

132212

Praktisches Handbuch der gesamten Schweißtechnik

Von

Prof. Dr.-Ing. Paul Schimpke und **Ober-Ing. Hans A. Horn**

Direktor der Staatl. Akademie für Technik
Chemnitz

Direktor der Schweißtechnischen Lehr- und
Versuchsanstalt Berlin

Zweiter Band

Elektrische Schweißtechnik

Vierte

○ unveränderte Auflage

Mit 401 Textabbildungen
und 30 Tabellen



Berlin
Springer-Verlag
1945

621.791

Schimpke Paul , Horn Hans A.

Praktisches Handbuch der gesamten Schweisstechnik.-Berlin :
Springer-Verlag,

Bd.2.-Elektrische Schweisstechnik.-4 unveränd.Aufl.-1945.-314 S.mit 40
Abb.,30 Tab..

Справочник знакомит с различными видами сварочного оборудования.
Дано подробное техническое описание каждого вида.

Справочник содержит 40I рисунок и 30 таблиц.Приведены также
список условных сокращений и предметный указатель.

Предназначен для специалистов.

Лазовский А.К.

август 1989

Praktisches Handbuch der gesamten Schweißtechnik

Von

Prof. Dr.-Ing. **Paul Schimpke** und Ober-Ing. **Hans A. Horn**

Direktor der Städt. Akademie für Technik
Chemnitz

Direktor der Schweißtechnischen Lehr- und
Versuchsanstalt Berlin

Zweiter Band

Elektrische Schweißtechnik

Vierte
unveränderte Auflage

Mit 401 Textabbildungen
und 30 Tabellen



4 DEK 1987

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА СССР

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА СССР

Berlin
Springer-Verlag
1945

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung
in fremde Sprachen, vorbehalten.
Printed in Germany.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
I. Einleitung	1
A. Allgemeines über Schweißen und elektrische Schweißverfahren . .	1
Zusammenfügungsarbeiten S. 1. — Begriff des Schweißens S. 1. — Arten der Schweißverfahren S. 1. — Wesen und Arten der elektrischen Schweißverfahren S. 1.	
B. Die sonstigen neueren Schweißverfahren	2
Die Wassergasschweißung S. 2. — Die Thermiterschweißung S. 3. — Die Gas-schmelzschweißung S. 7.	
C. Elektrische Grundlagen	10
1. Wichtige elektrische Maßeinheiten	10
2. Leitungswiderstand und Wärmewirkung	11
3. Allgemeines über die Stromquellen elektrischer Schweißanlagen	13
D. Überblick über die elektrischen Schweißverfahren und ihre Einrichtungen	18
1. Widerstandsschweißverfahren	18
2. Lichtbogenschweißverfahren	19
3. Schweißen durch Elektrolyse	20
E. Die wichtigsten Eigenschaften der schweißbaren Metalle	21
1. Allgemeiner Überblick	21
2. Besonderes über Stahl und Eisen	24
3. Grundlagen der Metallographie des Eisens	28
4. Besonderes über die Nichtisenmetalle	33
II. Die Widerstandsschweißverfahren	37
A. Allgemeines	37
B. Stumpfschweißung	38
1. Schweißbarkeit der Metalle	38
2. Stumpfschweißmaschinen	39
3. Die Technik der Stumpfschweißung	41
a) Vorarbeiten	41
b) Das Schweißen selbst	42
c) Das Abbrechverfahren	45
C. Punktschweißung	47
1. Schweißbarkeit der Metalle	47
2. Punktschweißmaschinen	47
a) Die elektrische Einrichtung der Maschinen	47
b) Die mechanische Einrichtung der Maschinen	48
3. Die Technik der Punktschweißung	50
D. Rollennahtschweißung	56
1. Schweißbarkeit der Metalle	56
2. Rollennahtschweißmaschinen	56
a) Die elektrische Einrichtung der Maschinen	56
b) Die mechanische Einrichtung der Maschinen	57
3. Die Technik der Nahtschweißung	59
E. Das Weibel- oder Fesa-Verfahren	63

	Seite	
III. Die Lichtbogenschweißung	65	
A. Der Lichtbogen und seine Eigenschaften	65	
1. Die Metall-Lichtbogen	65	
a) Der Gleichstrombogen	65	
b) Der Wechselstrombogen	68	IV.
2. Werkstoffübergang im Lichtbogen	70	
3. Der Kohlelichtbogen	72	
B. Die Einrichtungen für die Lichtbogenschweißung	74	
1. Die Stromquellen	74	
a) Allgemeiner Überblick	74	V.
b) Anforderungen an die Stromquellen	74	VI.
c) Verwendung von Netzstrom	76	VII.
d) Gleichstromschweißumformer	78	
e) Schweißspanner mit einphasigem Anschluß	84	
f) Schweißspanner mit dreiphasigem Anschluß	88	
g) Äußeres und mechanische Ausführung der Umformer	92	
h) Betriebstechnische Erläuterungen	97	
2. Selbsttätige Schweißeinrichtungen (Schweißautomaten)	97	
a) Allgemeines	97	
b) Einrichtungen für den Kohlelichtbogen	99	
c) Einrichtungen für den Metalllichtbogen	102	
d) Das Ellira-Verfahren	105	
e) Das Kael-Verfahren	107	
3. Das Schweißzubehör	108	
a) Meß- und Regeleinrichtungen	108	
b) Schweißkabel	109	VIII.
c) Elektrodenhalter und Klemmen	110	
d) Strahlungsschutz und Bekleidung	112	
4. Die Schweißwerkstatt	115	
5. Die Schweißelektroden	116	
a) Kohlelektroden	116	IX.
b) Metallelektroden	117	
C. Die Technik der Lichtbogenschweißung	124	Sachl
1. Einwirkung des Lichtbogens auf die Schweiße	124	
a) Kohlelichtbogen	124	
b) Metalllichtbogen	124	
2. Grundsätzliches über die Schweißung von Stahl	134	
a) Die Vorbereitung des Werkstücks	134	Ab
b) Die Schweißung von Stahlblechen	137	bz
c) Schrumpfungen und Spannungen	144	d.
d) Nachbehandlung und Vergütung der Stahlschweiße	154	
e) Die Berechnung von Schweißverbindungen	159	sc
f) Das Messen von Schweißnähten	168	u. d
3. Wichtige Anwendungsgebiete der Stahlschweißung	170	us
a) Schweißvorrichtungen	170	z.
b) Rohrschweißung	172	DE
c) Behälter- und Kesselbau	177	
d) Maschinenbau	189	W
e) Fahrzeugbau	198	
f) Schiffbau	202	
g) Stahl-, Stahlhoch- und Brückenbau	208	
4. Die Schweißung von Stahlguß	216	
5. Die Schweißung von Sonderstählen	218	
6. Die Schweißung plattierter Bleche	227	
7. Schweißung von Gußeisen	229	
a) Die Kaltschweißung	229	
b) Die Warmschweißung	235	

Inhaltsverzeichnis.

VII

	Seite
S. Die Schweißung der Nichteisenmetalle	242
a) Kupfer und seine Legierungen	243
b) Nickel und seine Legierungen	249
c) Blei	249
d) Aluminium und seine Legierungen	250
IV. Die gas-elektrischen Schweißverfahren	254
A. Das Alexander-Verfahren	255
B. Das Arcatomverfahren	256
C. Das Aroogen-Schweißverfahren	259
V. Das elektrische Schneiden	260
VI. Elektrisches Unterwasserschweißen und -schneiden	261
VII. Die Güte der Schweißnaht und ihre Prüfung	263
A. Allgemeiner Überblick	263
B. Prüfungen ohne Zerstörung der Schweißnaht	264
C. Prüfungen mit Zerstörung der Schweißnaht	271
1. Festigkeitsprüfungen	271
2. Festigkeitsergebnisse	279
3. Metallographische Prüfungen	286
4. Chemische Prüfungen	291
D. Untersuchung von Schweißspannungen	293
VIII. Leistungen und Kosten der elektrischen Schweißverfahren	296
A. Widerstandsschweißungen	296
B. Lichtbogenschweißungen	299
C. Schweißen gegenüber Nieten und Gießen	306
IX. Förderung des elektrischen Schweißens	307
Sachverzeichnis	312

Zeichen und Abkürzungen.

Abb. = Abbildung	at = Atmosphäre	kWh = Kilowattstunde
bzw. = beziehungsweise	atü = Atmosphären	s = Sekunde
d. h. = das heißt	Überdruck	min = Minute
s. = siehe	1° = 1 Grad Celsius	h = Stunde
sog. = sogenannt	1" = 1 Zoll englisch	mm = Millimeter
u. dgl. = und dergleichen	vH = vom Hundert	mm² = Quadratmilli-
usw. = und so weiter	(Prozent)	meter
z. B. = zum Beispiel	RM. = Reichsmark	m = Meter
... = bis	V = Volt	m³ = Kubikmeter
DRP. = Deutsches	A = Ampere	l = Liter
Reichspatent	kVA = Kilovoltampere	kg = Kilogramm
WE = Wärmeeinheit	kW = Kilowatt	t = Tonne

I. Einleitung.

A. Allgemeines über Schweißen und elektrische Schweißverfahren.

Zusammenfügungsarbeiten. Das elektrische Schweißen gehört zu den Zusammenfügungsarbeiten. Unter diesen verstehen wir lösbare oder unlösbare Verbindungen zweier oder mehrerer Metallstücke. Die lösbaren Verbindungen sind in der Hauptsache die Verschraubungen und die Keilverbindungen. Zu den nicht lösbaren oder starren Verbindungen sind vor allem die durch Falzen, Nieten, Löten und Schweißen entstandenen zu rechnen. In Wettbewerb stehen hier miteinander Nieten, Löten und Schweißen. Das Nieten erfordert zunächst Herstellung der Nietlöcher und Niete und dann die eigentliche Nietarbeit einer Nietkolonne von 3...5 Mann. Beim Löten, der dem Schweißen verwandtesten Verbindungsart, wird zur Zusammenfügung der Metallstücke das Lot, ein leicht schmelzbares Metall oder eine Legierung (ein Gemisch mehrerer Metalle), benutzt. Beide Verbindungsarten werden heute bei den meisten schweißbaren Metallen mehr und mehr durch das Schweißen verdrängt.

