ein verhältnismäßig eng begrenztes Strahlenbündel, das sogenannte „Nutzstrahlenbündel", austreten kann (vgl. Fig. 3). Alle übrigen, vom Brennfleck allseitig ausgehenden Strahlen werden durch dickwandige Metallteile abgeschirmt.

c) Zwischen den Hochspannungserzeugern und der Röntgenröhre befinden sich bewegliche Hochspannungskabel von etwa 10 m Länge, so daß die Röhre weitgehend unabhängig vom Apparat bewegt und in Stellung gebracht werden kann.

d) Um die Anlagen tragbar zu machen, wurde schon im Jahre 1932 der Hochspannungserzeuger in zwei symmetrische Hälften aufgeteilt, so daß jeder Einzelteil einer 200 kW-Anlage das Gewicht von 90 kg nicht überschreitet. Zur weiteren Gewichtsverringerung sind gelegentlich die notwendigen Kondensatoren der Anlage im Hochspannungskabel selbst untergebracht, (Siemens & Halske-AG.).

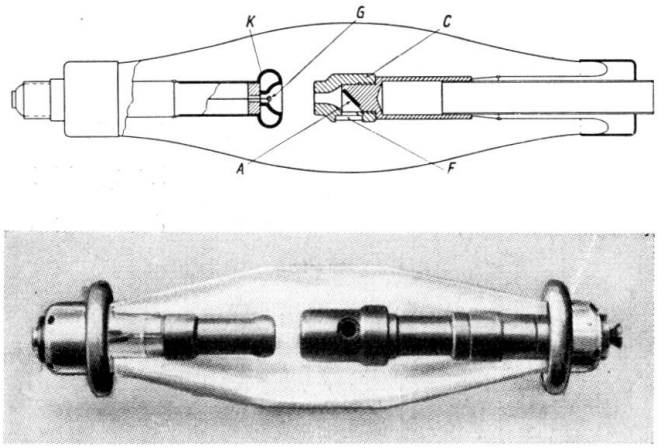


Fig. 3.

Schnittzeichnung (a) und Ansicht (b) einer Strahlenröntgenröhre für 200 kW Betriebsspannung unter Öl.

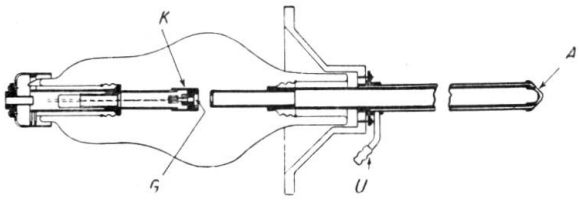
A) Anodenplatte aus Wolfram.
F) Strahlenaustrittsfenster aus Beryllium.
C) Kupfer-Wolframklotz
G) Glühdraht
K) Kathodenbecher.

Die beschriebenen Maßnahmen führten in Deutschland zum Bau von Röntgenanlagen, deren Brauchbarkeit in den Werkstätten und auf den Baustellen durch nunmehr dreijährige Erfahrung erwiesen ist.[2]

Im besonderen wurde noch der Röntgenröhrenbau durch die Bedürfnisse der Praxis beeinflußt. Man baute verhältnismäßig kurze Röntgenröhren für 200 und 250 kW zum Betrieb unter Öl, um Isolationslänge und damit Gewicht zu sparen

[2] Hersteller technischer Röntgeneinrichtungen in Deutschland:
C. H. F. Müller-AG., Hamburg,
Koch & Sterzel-AG., Dresden,
R. Seifert & Co., Hamburg,
Siemens & Halske-AG., Berlin.

(siehe Fig. 3). Da aber auch diese Röntgenröhren noch nicht immer eine wirtschaftliche Untersuchung ermöglichten (insbesondere im Fall von Rundschweißungen an Rohren oder Behältern), so wurde neuerdings eine Hohlanoden-Röhre entwickelt (Siemens & Halske AG.), bei der die Elektronen durch einen engen Kanal, zusammengehalten durch eine Sammelspule, bis zur kegelförmig ausgebildeten Anode gelangen. Dort werden sie im Innern des Rohres abgebremst; die dabei entstehenden Röntgenstrahlen treten durch die Rohrwandung hindurch allseitig aus. Damit hat man weitere bequeme Untersuchungsmöglichkeiten für die Schweißnahtprüfung (siehe Fig. 4).