Begriff des Schweißens. Man versteht unter Schweißen eine Zusammenfügung zweier ähnlich zusammengesetzter Stoffteile derart, daß die Verbindungsstelle mit den beiderseits benachbarten Teilen ein möglichst homogenes (gleichartiges) Ganzes bildet. Man unterscheidet in der Hauptsache zwischen Preßschweißung, bei der die Zusammenfügung der beiden Stoffteile unter Anwendung von Druck in teigigem Zustande vor sich geht, und Schmelzschweißung, bei der sich die Vereinigung in flüssigem Zustande der Schweißstelle, im allgemeinen ohne Anwendung von Druck und mit oder ohne Hinzufügung neuen Werkstoffs, vollzieht.

Arten der Schweißverfahren. In der vorstehenden Begriffsbestimmung des Schweißens sind bereits zwei neugeprägte Ausdrücke, Preßschweißung und Schmelzschweißung, benutzt worden, die heute allgemein Anwendung finden. Unter weiterer Benutzung dieser Ausdrücke ergibt sich folgende Einteilung der Schweißverfahren:

1. Preßschweißung (Druckschweißung, teigiger Zustand des Werkstoffs):
 - a) Hammerschweißung (als Koksfeuer- oder Wassergasschweißung);
 - b) elektrische Widerstandsschweißung;
 - c) Thermitpreßschweißung;
2. Schmelzschweißung (flüssiger Zustand des Werkstoffs):
 - a) Gasschmelzschweißung (autogene Schweißung);
 - b) Elektroschmelzschweißung (elektrische Lichtbogenschweißung);
 - c) gas-elektrische Schweißung (Arcatom- und Arcogenschweißung);
 - d) Thermitgießschweißung und Gußeisenschweißung nach dem Gießverfahren.

Wesen und Arten der elektrischen Schweißverfahren. Diese Verfahren zerfallen in der Hauptsache in zwei große Gruppen. In das Gebiet der Preßschweißung

gehören die Widerstandsschweißverfahren, in das Gebiet der Schmelzschweißung fallen die Lichtbogenverfahren.

Bei den elektrischen Widerstandsschweißverfahren wird die Eigenschaft des elektrischen Stromes ausgenutzt, daß er den stromleitenden Körper an Stellen, die größeren Widerstand bieten (in der Hauptsache sind dies die Berührungsflächen der Schweißstellen), stark erwärmt. Man stieß zunächst zwei Werkstücke stumpf aneinander und preßte die auf Schweißhitze gebrachten Stoßenden nach Ausschaltung des elektrischen Stromes von Hand oder maschinell zusammen. Aus dieser auch heute noch gebräuchlichen Stumpfschweißung entstand später die Punktschweißung, bei der dünne, übereinander gelegte Bleche mit Punktelektroden punktweise, ähnlich der Vernietung, verschweißt werden, und weiter die Nahtschweißung, bei der die Punktschweißung dünner Bleche durch Anwendung von Rollenelektroden zur Schweißung längerer Nähte ausgestaltet wurde. In allen Fällen schweißt man mit niedrig gespanntem Wechselstrom.

Bei den elektrischen Lichtbogenschweißverfahren wird der zwischen zwei Elektroden gezogene Lichtbogen zur Erzeugung der Schweißhitze benutzt. Da der Lichtbogen eine Temperatur von $3500 \cdots 4000^\circ$ besitzt, wird die Schweißstelle dünnflüssig; die Lichtbogenschweißung ist also eine ausgesprochene Schmelzschweißung. Je nach dem für die Elektroden verwendeten Werkstoff und je nach Anordnung der Elektroden unterscheidet man im einzelnen die Lichtbogenschweißverfahren von Benardos, Slavianoff und Zereker. Da man seit vielen Jahren nicht nur mit Gleichstrom, sondern auch mit Wechselstrom schweißen kann, unterteilt man die Lichtbogenschweißeinrichtungen noch in solche für Gleichstrom und solche für Wechselstrom.

Auch die neuerdings in Aufnahme gekommenen Gas-Elektro-Schweißverfahren gehören zur Gruppe der Schmelzschweißung. Man hat zu unterscheiden zwischen der atomaren Wasserstoffschweißung (Arcatom) und der Azetylen-Lichtbogenschweißung (Arcogen). Bei erster wird der Lichtbogen zwischen zwei Wolframelektroden in einer Wasserstoffflammenhülle gebildet, bei letzter arbeiten der normale Metalllichtbogen und eine Azetylen-Sauerstoff-Flamme gemeinsam.

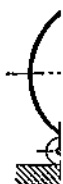
B. Die sonstigen neueren Schweißverfahren¹.

Altbekannte Schweißverfahren sind die Hammerschweißung (Feuerschweißung) von Stahl und das Anschweißen, richtiger Angießen abgebrochener Gußstücke. Die Feuerschweißung findet noch immer Anwendung bei Schmiedearbeiten, bei der Herstellung stumpf und überlappt geschweißter Rohre und bei der Fertigung einiger weniger Werkstücke. In Graugießereien, in denen man ja immer flüssiges Gußeisen zur Verfügung hat, wird das Ausbessern von Gußstücken, an denen z. B. kleine oder größere Teile abgebrochen sind, meist noch durch Aufsetzen einer Form auf die Bruchstelle und Aufgießen hocherhitzten Gußeisens ausgeführt. Im folgenden soll noch ein kurzer Überblick über die neben dem elektrischen Schweißen wichtigsten neueren Schweißverfahren gegeben werden.

Die Wassergasschweißung. Wenn man durch einen schachtartigen, mit glühendem Koks oder Anthrazit gefüllten Generator (Gaserzeuger) Wasserdampf bläst, so wird dieser zerlegt, und es entsteht das sog. Wassergas, dessen brennbare Bestandteile zu etwa je 50 vH Wasserstoff und Kohlenoxyd sind. Technisch

¹ Siehe auch Schimpke: Die neueren Schweißverfahren. Heft 13 der Werkstattbücher, 4. Aufl. Berlin: Springer 1940.

beste
säure
brenn
stück
Hand
werd
straß
Bren
(Abb
oder
Sind
nach
wird
eine
gesch



je n
Keils
gesch
D
teil,
wird
auf
Rolle
von
ordn
strah
lung
rasch
ab.
reich
D
Rohr
in F
koste
aber
A
D
order

besteht Wassergas aus 50 vH Wasserstoff, 40 vH Kohlenoxyd, 4 vH Kohlensäure und 6 vH Stickstoff. Dieses Gasgemisch wird mit Luft in großen Schlitzbrennern gemischt und ergibt eine Flamme von etwa 1800°C , mit der das Werkstück an Stelle des Koksfeuers erhitzt wird. Die Schweißung kann sowohl von Hand (Handfeuer, Zange) als auch maschinell (üblichste Art) durchgeführt werden. Abb. 1 zeigt in der Grundform die Anordnung einer Wassergasschweißstraße, wie sie zur Schweißung größerer Rohre benutzt wird. Die durch zwei Brenner auf $100\cdots 300\text{ mm}$ Länge erwärmte Rohrnaht wird um etwa 60° gedreht (Abb. 1 A) und bei a auf dem Amboß b durch Hand- oder Maschinenhämmer oder auch durch große, mit Hilfe von Wasserdruck angepreßte Rollen geschweißt. Sind die Brenner rechts vom Amboß angebracht (Abb. 1 B), so muß das Rohr nach dem Erhitzen nach links auf einem Wagen verschoben werden. Das Blech wird nur teigig, wie bei der Koksfeuerschweißung; es handelt sich demnach um eine ausgesprochene Preßschweißung. Dabei wird im allgemeinen überlappt geschweißt, d. h. die Bleche müssen, wie beim Nieten, auf eine bestimmte Breite

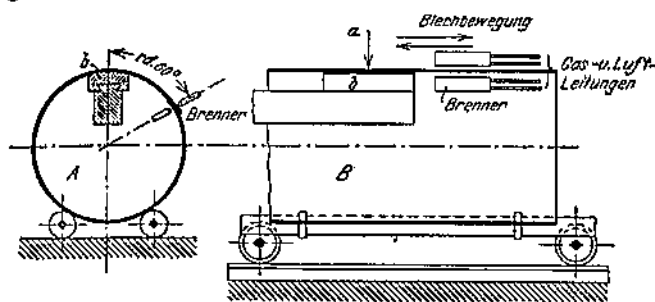


Abb. 1. Wassergasschweißstraße.

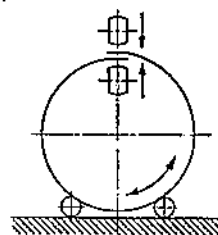


Abb. 2. Grundform der Druckrollen-Wassergasschweißung.

je nach Blechdicke übereinander gelegt werden. Die früher zum Teil übliche Keilschweißung, bei der ein Quadrateisen in eine V-förmig vorbereitete Naht eingeschmiedet wurde, wird heute kaum noch ausgeführt.