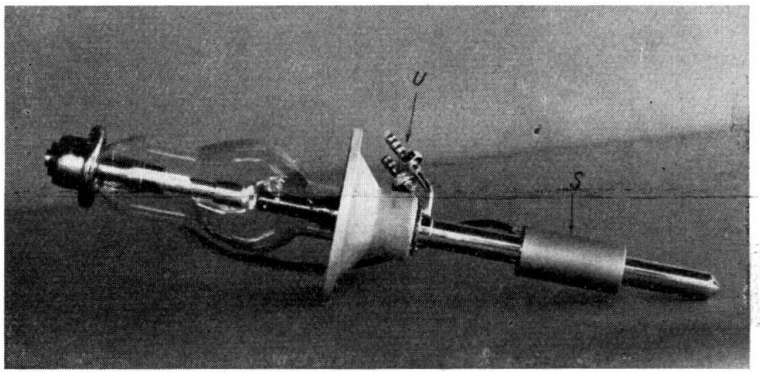


Fig. 4.

Schnittzeichnung und Ansicht einer Hohlanodenröhre für Werkstoff-Prüfung.

A) Anode aus platiniertem Kupfer.
G) Glühdraht.
K) Kathodentopf.
S) Sammelspule.
U) Umlaufkühlung.

Die Anwendung des Röntgenverfahrens auf Baustellen erforderte auch neue Filmkassetten und Halterungen. Nach einem Vorschlag der „Röntgenstelle" werden heute evakuierbare Gummikassetten in der Schweißnahtprüfung benutzt; sie bestehen aus Gummischläuchen, die nach dem Einbringen der Verstärkerfolien und Filme abgeklemmt und mit einer Luftpumpe evakuiert werden. Der äußere Luftdruck preßt die Verstärkerfolien überall gleichmäßig gegen den Film; die Kassette bleibt dabei nach jeder Richtung biegsam.

Das Befestigen dieser leichten Kassetten am Aufnahmeort geschieht mit Hilfe von Permanentmagneten aus einer Eisen-Aluminium-Legierung.

6. *Lesen und Beurteilen von Röntgenfilmen.*

Erfahrungsgemäß bietet das Lesen von Röntgenfilmen größere Schwierigkeiten als ihre Herstellung.

Die Mannigfaltigkeit der Einflüsse von Art und Führung der Elektroden, von den Blechabschrägungen und der Strahlenrichtung auf das Röntgenbild lassen seine Deutung oft nur durch Vergleich vieler Aufnahmen von ein- und demselben Bauwerk, — gelegentlich unter Zuhilfenahme von Schliffbildern, — zu. Einige kennzeichnende Beispiele aus den von der „Röntgenstelle" durchgeführten praktischen Untersuchungen an Hoch- und Brückenbauten zeigen die Fig. 5, 6, 7 und 8. Eine Zusammenstellung kennzeichnender Fehler an V-, X- und Kehlnähten findet sich in der Zeitschrift „Der Stahlbau" [7].

Die größten Schwierigkeiten jedoch bereitet die Beurteilung der röntgenographisch aufgefundenen Fehler hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Festigkeitseigenschaften der Schweißverbindungen. Untersuchungen über diesen Zusammenhang wurden an verschiedenen Stellen vorgenommen [8, 9]. — Aus den

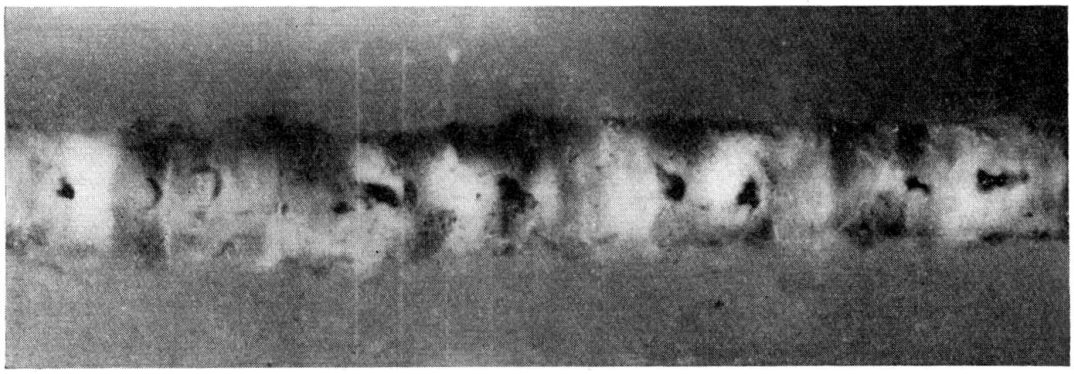


Fig. 5.
Elektrisch geschweißte X-Naht (Senkrechtschweißung) mit groben Schlacken.

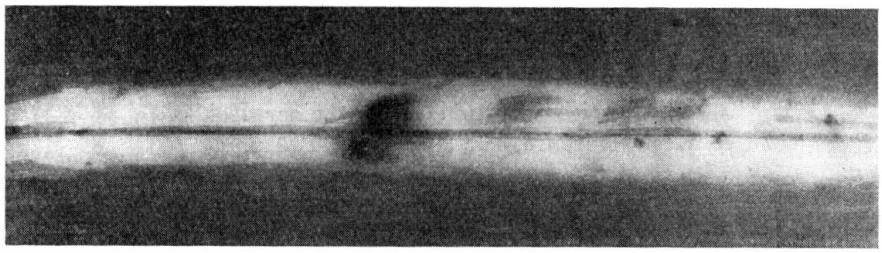


Fig. 6.
Elektrisch geschweißte X-Naht (Stegblech) in einem geschweißten Stahlüberbau mit nicht-durchgeschweißter Wurzel.

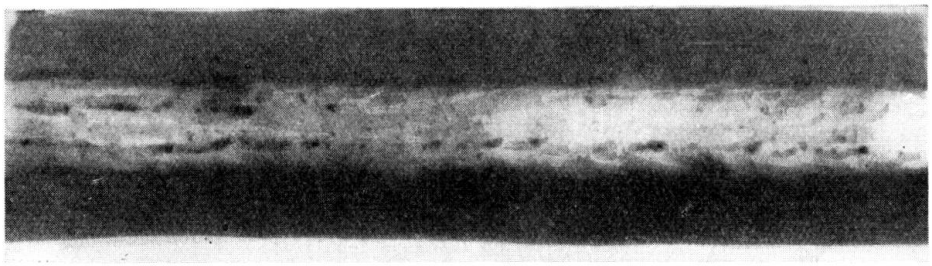


Fig. 7.
Elektrisch geschweißte X-Naht (Stegblech) in einem geschweißten Stahlüberbau mit Schlackenzellen.

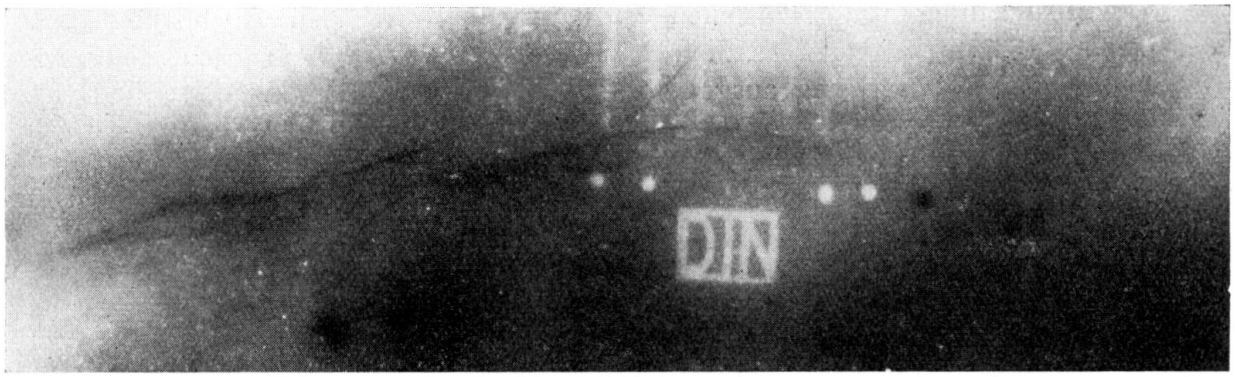


Fig. 8.