Das Schweißen auf dem Amboß, wie es in Abb. 1 dargestellt ist, hat den Nachteil, daß der Zunder zum Teil mit in die Oberfläche des Bleches hineingehämmert wird. Bei über 30 mm dicken Blechen besteht außerdem die Gefahr, daß der auf dem Amboß liegende Blechrand ungenügend durchgeknetet wird. Bei der Rollenschweißung jedoch werden beide gleich großen Rollen mit einem Wasserdruck von $30\cdots 60\text{ t}$ angepreßt. Die Verbindung ist im allgemeinen besser. Diese Anordnung zeigt in der Grundform Abb. 2. Zur Zunderentfernung wird ein Dampfstrahlgebläse verwendet, das jedoch bei Unachtsamkeit durch plötzliche Abkühlung Oberflächenspannungsrisse herbeiführen kann. Bei ungleicher oder zu rascher Erwärmung entstehen Bindungsfehler, oder die Blechkanten schmelzen ab. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, daß der Wassergasschweißer eine ausreichende praktische Erfahrung besitzen muß.

Die Wassergasschweißung kommt hauptsächlich für die Schweißung von Rohren und Blechzylindern von $6\cdots 100\text{ mm}$ (normal $15\cdots 80\text{ mm}$) Wanddicke in Frage, weniger für andere Verbindungen. Wegen der hohen Anschaffungskosten des Wassergaserzeugers und der Schweißeinrichtungen wird das Verfahren aber nur in einigen wenigen Großbetrieben angewandt.

Abb. 3 veranschaulicht eine Wassergasschweißstraße neuerer Bauart.

Die Thermitschweißung. Die Tatsache, daß erhitztes Aluminium eine außerordentlich große chemische Verwandtschaft (Affinität) zum Sauerstoff hat, bildet

die Grundlage des von Dr. Hans Goldschmidt in Essen erfundenen Thermit- oder aluminothermischen Schweißverfahrens.

Unter „Thermit“ versteht man ein Gemisch von Eisenoxyd und Aluminiumpulver, das sich bei etwa 1200° entzündet und zur Umsetzung bringen läßt. Die hohe Zündtemperatur erfordert einen Zwischenträger, die sog. Zündmasse, die aus einem Gemisch von Bariumsuperoxyd (BaO_2) und Aluminiumpulver besteht und mit Hilfe eines Magnesiumstreifens entzündet wird. Unter großer Hitzeentwicklung (etwa 3000°) wird das Eisenoxyd des in einem Schmelztiegel befindlichen Thermits zu Eisen (Stahl) reduziert, während sich das Aluminium mit dem frei

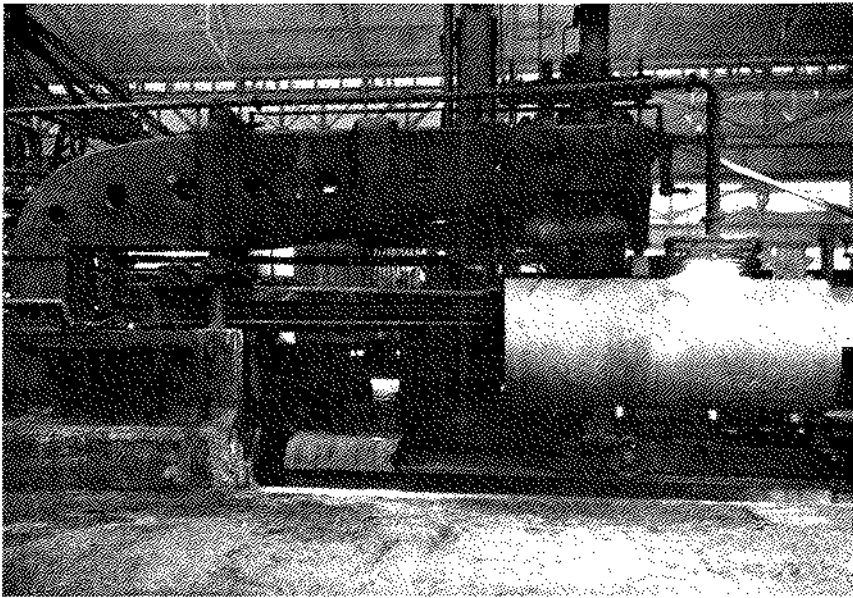
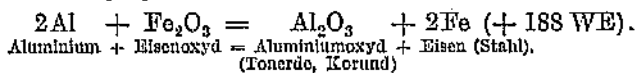


Abb. 3. Ansicht einer Wassergasschweißstraße.

werdenden Sauerstoff zu Aluminiumoxyd (Tonerde) verbindet. Diese heftige Reaktion (Umsetzung) geht vor sich nach der Gleichung:



Dabei steigt die spezifisch leichtere Tonerde als flüssige Schlacke im Tiegel nach oben und schützt den darunter befindlichen, ebenfalls flüssigen und vergießfertigen Stahl vor Verbrennung. Die etwa 10...20 s dauernde Reaktion ist somit nur deshalb auf so einfache Weise möglich, weil die vorhin erwähnte Verwandtschaft des Aluminiums zum Sauerstoff größer ist als die des Eisens. Thermit wird in Säckchen von 5 und 10 kg Gewicht geliefert. 1 kg Thermit ergibt rund 0,5 kg Stahl und 0,5 kg Schlacke. Die Thermitschweißung läßt sich in drei Verfahrensgruppen unterteilen: 1. Schmelz- oder Gießschweißung, 2. Preßschweißung und 3. Vereinigte Gieß- und Preßschweißung. Außerdem hat man zwischen Fertigungs- und Ausbesserungsschweißung zu unterscheiden.

Neben verschiedenen Hilfsgeräten, wie Hobel- und Feilvorrichtungen (zur Vorbereitung und Nachbearbeitung der zu schweißenden Werkstücke), Klemm-

geräten usw., auf die hier nicht eingegangen werden kann, sind drei Hilfsmittel besonders hervorzuheben: die Tiegel, die Gießformen und die Vorwärmanrichtung.

Bei den Tiegeln wird zwischen Kipp- und Spezialtiegeln unterschieden. Wie schon sein Name sagt, handelt es sich beim Kipptiegel um ein Gefäß, das durch Kippen entleert wird und bei dem zuerst die Schlacke abfließt (Abb. 4 III). Er wird praktisch kaum noch angewandt. Im Gegensatz hierzu fließt beim feststehenden Spezialtiegel (Spitztiegel) zuerst der Stahl und dann die Schlacke ab (Abb. 4 I). Diese Tiegelart wird heute fast ausschließlich benutzt. Der Spitztiegel besteht aus einem konischen Stahlblechmantel, in den ein einteiliges, bereits fertiggebranntes, feuerfestes Futter eingesetzt wird. Zwischen Blechmantel und Futterinsatz befindet sich eine dünne Schicht von Klebsandbrei. Für den Abstich des Stahles wird eine im Tiegelboden angebrachte Öffnung durch Einschlagen eines Abstichstiftes freigegeben. Die Größe des Tiegels richtet sich natürlich

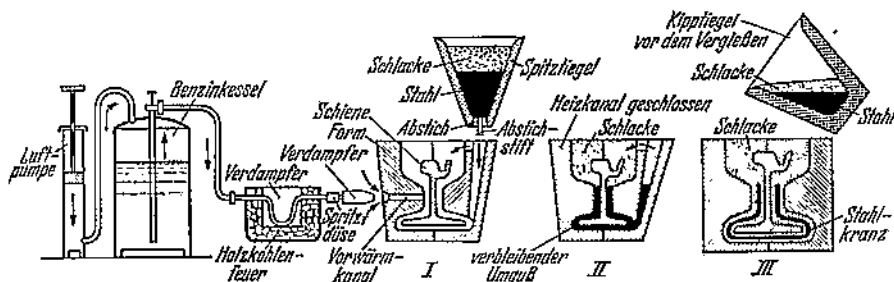


Abb. 4. Einrichtungen für die Thermitschweißung.

nach der jeweils erforderlichen Thermitmenge, sie bewegt sich zwischen 3 und 300 kg Fassungsvermögen.

Da es sich bei allen drei Verfahrensgruppen zunächst um ein Gießschweißen handelt, ist immer eine Einformung der Schweißstelle notwendig. Die Formen sind meist zwei-, nur selten dreiteilig und bestehen aus mit feuerfestem Klebsand ausgekleideten Blechgehäusen oder -schalen. Die sog. Sparformen, die nur eine dünne Klebsandschicht enthalten, werden während des Vorwärmens der Schweißstelle getrocknet.

Zu den wichtigsten Vorbereitungsarbeiten der Thermitschweißung gehört das Vorwärmen der Schweißstelle auf etwa 700°. Bei Ausbesserungsarbeiten ist es unerlässlich. Als Heizmittel werden neben Benzin (Abb. 4) auch Leuchtgas (mit Preßluftbetrieb, Danielscher Hahn als Brenner), Propan u. a. verwendet.

1. Schmelz- oder Gießschweißung. Für Ausbesserungsschweißungen kommt nur dieses Verfahren in Betracht. Das Werkstück wird unter Berücksichtigung der aus der Gießereitechnik bekannten Maßnahmen, wie Einlauf, Steiger usw., eingeformt. Zur Erzielung eines ausreichenden Zwischengusses ist es notwendig, die Bruchflächen des Werkstücks auf Grund bestimmter Erfahrungswerte freizulegen. Der Gesamtschwund beträgt nach der Schweißung etwa 4 vH der Wulstbreite; das erstarrte Thermit Eisen allein hat ein Schwindmaß von etwa 2 vH. Desgleichen läßt sich die für einen Schmelzguß erforderliche Thermitmenge nach einer von der Firma Elektro-Thermit entwickelten Gleichung ermitteln.

Je nach dem Werkstoff, der geschweißt wird, und zur Erreichung der gewünschten technologischen Eigenschaften der Schweiße können dem Thermit verschiedene Stoffe zugesetzt werden. Setzt man reinem Thermit Weicheisenschrott zu, so erhält man eine sehr weiche Schweiße; eine Beigabe von Ferro-

mangan und Ferromangan-Silizium steigert die Festigkeit der Schweiße auf etwa 45 kg/mm^2 . Durch weiteren Zusatz gewisser Mengen von Ferrovanadin, Ferrotitan u. a. kann die Festigkeit auf 60 kg/mm^2 gebracht werden. Stark auf Verschleiß beanspruchte Werkstücke, z. B. Kleeblattzapfen von Walzen, bedingen außer einem Zusatz von Ferromangan auch einen solchen von gepulverter Anthrazitkohle. Schließlich wird beim Gießschweißen gußeiserner Werkstücke dem Thermit neben Weicheisenschrott noch Ferrosilizium in ausreichender Menge zugesetzt, das mit Rücksicht auf die Förderung der Graphitausscheidung frei von Mangan sein muß.

Das bereits früher erwähnte in der Graugießerei übliche Verfahren des Angießens abgebrochener Teile beruht darauf, die Bruchfläche einzuformen, im Holzkohlenfeuer zu erhitzen und Gußeisen aufzugießen. Bei Stahlkörpern kann man auch nach Art der Abb. 5 vorgehen. Die Walze wird so in die Werkstattsohle eingebaut, daß die Bruchfläche des abgebrochenen Zapfens knapp über Flur und waagerecht zu liegen kommt. Ein aufgesetzter Formkasten nimmt das Thermit auf, das die Aufgabe hat, die Bruchfläche aufzuweichen. Nach Entfernen der Schlacke wird ein zweiter Formkasten aufgesetzt und so viel Stahl vergossen, wie es die Abmessungen des zu ergänzenden Zapfens verlangen.

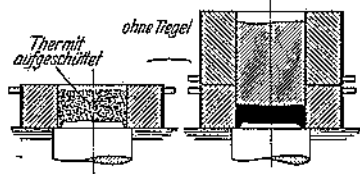


Abb. 5. Thermit-Ausbesserungsschweißung.

Das Thermit-Gießschweißverfahren findet, wie auch die übrigen Gruppen der Thermitschweißung, vorwiegend Verwendung für die Verbindung von Straßenbahn- und Eisenbahnschienen. Die Schienenstöße werden mit einer Lücke von etwa 10 mm gegeneinander gelegt, mit der dem Profil entsprechenden Form umgeben, in der geschilderten Weise vorgewärmt und darauf mit Thermitstahl aus Spitztiegeln umgossen. Kreuzungen und Abzweigungen von Gleisanlagen werden meist nach diesem Verfahren geschweißt, im übrigen kommt es allein kaum, sondern nur in Gemeinschaft mit der Preßschweißung zur Anwendung. Die Wahl des geeigneten Verfahrens richtet sich nach sehr verschiedenen Gesichtspunkten: z. B. nach dem Profil, ob Rillen- oder Vignolschienen; danach, ob die Schienenstränge noch frei beweglich oder fest verlegt, ob sie freiliegend oder eingebettet sind usw.

2. Preßschweißung. Hierbei werden die Schienenstöße sorgfältig und flächenplan bearbeitet und ohne Zwischenraum zusammengestoßen. Nach der Vorwärmung wird der Thermitstahl aus Kipptiegeln (Abb. 4 III) vergossen, ohne vorheriges Entfernen der Schlacke. Die obenaufschwimmende flüssige Schlacke wird zuerst in die Form gegossen, so daß der ihr folgende Stahl weder mit der Form, noch mit dem Schienenstoß in unmittelbare Berührung kommt, vielmehr die Schlacke verdrängt und einen losen, nirgends angeschweißten Stahlkranz ergibt. Der vergossene Stahl und die Schlacke geben ihre Wärme an die Schweißstelle ab, die in Schweißhitze unter Zuhilfenahme von Klemmgeräten zusammengedrückt wird. Nach Erkalten der Schweißstelle wird der gesamte, aus Stahlkranz und Schlacke bestehende Umguß abgeschlagen; er diente nur als Wärmeträger. Dieses kostspielige und etwas umständliche Verfahren wird nur noch selten angewandt.

3. Vereinigte Preß- und Gießschweißung. Sie ist das meist angewendete Verfahren der Schienenschweißung, das darauf beruht, die Schienenflanschen (Füße) und Stege nach dem Schmelzverfahren und die Köpfe nach dem Preßverfahren zu vereinigen. Die Anordnung geht aus Abb. 4 I und II hervor. Die

Stoß
verg
Kop
beim
verb
bare
wird
stop
entz
in di
das
Kop
etwa
des
I
keit.
preß
ver
abge
elek
gewi
I
gen
ungl
Auf
tem
Nan
zum
I
stoff
ents
des
Bed
pult
an
bind
mac
leiel
Luf
schl
entz
Sch
gen
Stic
und
we
—
Bd.

Stoßenden werden mit einem Spalt von etwa 5 mm zusammengelegt, so, daß der vergossene Thermitstahl im Steg und Fuß einen Zwischenguß bildet. Zwischen die Kopfflächen wird ein Blechstück von der Dicke des Spaltmaßes eingespannt und beim Zusammendrücken des Stoßes durch die Klemmvorrichtung mit diesem verbunden. Während des Vorwärmens wird das Thermit in den an einem schwenkbaren Gestell aufgehängten Spitztiegel eingebracht. Nach beendetem Vorwärmen wird zunächst der Vorwärmkanal in der Form (Bild I) mit einem trockenen Sandstopfen sorgfältig verschlossen und gut hinterstampft, worauf das Thermitgemisch entzündet und nach vollendeter Reaktion durch Einschlagen des Abstichstiftes in die Form vergossen wird. Zuerst fließt der Stahl in die Form ein und umschließt das Schienenprofil, wie bei II gezeigt. Die nachfließende Schlacke hat nur den Kopf zu erhitzen. Durch das vorher eingebaute und auf einen Stauchweg von etwa 5 mm eingestellte Klemmgerät erfolgt abschließend die Preßschweißung des Kopfes. Darauf werden Form und Schlacke entfernt.

Dieses Verfahren eignet sich für Werkstoffe bis zu etwa 70 kg/mm² Festigkeit. Stähle höherer Festigkeit (bis 120 kg/mm²) sind nicht mehr einwandfrei preßschweißbar, weshalb sie nach einer neueren Arbeitsweise, dem sog. Einsatzverfahren, verschweißt werden, ein Sondergebiet, von dessen Schilderung hier abgesehen werden muß. Auch die Bestrebungen, Schienenstränge autogen oder elektrisch zu schweißen, sind, wie später noch erwähnt wird, durchaus erfolgreich gewesen.

Die Gasschmelzschweißung (autogene Schweißung)¹. Die Bezeichnung „autogen“ (selbsterzeugend), die für den deutschen Sprachgebrauch an und für sich unglücklich gewählt ist, soll zum Ausdruck bringen, daß diese Schweißung ohne Aufwand mechanischer Arbeit bewerkstelligt wird, was übrigens nur in beschränktem Umfang richtig ist. Besser ist, wie schon im Abschnitt I A erwähnt, der Name „Schmelzschweißung“, und zwar genauer „Gasschmelzschweißung“, zum Unterschied von der „elektrischen (oder Elektro-) Schmelzschweißung“.

Bei der Gasschmelzschweißung (kürzer „Gasschweißung“) wird ein Gas-Sauerstoff-Gemisch an der Mündung eines sog. Schweißbrenners entzündet, und die entstandene Stichflamme von hoher Temperatur ruft ein örtliches Schmelzen des Metalls hervor, wobei die Schweißkanten ineinander überfließen. Je nach Bedarf wird noch Zusatzwerkstoff (Schweißdraht) und ein Flußmittel (Schweißpulver oder -paste) verwendet. Das Schweißpulver soll dazu dienen, das stets an der Schweißoberfläche sich bildende Metalloxyd (die Metallsauerstoffverbindung, aus flüssigem Metall und Luftsauerstoff entstanden) unschädlich zu machen; es bildet mit dem Metalloxyd zusammen im allgemeinen eine glasige, leicht schmelzbare Schlacke, die die Schweißstelle gegen Einwirkung weiteren Luftsauerstoffes schützt und nach dem Schweißen leicht durch einige Hammerschläge entfernt werden kann. Bei Anwendung einer reduzierenden (d. h. Sauerstoff entziehenden) Flamme kann man in bestimmten Fällen, insbesondere bei der Schweißung von Stahl, das Schweißpulver fortlassen.

Für die Zwecke der Gasschweißung hat man verschiedene Brenngase nutzbar gemacht, die stets mit (möglichst reinem) Sauerstoff gemischt werden und eine Stichflamme von verschieden hoher Temperatur und verschiedener chemischer und physikalischer Beschaffenheit ergeben.

Das weitaus wichtigste dieser Brenngase ist das Azetylen. Es wird entweder in besonderen Entwicklern selbst erzeugt oder in Stahlflaschen auf 15 atü

¹ Näheres s. Schimpke u. Horn: Praktisches Handbuch der gesamten Schweißtechnik, Bd. 1: Gasschweiß- und -schneidtechnik, 3. Aufl. Berlin: Springer 1933.