Elektrisch geschweißte Kehlnaht (Gurtplattenstoß) mit Riß als Folge von Wärmespannungen.

in der „Röntgenstelle" vorgenommenen Untersuchungen zeigt Fig. 9 einige kennzeichnende Beispiele. Aus diesen und allen anderen bisher gemachten Untersuchungen kommt man zu folgendem Ergebnis:

Bindefehler, Risse, Schlackenzeilen und grobe Wurzelfehler vermindern die Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen in beträchtlichem Maße. Dagegen haben kleine und mittelgroße, regellos verteilte Poren keinen, oder nur geringen Einfluß auf die Dauerfestigkeit, wenn nicht die Poren perlschnurartig aneinandergereiht sind.

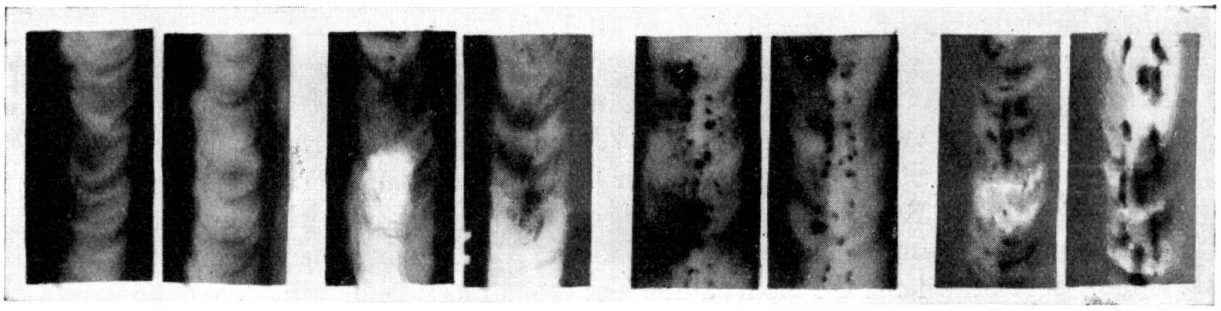


Fig. 9.

Verschiedenartige Schweißverbindungen im Röntgenbild und ihre Dauerfestigkeit.

7. *Anwendungsbereich der Röntgenprüfung.*

Die Röntgenprüfung an Schweißnähten wird gemäß einer Reichsbahnvorschrift vom 27. Januar 1936 an allen Stumpfstößen erster Ordnung, sowie neuerdings an einem Teil der Halsnähte von Profilträgern und einem Teil der Kehlnähte an Querausstеifungen verlangt. Das gilt sowohl für Straßen- wie für Eisenbahnbrücken. Zur Zeit werden als Folge dieser Vorschrift täglich etwa 300 m Schweißnahtlänge in Deutschland röntgenographisch aufgenommen.

Im Falle der Hochbauten besteht keine Vorschrift hinsichtlich der Röntgenprüfung. Meist handelt es sich dabei ja um rein statische Beanspruchungen. Trotzdem werden heute schon wichtige Fabrikbauwerke (geschweißte Hallenträger, Unterbauten für Druckbehälter und dergleichen) in den Schweißnähten geröntget.

Die Beurteilung von Fehlstellen ist naturgemäß bei den Hochbauten mit statischer Belastung eine wesentlich mildere als bei Eisenbahnbrücken, die einer Schwingungsbeanspruchung ausgesetzt sind.