Tabelle 1. Übersicht über die Anwendbarkeit der ver

Spalte:	a	b	c	d	e	f
Art des Schweißverfahrens (bzw. Brenngas):	Azetylen und Dissousgas	Wasserstoff	Blau- und Flüssiggas	Benzol	Leuchtgas (Steinkohlengas)	Wasser
Das Brenngas wird gemischt mit:	Sauerstoff	Sauerstoff	Sauerstoff	Sauerstoff	Sauerstoff (Luft)	Luft
Temperatur der Flamme oder der Schweißstelle:	3100...3200°	etwa 2100°	etwa 2300°	etwa 2500°	etwa 2000°	etwa 1
Vorbereitung von Eisenblechen zur Schweißung:	nur stumpf geschweißt	wird nur stumpf geschweißt				überlägeschw wie im
Zustand des Metalls beim Schweißen:	flüssig	flüssig	flüssig	flüssig	flüssig	teigi
Üblicher Anwendungsbereich bei Stahlblechschweißung:	0,2...40 mm	0,2...6 mm	0,2...10 mm	0,2...15 mm	0,2...6 mm	15...80
Ist beim Schweißen mechanische Kraft notwendig?	nein	nein	nein	nein	nein	ja
Ist das Verfahren zum Hartlöten verwendbar?	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Brenngas- oder Kraftbedarf, je nach Größe der Schweißstücke (Sauerstoff etwa $\frac{1}{3}$ mehr):	30...5000 l/h	30...3000 l/h	80...2000 l/h	100...4000 l/h (gasförmig)	50...4000 l/h	2000...16
Kommt das Verfahren für Ausbesserungen in Frage?	ja	in beschränktem Maße				nein
Welche Metalle und Legierungen sind schweißbar?	Stahl, Stahlguß, Gußeisen, Temperguß, Kupfer, Messing, Bronze, Aluminium und Magnesium (und ihre Legierungen), Zink, Blei, Nickel (Gold, Platin, Silber)					Stahl
Ist das Brennschneiden möglich?	ja	ja	ja	ja	ja	nein

verdichtet als sog. „gelöstes Azetylen“ (Dissousgas) von Füllwerken bezogen. Demgegenüber sind die Schweißverfahren, die Wasserstoff oder seltener Leuchtgas (Steinkohlengas) als Brenngas verwenden, von untergeordneter Bedeutung. Das nur bisweilen anzutreffende, also praktisch noch seltenere Schweißen mit Blaugas, Methan, Propan, Äthylen, Öl- oder Luftgas, ferner mit flüssigen Brennstoffen, wie Benzin, Benzol oder Petroleum, soll hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden.

Die Grundform einer Azetylschweißanlage mit (beweglichem) Kleinentwickler für den Werkstättenbetrieb (I-Type; mit bis zu 10 kg Karbidfüllung) veranschaulicht Abb. 6. Das im Entwickler durch Umsetzung zwischen Kalzium-

karb
Sohl
Syst
Kar
gebr
verb
stoff
hera
Das
von

der verschiedenen neueren Schweißverfahren.

f	g	h	i	Bemerkungen
Wassergas	Thermit	Elektrische Lichtbogensschweißung	Elektrische Widerstandsschweißung	Azetylen und Wasserstoff können zu Lötzwecken auch mit Luft gemischt werden (statt mit Sauerstoff).
Luft	—	—	—	
etwa 1800°	etwa 3000°	3500...4000°	etwa 1300°...1500° (bei Stahl)	Die Temperatur richtet sich nach dem Schmelzpunkte des jeweiligen Metalls.
überlappt geschweißt wie im Feuer	stumpf geschweißt (oder gegossen)	stumpf oder überlappt	stumpf (Punkt- u. Nahtschweißung überlappt)	Die elektrische Widerstandsschweißung kommt entweder für Punktschweißung bis 25 mm Gesamtdicke in Frage oder als Stumpfschweißung stab-eisenförmiger Profile bis zu 40000 mm ² Querschnittsfläche. Nahtschweißungen können nur an dünnen Bleichen bis zu 5 mm Gesamtdicke durchgeführt werden.
teigig	teigig (auch flüssig)	flüssig	teigig (auch flüssig)	
15...80 mm	20...100 mm	1...100 mm	s. Bemerkung	
ja	ja (nein)	nein	ja	
ja	nein	nein	ja	
1000...16000 l/h	—	15...65 V 10...3000 A	1...10 V 300...80000 A	
nein	ja (als Gießverfahren)	ja	in sehr beschränktem Maße	Während Azetylen selbst für die größten Abmessungen der Werkstücke verwendbar ist, sind die übrigen unter b...e genannten Gasarten nur für verhältnismäßig schwache Werkstoffquerschnitte anwendbar.
Stahl	alle Eisensorten	alle Eisensorten und einige Nichtisenmetalle	Stahl (Kupfer, Messing und Aluminium beschränkt)	
nein	nein	sehr beschränkt	nein	

karbid und Wasser erzeugte Azetylen wird über eine Sicherheitsvorlage und durch Schläuche dem Schweißbrenner zugeleitet. Die Entwickler arbeiten je nach System und Bauart mit Betriebsdrücken bis zu 1,5 atü und werden bei über 10 kg Karbidbeschickung als sog. ortsfeste Anlagen in besonderen Gashäuschen untergebracht und durch festverlegte Rohrleitungen mit den einzelnen Schweißplätzen verbunden. Der einer Stahlflasche entnommene, auf 150 atü verdichtete Sauerstoff wird in einem Druckminderventil auf den erforderlichen Arbeitsdruck herabgemindert und ebenfalls durch einen Schlauch dem Brenner zugeführt. Das im Brenner hergestellte Gas-Sauerstoff-Gemisch ergibt eine Stichflamme von 3100°.

Die Gasschweißung ist heute neben der Elektroschweißung das wichtigste und bisher noch das einzige Verfahren, das zur Schweißung aller schweißbaren

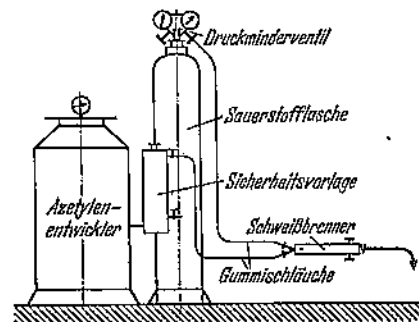


Abb. 6. Grundform einer beweglichen Azetylen-schweißanlage.

Metalle und Legierungen benutzt werden kann. Für die Schweißung von Kupfer, Messing, Bronze, Rotguß, Aluminium und Aluminiumlegierungen, Magnesium und Legierungen, Nickel, Blei, Zink, Gold, Silber und Platin kommt es vor allen anderen Verfahren, zum Teil sogar ausschließlich in Betracht, aber auch für Blech-, Rohr- und Eisenkonstruktionsschweißungen, für Ausbesserungsschweißungen an Stahl-, Stahlguß- und Gußeisenstücken wird es in umfangreichem Maße verwendet.

Im Zusammenhange mit dem autogenen Schweißen ist auch das Brennschneiden



Abb. 7. Das Brennschneiden.

zu erwähnen. Bringt man durch die Stichflamme eines Brenners Stahl auf seine Entzündungstemperatur (etwa 1350° , helle Weißglut) und leitet man dann möglichst reinen Sauerstoff unter Druck auf die hoch-erhitzte Stelle, so verbrennt der Stahl sehr lebhaft im Sauerstoffstrahl; es entsteht eine Schnittstelle. Abb. 7 zeigt den Arbeitsvorgang. Brenngas (im vorliegenden Falle gelöstes Azetylen) und Sauerstoff werden aus Flaschen dem Schneidbrenner zugeführt. Unter lang-samer Bewegung des Brenners, an dessen Spitze das Brenngas-Sauerstoff-Gemisch die Heizflamme bildet und außerdem aus einer besonderen Leitung der Schneidsauerstoff austritt, entsteht eine Schnittfuge, deren Form und Richtung von der Brennerführung abhängig ist. Gußeisen, Kupfer, Bronze, Aluminium usw. sind nicht brennschneidbar, weil die Entzündungstemperatur dieser Metalle oder der Schmelzpunkt ihrer Oxyde oder auch beide über der Schmelztemperatur des Metalles liegen.

Eine Übersicht über die Anwendbarkeit aller neueren Schweißverfahren gibt zusammenfassend Tabelle I.

C. Elektrische Grundlagen.

Der elektrische Strom tritt aus der Gesamtheit der elektrischen Erscheinungen als die technisch wichtigste hervor. Wir vermögen ihn in motorische Kraft zu verwandeln und mit ihm magnetische, chemische und schließlich Wärmewirkungen zu erzielen; letztere sind die für uns weitaus bedeutungsvollsten, die übrigen nur Mittel zum Zweck. Um die Wirkungen des elektrischen Stromes, insbesondere die Wärmewirkungen, richtig zu erfassen, sind einleitend die hierfür wesentlichsten elektrischen Grundlagen zu besprechen. Das umfangreiche Gebiet der Starkstrom-technik hier eingehend zu behandeln, verbietet sich von selbst; es sei dieshalb auf das Schrifttum verwiesen.

1. Wichtige elektrische Maßeinheiten.

Für die Messung elektrischer Größen sind die wichtigsten gesetzlichen Einheiten Ampere, Volt und Ohm.

Das Ampere (A) ist die Einheit der elektrischen Stromstärke. Es entspricht der ausfließenden Menge Wasser aus einer Wasserleitung und wird durch das Amperemeter (Strommesser) gemessen.

Das Volt (V) ist die Einheit der Spannung (Potentialdifferenz, Spannungsunterschied, gemessen zwischen zwei bestimmten Punkten zweier Leiter). Die Spannung entspricht dem Druck einer Wasserleitung. Sie wird mit Hilfe des Voltmeters (Spannungsmessers) gemessen.

Das Ohm (Ω) ist die Einheit des elektrischen Widerstandes, des Widerstandes, den ein Baustoff dem Stromdurchgang entgegensetzt. Das Ohm entspricht den Reibungswiderständen des Wassers an Rohrwänden und in sich selbst.

Nach dem Ohmschen Gesetz ist der Widerstand gleich der Spannung, dividiert durch die Stromstärke. In die Form einer Gleichung gebracht:

$$\text{Widerstand} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Stromstärke}} \quad \text{oder} \quad \text{Ohm} = \frac{\text{Volt}}{\text{Ampere}} \left(R = \frac{E}{J} \right),$$

wobei die allgemeingültigen Abkürzungen bedeuten:

R = Widerstand,

J = Stromstärke,

E = Spannung.

Durch Umkehrung der Gleichung lassen sich auch die übrigen Werte errechnen; so ist:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Widerstand}} \quad \text{oder} \quad \text{Ampere} = \frac{\text{Volt}}{\text{Ohm}} \left(J = \frac{E}{R} \right).$$

Spannung = Stromstärke · Widerstand oder Volt = Ampere · Ohm ($E = J \cdot R$).

Das Watt (W) ist das Einheitsmaß der Leistung des Stromes (N). Praktisch rechnet man meistens mit 1000 Watt = 1 Kilowatt (kW). Unter Watt hat man das Produkt von Stromstärke · Spannung (entsprechend dem Produkt: Wassermenge · Druck) zu verstehen, d. h.

$$\text{Watt} = \text{Ampere} \cdot \text{Volt} \quad (N = E \cdot J).$$

Im technischen Maß ist die Einheit der Leistung das Meterkilogramm in der Sekunde (mkg/s). Als praktische Einheit wird aber noch die Pferdestärke (PS) benutzt.

$$1 \text{ PS} = 75 \text{ mkg/s} = 736 \text{ W} = 0,736 \text{ kW} \quad (\text{umgekehrt: } 1 \text{ kW} = 1,36 \text{ PS}).$$

Einheiten der Arbeit, d. h. der Leistung in einer gewissen Zeit, sind: 1 Joule = 1 Wattsekunde, d. h. 1 Watt 1 Sekunde lang geleistet, und 1 Wattstunde = 1 Watt 1 Stunde lang geleistet. Praktisch rechnet man meistens mit 1 Kilowattstunde (kWh), d. h. also 1 Kilowatt wird 1 Stunde lang geleistet. Arbeit ist also das Produkt von Leistung (N) und Zeit (t): $A = N \cdot t = E \cdot J \cdot t$.

2. Leitungswiderstand und Wärmewirkung.

Spezifischer Leitungswiderstand. Alle elektrischen Schweißverfahren beruhen auf der Ausnutzung derjenigen elektrischen Wärme, die im stromdurchflossenen Schweißstück infolge Widerstands entsteht. Jeder Leiter setzt dem durchfließenden Strom einen Widerstand entgegen, für dessen Überwindung ein bestimmter Teil der verfügbaren Spannung aufgewendet werden muß, und zwar wird der Spannungsverlust um so größer, je größer der Widerstand im Leiter ist. Aus diesem Grunde ist es selbstverständlich, daß man die Leiter aus einem Metalle herstellen wird, das durch einen geringen spezifischen Widerstand besonders geeignet er-

scheint. Dieser Anforderung entspricht technisch an erster Stelle Kupfer, weshalb in der Starkstromtechnik, mit der wir es hier ausschließlich zu tun haben, fast nur Kupfer als Leitungswerkstoff Verwendung findet. Im Gegensatz hierzu stehen jene Fälle, wo zwecks Regelung der Stromstärke größerer Widerstand erwünscht ist. Zur Herstellung solcher Regelwiderstände, kurz Widerstände (Rheostate) genannt, verwendet man absichtlich einen Werkstoff von hohem „spezifischen“ Widerstand (Nickelin, Konstantan, Rheotan usw.). Der Widerstand von Drähten ist nun nicht allein vom spezifischen Widerstand des Drahtwerkstoffs abhängig, sondern wächst erfahrungsgemäß entsprechend der Länge des Drahtleiters und nimmt mit steigendem Querschnitt des Drahtleiters ab. Bedeutet ρ einen Koeffizienten, der den Einfluß des Werkstoffs auf den Widerstand zum Ausdruck bringt, l die Länge des Drahtes in m und F dessen Querschnitt in mm^2 , so erhalten wir die Gleichung $R = \rho \cdot l/F$ (in Ohm). Setzt man $l = 1$ und $F = 1$, dann ist $R = \rho$; mit anderen Worten: ρ ist der dem Stromdurchgang entgegenwirkende Widerstand eines Drahtes aus bestimmtem Werkstoff von 1 m Länge und 1 mm^2 Querschnittsfläche. Diesen sog. spezifischen Widerstand finden wir in Tabelle 2, Spalte 2 angeführt. In Spalte 3 ist der Wert $k = 1/\rho$, d. h. also der umgekehrte Wert des spezifischen Widerstands, die elektrische Leitfähigkeit des betreffenden Metalls, vermerkt.

Tabelle 2.

Metall	Spezifischer Widerstand ρ	Elektrische Leitfähigkeit $k = 1/\rho$	Metall	Spezifischer Widerstand ρ	Elektrische Leitfähigkeit $k = 1/\rho$
Silber	0,016	62,5	Quecksilber . .	0,96	1,04
Kupfer	0,0178	56,1	Nickelin . . .	0,38	2,9
Aluminium . .	0,027	37	Konstantan . .	0,53	1,9
Platin	0,108	9,24	Manganin . . .	0,42	2,4
Eisen	0,09...0,15	11,1...6,7	Kohle	100...1000	0,01...0,001
Blei	0,21	4,8			

Joulesche Wärme. Der durch den Widerstand des stromdurchflossenen Metalls entstehende Verlust an elektrischer Energie muß sich, nach dem Gesetz der Erhaltung der Energie, in irgendeiner anderen Form wahrnehmbar auswirken. Die geleistete elektrische Arbeit verwandelt sich in Wärme; jeder Leiter wird vom durchfließenden Strom erwärmt. Diese Erwärmung wächst mit der Dauer des Stromdurchgangs. Auch der Widerstand des Leiters nimmt im allgemeinen entsprechend seiner Erwärmung zu, d. h. der spezifische Widerstand eines Werkstoffs ist nicht konstant, sondern erhöht sich mit dessen Temperatur. Nur bei einigen Stoffen (z. B. Kohle) nimmt der Widerstand mit der Erwärmung ab. Die durch den Widerstand erzeugte Wärmemenge läßt sich nun durch ein Gesetz festlegen, das nach dem englischen Physiker, der es zuerst aufgestellt hat, als Joulesches Gesetz bekannt ist. Nach Abschnitt 1 war die elektrische Arbeit $A = E \cdot J \cdot t$. Setzen wir hierin $E = J \cdot R$ (auch nach Abschnitt 1), so ergibt sich: $A = J^2 \cdot R \cdot t$ (in Joule). Nun entspricht die elektrische Arbeit von 1 Joule einer Wärmemenge von 0,239 cal [hierbei 1 cal = 1 Grammkalorie = diejenige Wärmemenge, welche notwendig ist, um 1 g Wasser um 1° zu erwärmen; 1 Cal = 1000 cal = 1 WE (Wärmeeinheit)]. Daher ergibt die elektrische Arbeit in Wärme ausgedrückt den Wert:

$$\text{Wärmemenge } Q = 0,239 J^2 \cdot R \cdot t \text{ (in cal).}$$

Diese Wärmemenge wird auch als Joulesche Wärme bezeichnet und gibt das Joulesche Gesetz wieder. Nach Abschnitt 1 ist 1 Joule = 1 Wattsekunde. Wir

erhalten also die Wärmemenge, die 1 kWh entwickeln kann (mit $J^2 = 1000 \text{ W}$, $R = 1 \Omega$, $t = 1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$), zu: $0,239 \cdot 1000 \cdot 1 \cdot 3600 = 860400 \text{ cal} = 860,4 \text{ Cal}$ (860,4 WE).

Da beim Schweißen die zur Erzielung der notwendigen Schweißtemperatur erforderliche große Wärmemenge rasch zustande kommen und möglichst auf das Schweißgut beschränkt werden muß, ergeben sich für die Konstruktion einer Elektroschweißmaschine zwei grundlegende Bedingungen:

1. Es sind Ströme von hoher Stärke (bis zu 80000 A) erforderlich. Infolge des verhältnismäßig geringen Widerstands an der Schweißstelle genügt indessen eine niedrige Spannung ($1 \dots 65 \text{ V}$), deren Maß vom Umfang der Widerstände im Stromkreis der Maschine und von der erforderlichen Stromstärke abhängig ist.

2. Für geringen Widerstand im stromzuführenden Leiter muß gesorgt werden. Hier wirkt jeder Widerstand schädlich und bringt Verluste an elektrischer Kraft, da die in der Stromzuleitung außerhalb der Schweißstelle entwickelten Wärmemengen sich niemals an der Steigerung der Temperatur an der Schweißstelle beteiligen können. Aus diesem Grunde muß die Stromzuleitung der Maschine aus gut leitendem Metall (Kupfer) von genügend großem Querschnitt hergestellt sein; bei den großen Stromstärken, welche beim Schweißen in Frage kommen, ist selbst der geringste Widerstand von hohem Einfluß auf den Stromverbrauch.