8. *Organisation der Röntgenprüfung in Deutschland.*

Die im Abschnitt 6 beschriebenen Versuche über den Zusammenhang zwischen Röntgenbefund und den Festigkeitseigenschaften einer Naht reichen bei weitem nicht aus, um einen Generalschlüssel für die unendlich verschiedenartigen Fälle zu liefern, die zur Beurteilung kommen; denn diese Verschiedenheit erstreckt sich nicht nur auf Lage, Ort, Größe und Form der Fehler, sowie auf Art des Werkstoffes und der Elektrode, sondern auch auf Art, Größe und Richtung der Beanspruchung. Fehler solcher Verschiedenheiten künstlich zu erzeugen, um daran systematisch Vergleiche anzustellen, ist praktisch unmöglich. Darum kann es vorläufig keine Anweisung zur Beurteilung von Röntgenaufnahmen geben, deren starres Befolgen Fehlurteile ausschließt.

Hier beginnt die Schwierigkeit, aber auch der Reiz der zerstörungsfreien Verfahren, die nur mittelbare Auskünfte über die Auswirkung der mit ihrer Hilfe festgestellten Fehler geben können: Sie bedürfen zu ihrer letzten Beherrschung einer auf Erfahrung gegründeten Intuition, — ähnlich der medizinischen Diagnostik, — worüber weder Lehrbücher noch Bildersammlungen hinwegtäuschen können. Dies mag dem rechnungsgewohnten Ingenieur unsympathisch sein, der sich nur ungern daran erinnert, daß seine exakten Rechnungen auf *Annahmen* über Werkstoffeigenschaften, Spannungsverteilungen und Spannungsgrößen beruhen, die auch nicht besser begründet sind.

Um bei dieser Sachlage das Röntgenverfahren der Allgemeinheit ohne Gefährdung der technischen Entwicklung nutzbar zu machen, ist man in Deutschland einen neuen Weg gegangen: Auf Veranlassung des Herrn Generalinspektors für das deutsche Straßenwesen und der Reichsbahn-Hauptverwaltung gehen zur Zeit fast alle Röntgenaufnahmen an geschweißten Stahlüberbauten nach ihrer vorläufigen Beurteilung durch den zuständigen Abnahmebeamten an die „Röntgenstelle". Dort unterliegt die Beurteilung des Abnahmebeamten einer Nachkontrolle, deren Ergebnis an ihn zurückgeht. Die Stellungnahme der „Röntgenstelle" bezieht sich dabei sowohl auf die Güte der Aufnahmen und ihre Beurteilung durch den Abnahmebeamten, als auch im Bedarfsfalle auf die Ursache von Schweißfehlern und die Möglichkeit ihrer Abhilfe. Damit wird zunächst eine einheitliche Beurteilung aller Schweißnähte an Stahlüberbauten in Deutschland und eine Erziehung der Abnahmebeamten zu einer mit der „Röntgenstelle" gleichartigen Beurteilung erreicht; ferner werden Fehler rasch ausgeschieden, wenn sie schon einmal in irgendeinem anderen Werk aufgetreten und überwunden waren. Endlich hat sich die ständige Überwachung der Schweißer erzieherisch ausgewirkt.

Natürlich dürfen die Arbeiten in den Werkstätten und auf den Baustellen keine langen Aufschübe erleiden. Deshalb können in eindeutigen Fällen die Abnahmebeamten oder die Beauftragten der „Röntgenstelle" Entscheidungen über Zulassen oder Ausbessern von Schweißungen an Ort und Stelle gemeinsam treffen; nur in zweifelhaften Fällen muß die Entscheidung der „Röntgenstelle" eingeholt werden, die ihrerseits einen Statiker des Staatlichen Materialprüfungsamtes, Berlin-Dahlem, heranzieht.

Zur Bewältigung dieser Aufgabe ist die „Röntgenstelle" mit mehreren, an verschiedenen Orten des Reiches stationierten, fahrbaren Röntgenlaboratorien ausgerüstet. — Die Erfahrungen all dieser Stellen schaffen einen umfassenden Erfahrungsgrundstock für die Beurteilung von Röntgenfilmen.

Fig. 10 zeigt eine der fahrbaren Röntgenstationen und ihre Anwendung auf der Baustelle.