3. Allgemeines über die Stromquellen elektrischer Schweißanlagen.

Stromarten. Fließt der elektrische Strom in einem Leiter dauernd in einer Richtung, vom positiven Pol (+-Pol) zum negativen Pol (-Pol), so nennt man ihn Gleichstrom. Wechselt der Strom dagegen seine Richtung, indem er sich von einem positiven Höchstwert der Spannung und Stromstärke durch Null hindurch zu einem negativen Höchstwert und umgekehrt ändert, so sprechen wir von einem Wechselstrom. Die Richtungsänderung beim Wechselstrom erfolgt meistens (insbesondere in Deutschland) 100mal in der Sekunde. Ein positiver und ein negativer Richtungswechsel zusammen machen eine Periode des Wechselstroms aus. Man sagt also, der Wechselstrom hat 100 Wechsel oder 50 Perioden (in der Sekunde) oder: die Frequenz des Wechselstroms ist 50 (Abb. 10). Beim Wechselstrom wird unterschieden zwischen Einphasen- und Mehrphasenströmen, von welchen letzteren praktisch nur der Zwei- und Dreiphasenstrom Bedeutung haben. Ein Zweiphasenstrom ist gleichbedeutend mit zwei zusammenarbeitenden Wechselströmen (Einphasenströmen). Unter dem Dreiphasenwechselstrom, im allgemeinen Drehstrom genannt, versteht man also das Zusammenarbeiten dreier Wechselströme; die Spannungen und Stromstärken der drei Wechselströme (man sagt: der drei Phasen) sind in ihren gleich hohen Werten zeitlich gegeneinander verschoben, sie haben eine „Phasenverschiebung“.

Netzspannung. Der Wechselstrom, insbesondere der Drehstrom, eignet sich viel besser als der Gleichstrom zur Fernleitung des elektrischen Stromes, weil man mit Hilfe der nachher besprochenen Umspanner (Transformatoren) leicht hohe Spannungen (bis 200000 V) erreichen und dann den Strom in Leitungen von geringem Querschnitte weiterleiten kann. Diese Fernleitungsspannungen werden auf die üblichen Netz- oder Gebrauchsspannungen herabgesetzt; sie betragen 110 (seltener), 220, 380 oder 500 V (bei Gleichstrom meist 110 oder 220, seltener 440 V). Sie sind aber noch nicht passend für unsere Schweißeinrichtungen, denn die Widerstandsschweißung erfordert nur $1 \dots 10 \text{ V}$ (bei $300 \dots 80000 \text{ A}$ Stromstärke) und die Lichtbogenschweißung $15 \dots 65 \text{ V}$ (bei $10 \dots 3000 \text{ A}$ Stromstärke). Man schweißt daher nur ausnahmsweise bei der Gleichstrom-Lichtbogenschweißung

aus dem Netz und baut im allgemeinen entweder besondere Schweißumformer (bei der Gleichstrom-Lichtbogenschweißung) oder Umspanner (für die Wechselstrom-Lichtbogenschweißung und für die Widerstandsschweißung).

Dynamomaschinen (auch Generatoren, d. h. [Strom-] Erzeuger genannt). Die Starkstromerzeugung beruht ausschließlich auf magnetoelektrischer Induktion. Legt man um einen Eisenkern isolierte Drahtwindungen und schickt durch diese einen Gleichstrom, so wird der Kern zu einem Elektromagneten und sendet magnetische Kraftlinien aus (magnetisches Kraftfeld). Wird ein Leiter

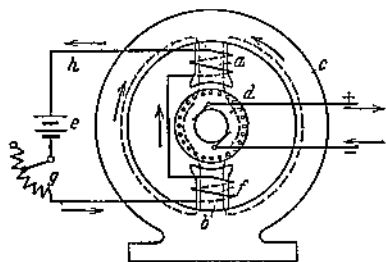


Abb. 8. Grundform einer Dynamomaschine (Fremderregung).

(Draht) durch das Kraftfeld bewegt, so entsteht beim Schneiden der Kraftlinien in dem Leiter eine Spannung. Man bezeichnet diesen Vorgang als Induktion. Um diese Spannungserzeugung praktisch auszunutzen, erhalten Elektromagnet und Leiter bestimmte Form und Anordnung, die wir in der Gestaltung einer Dynamo wiederfinden.

Die Grundform einer Dynamo zeigt Abb. 8. Zwischen den beiden Magnetpolen a und b wird ein magnetisches Kraftfeld erzeugt, was durch die gestrichelten Linien angedeutet wird.

Der Kraftlinienfluß wird durch das Gehäuse c geschlossen. Die magnetische Erregung der Pole erfolgt durch stromdurchflossene Windungen f (Erregerwicklung), die von einer Gleichstromquelle e gespeist werden. Die Größe des Kraftfeldes ist abhängig von der Windungszahl und der Stromstärke, die durch den

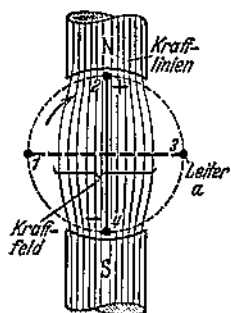


Abb. 9. Grundform der Wechselstrominduktion.

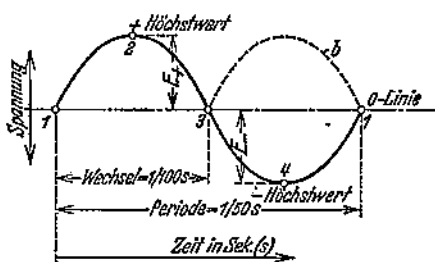


Abb. 10. Wechselstrom-Spannungskurve.

Regler g in der Erregerleitung h verändert werden kann. Im Kraftfeld wird ein mechanisch oder motorisch angetriebener Anker d gedreht, auf dessen Umfang Leiter zu einer isolierten, in Nuten verlegten und durch Bandagen festgehaltenen Ankerwicklung zusammengeschlossen sind.

Bei Drehung des Ankers kreuzt er Kraftlinien; hierdurch wird eine Spannung erzeugt. Betrachtet man, um auf die einfachste Darstellung zu kommen, die Umdrehung nur eines Ankerdrahtstückes a in Abb. 9, so erkennt man, daß in Stellung 1 Kraftlinien nicht geschnitten werden und demzufolge keine Spannung erzeugt (induziert) wird. Auf dem Wege des Drahtes a von 1 nach 2 werden die an Dichte zunehmenden Kraftlinien in steigendem Winkel geschnitten. Trägt man eine Umdrehung des Drahtes a als gerade Linie (Abszisse) und die in den vier angedeuteten Stellungen induzierten Spannungen senkrecht hierzu auf (Ordinaten), so erhält man eine Kurve (Sinuskurve) entsprechend der Abb. 10, die erkennen läßt, daß je nach der Neigung, die der Draht zu den Kraftlinien einnimmt und je nach seiner Lage zum +Pol (N) oder -Pol (S), sich Größe und Richtung der erzeugten Spannung ständig verändern. Eine auf diese Weise erzeugte Spannung, die von einem Nullwert zu einem positiven Höchstwert ansteigt, um

dann wiederum über 0 auf einen negativen Höchstwert zu kommen, eine Spannung also, die ihre Größe und Richtung fortwährend verändert, liefert einen Wechselstrom, der an zwei Schleifringen entnommen wird. Will man Gleichstrom entnehmen, so verwendet man an Stelle der beiden Schleifringe einen Stromwender (Kommutator, Kollektor), dessen einfachste Form zwei voneinander isolierten Schleifringhälften entspricht. Beim Hinübergreifen des Stromabnehmers (der Bürsten) von einer zur anderen Ringhälfte des Kollektors wird die Stromrichtung an den Anschlußklemmen zwangsläufig vertauscht (gewendet). Mit anderen Worten: die Spannung der zweiten Halbwelle b in Abb. 10 verläuft nunmehr in der gleichen Richtung wie die erste. Da aber die Spannung nicht nur gleiche Richtung, sondern auch einen gleichbleibenden Wert haben soll, wird der Kollektor nicht in zwei, sondern in viele Abschnitte (Kollektorsegmente), desgleichen die Ankerwicklung in gleich viele Spulen unterteilt, von denen jede an zwei benachbarten Segmenten endet. Die Bürsten, deren Zahl von der Anzahl der Pole abhängt und die unter sich paarweise parallelgeschaltet sind, werden so angestellt, daß sie die Spannung von den Segmenten abnehmen, deren zugehörige Ankerspulen gerade den wirksamsten Teil des Kraftfeldes schneiden und die mit der höchsten Spannung induziert werden. Wie aus Abb. 10 hervorgeht, erhält man bei zwei Kollektorsegmenten je Umdrehung des Ankers zwei gleichgerichtete Halbwellen und damit starke Spannungsschwankung, die bei vielen Kollektorlamellen entsprechend deren Anzahl abnimmt, wie aus Abb. 11 zu ersehen ist. Durch die praktisch üblichen Drehzahlen sowie durch Anordnung mehrerer Polpaare geht die wellige Spannungskurve A der Abb. 11 in eine fast geradlinige B über.

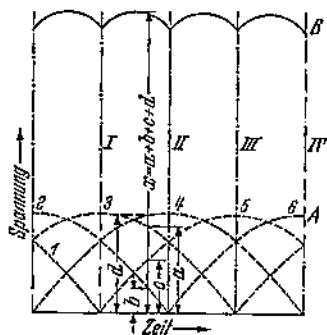


Abb. 11. Gleichstrom-Spannungskurve.