Die mit dieser Organisation erzielten Erfolge können u. a. daran ermessen werden, daß es binnen drei Monaten gelang, die ursprünglichen Beanstandungen an Schweißverbindungen von Stahlüberbauten um mehr als eine Größenordnung herabzudrücken.

Fig. 10.
Röntgenprüfung eines geschweißten Stahlüberbaues.

C. Magnetprüfung von Schweißverbindungen.

Die Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung, die auf der Störung magnetischer Felder durch Fehlstellen und auf ihrem Nachweis durch Schwingspulen oder durch Magnetpulver beruhen, sind heute noch nicht genügend verbreitet und erprobt, um sie kritisch behandeln zu können. Es besteht die Aussicht, daß das „magnetische Abtastverfahren" (IG-Schweißnahtprüfer der AEG.) für autogen geschweißte Verbindungen bis höchstens 20 mm Dicke brauchbar wird. Ebenso wird das Magnetpulver-Verfahren für dünnwandige Autogenschweißungen, wie sie aber mehr im Flugzeugbau als im Brücken- und Hochbau vorkommen, sich einführen. Ob das Magnetpulver-Verfahren darüber hinaus im Brücken- und Hochbau noch Bedeutung gewinnen wird, wird sich in Kürze entscheiden.

Schrifttumsverzeichnis:

(1) *G. Bierett:* Z. „Maschinenbau", 13. H. 15/16, August 1934, S. 87.
(2) *R. Berthold:* Grundlagen der technischen Röntgendurchstrahlung. Leipz. 1930.
(3) *R. Berthold, N. Riehl u. O. Vaupel:* Z. „Metallkunde", 1935, S. 63.
(4) *R. Berthold, M. Zacharow:* Z. „Metallkunde", 1936, S. 40.
(5) *R. Berthold:* „Archiv Eisenhüttenw." 8 (1934/35), S. 21.
(6) — — — — : Normblätter DIN Rönt. 5 und 6, Beuth-Verlag G.m.b.H., Berlin SW 19.
(7) *R. Berthold:* „Der Stahlbau", Heft 4, 1936.
(8) *W. Tofaute:* „Archiv Eisenhüttenw." 8 (1934/35), Heft 7, S. 303.
(9) *K. Wallmann:* „Archiv Eisenhüttenw." 8 (1934/35), Heft 6, S. 243.

Zusammenfassung.

Die weitgehende Einführung von Dauerfestigkeitsversuchen in die technisch-mechanischen Prüfverfahren von Schweißungen ließ die starke Auswirkung von Kerben und damit von Schweißfehlern erkennen, die sich bei rein statischer Beanspruchung nur wenig bemerkbar machen. Zur Sicherstellung der Güte geschweißter Bauwerke war daher die Heranziehung zerstörungsfreier Prüfverfahren notwendig geworden, um solche Fehler aufzudecken. Hierfür erwies sich das Röntgenverfahren bisher am geeignetsten, weil es physikalisch und technisch soweit bekannt und ausgebildet ist, daß es in fast allen Fällen sichere Befunde bei durchaus tragbaren Unkosten ermöglicht. Die technische Durchbildung der Apparate und Hilfsmittel gestattet heute die Anwendung des Röntgenverfahrens in den Werkstätten und auf allen Baustellen; die Durchführung der Röntgenprüfung ist in Deutschland durch Richtlinien geregelt, die eine einheitliche Bildgüte bei allen Anwendern sichern und dadurch die Grundlage für eine einwandfreie Beurteilung der Röntgenbilder schaffen.

Eine allen zerstörungsfreien Prüfverfahren gemeinsame Schwierigkeit ist die Beurteilung der Auswirkung von aufgefundenen Fehlstellen, d. h. die Entscheidung, ob eine nicht einwandfreie Naht noch zulässig ist oder nicht. Um hierüber einigermaßen richtig urteilen zu können, bedarf es eines Erfahrungsumfanges, wie er nur bei zentraler Bearbeitung solcher Aufnahmen gesammelt werden kann. In Deutschland liegt deshalb die Beurteilung eines großen Teils aller Röntgenfilme von Schweißnähten in den Händen der „Röntgenstelle", Berlin-Dahlem.