Nach Art der Erregung der Magnetpole unterscheidet man zwischen Selbst-, Eigen- und Fremderregung. Von Fremderregung (Abb. 8) spricht man, wenn der Erregerstrom einem Gleichstromnetz oder einer besonderen Gleichstromdynamo (Erregermaschine) entnommen wird. Wird die Erregerdynamo, wie dies meist der Fall ist, unmittelbar mit der Dynamo gekuppelt, so spricht man von Eigen-erregung. Bei Selbsterregung wird der Erregerstrom von der Dynamo selbst, also ohne äußere Stromzufuhr, geliefert. Der in den Magnetpolen nach jedesmaligem Betriebe zurückbleibende (remanente) Magnetismus genügt, einen schwachen elektrischen Strom in der Ankerwicklung zu erzeugen. Wird dieser schwache Strom durch die Magnetwicklung geleitet, so tritt eine Verstärkung des Kraftfeldes und infolgedessen des Ankerstromes ein (dynamo-elektrisches Prinzip). Je nach der Schaltungsart zwischen Anker- und Erregerstromkreis unterscheidet man: 1. Hauptstrommaschine (Abb. 12a), bei der der gesamte Strom durch die Erregerwicklung fließt; 2. Nebenschlußmaschine (Abb. 12b), bei der die Erregerwicklung in einem abgezweigten Nebenstromkreis liegt; 3. Verbundmaschine (Compoundmaschine, Abb. 12c), bei der beide Wicklungen, also Hauptstrom- und Nebenschlußwicklung, angewandt werden. Diese Schaltungs-

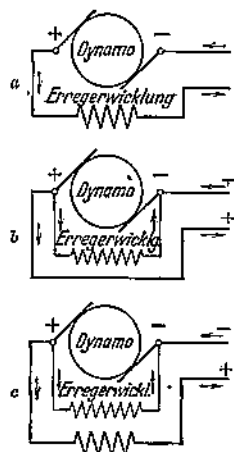


Abb. 12. Schaltungsarten für Gleichstromdynamomas.

arten geben den Dynamomaschinen ganz verschiedene Eigenschaften, die auch für ihren Gebrauch als Schweißdynamos von Bedeutung sind. Die weiteren Anforderungen, die man an Schweißdynamos stellt, und die sich daraus ergebenden Sonderkonstruktionen werden im Abschnitt „Die Einrichtungen für die elektrische Lichtbogenschweißung“ genauer behandelt.

Umspanner (Transformatoren). Dies sind verhältnismäßig einfache und ruhende Geräte, deren Grundform in Abb. 13 dargestellt ist. Der von *A* kommende hochgespannte Wechselstrom wird in einer bestimmten Anzahl Drahtwindungen (Primärspule *D*) um den einen Schenkel des in sich geschlossenen, aus einzelnen Blechen zusammengesetzten Eisenkerns *C* geleitet. Der primäre, durch die Windungen (Spule) *D* fließende Strom erzeugt nun im Eisenkern *C* einen Kraftlinienfluß von wechselnder Stärke und Richtung, entsprechend jedem Wechsel, d. h. jeder Veränderung in der Spannung und Stromstärke des durch *D* geschickten Stromes. Versieht man auch den gegenüberliegenden Schenkel des Rahmens (Jochs) *C* mit einer Anzahl Drahtwindungen, so daß hier eine zweite, die Sekundärspule *E* entsteht, so wird in dieser ein sekundärer Wechselstrom induziert, der die an sie angeschlossene Leitung *B* durchfließt. Die gewünschte Änderung des

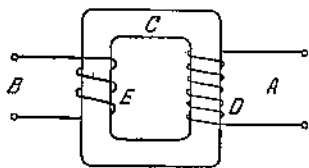


Abb. 13. Grundform eines Umspanners.

Verhältnisses zwischen Stromstärke und Spannung wird nun dadurch erreicht, daß man den Spulen eine bestimmte Anzahl Windungen gibt. Soll beispielsweise im sekundären Stromkreis, also in *B*, eine höhere Spannung herrschen als im primären Stromkreis *A*, dann erhält die Sekundärspule entsprechend mehr Windungen als die Primärspule, und umgekehrt weniger Windungen als diese, falls die Spannung niedriger sein soll. Mit der Änderung der Spannung geht auch eine Änderung der Stromstärke vor sich, und zwar in der Weise, daß zur geringeren Spannung die höhere Stromstärke gehört und umgekehrt, da ja die elektrische Leistung, das Produkt aus Stromstärke und Spannung (abgesehen von Verlusten im Umspanner) auf beiden Seiten des Umspanners dieselbe sein muß. Haben wir z. B. primärseitig 5000 V und 5 A, so ist die elektrische Leistung 25000 W. Beträgt die Spannung nach der Umspannung, auf der Sekundärseite, nur noch 220 V, dann muß die Stromstärke $25000/220 = 113 \text{ A}$ sein.

Das Verhältnis zwischen primärer und sekundärer Spannung heißt Übersetzungsverhältnis des Umspanners. Die große Abweichung der im Sekundärstromkreis benötigten geringen Spannung von der diesem primärseits zugeführten Hochspannung, mit anderen Worten das hohe Übersetzungsverhältnis, erfordert bei Schweißumspannern in der Sekundärspule meist nur eine Windung. Das bezieht sich allerdings nur auf Widerstandsschweißmaschinen, da diese nur bis zu 10 V benötigen; für Lichtbogenschweißung sind noch bis zu 80 V (Leerlaufspannung) gebräuchlich und deshalb mehrere Windungen notwendig. Mit Rücksicht auf die außergewöhnlich hohen Stromstärken, die für die Sekundärspule des Umspanners einer Widerstandsschweißmaschine in Frage kommen, wird die eine Sekundärwindung entweder durch ein massiges Gußstück, ein Kupferseil oder durch eine barrenähnliche starke Kupferstange ersetzt.

In zeichnerisch dargestellter Fernstromversorgung veranschaulicht man die Umspannung nach Abb. 14. Der von der Dynamo *D* gelieferte Wechselstrom wird durch Leitung *A* der Primärspule eines Umspanners *T*₁ zugeführt, der den Strom auf hohe Spannung bringt. Der hochgespannte Strom fließt dann durch die Fernleitung *B* zu einem zweiten Umspanner *T*₂, dem die Aufgabe zufällt, die

Spa
Die
net
der
spu
Pri
leit
Zie
Spr
gro
lett
Spr
(H
Str

ein
ein
inc
mit
im
Sc
Lei
Le

Fü
We
Sel
aus
die
wi

Er
St
Ph
me
Di
Sp
st

Ve
zu

au

vc
W
be

123942

A-322272

Spannung des Stromes auf das für praktische Zwecke zulässige Maß zu erniedrigen. Die Sekundärleitung O des Umspanners T_1 steht schließlich mit der Gebrauchsnetzleitung N in Verbindung. Wir können diese Umwandlung ohne weiteres aus der Zeichnung ablesen. Die an die Primärspule des Umspanners T_1 angeklemmte Primärstromleitung (Niederspannungsleitung) ist mit wenigen, aber kräftigen Zickzacklinien dargestellt, d. h. niedere Spannung, hohe Stromstärke (gemäß dem großen Drahtquerschnitt). Die Sekundärleitung B durchfließt ein Strom von hoher Spannung und geringer Stromstärke (Hochspannungsleitung), das zeigen die vielen Windungen und die geringe Strichdicke. Im Umspanner T_2 vollzieht sich die Wandlung umgekehrt.

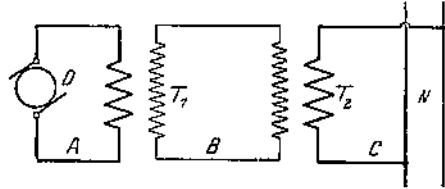


Abb. 14. Grundform der Fernstromumspannung.

Die Leistung im Wechselstromkreis. Im Wechselstromkreis ruft der durch einen Spulendraht fließende Strom in den benachbarten Drähten derselben Spule eine Gegenwirkung zum zunächst fließenden Strom hervor, die man als Selbstinduktion bezeichnet. Nicht die ganze Spannung wird, wie beim Gleichstrom, nutzbar gemacht; ein Teil dient zum Ausgleich der Selbstinduktion. Die Leistung im Wechselstromkreis ist infolgedessen auch nicht $N = E \cdot J$; dies ist nur die Scheinleistung, gemessen in Voltampere (VA); die Wirkleistung (wirkliche Leistung) ist $N' = E \cdot J \cdot \cos \varphi$, gemessen in Watt (W). Die Größe $\cos \varphi$ wird Leistungsfaktor genannt. Aus beiden Leistungen folgt:

$$\cos \varphi = \frac{N'}{N} = \frac{\text{Wirkleistung}}{\text{Scheinleistung}}.$$

Für Kraftzwecke liegt der $\cos \varphi$ zwischen 0,85 und 0,9; er kann höchstens den Wert 1 erreichen, dann ist das Stromnetz induktionsfrei. Der Verlust zwischen Schein- und Wirkleistung wird mit Blindleistung bezeichnet; sie errechnet sich aus $N'' = \sqrt{N^2 - N'^2}$. Wechselstrommaschinen und ihre Zuleitungen müssen die Scheinleistung (Spannung E · Stromstärke J) aufnehmen können; ihre Leistung wird daher nicht in kW, sondern in kVA angegeben. Man kommt zu denselben Ergebnissen, wenn man sagt, daß infolge der Selbstinduktion Spannung und Stromstärke nicht mehr gleichzeitig auf- und abschwngen, nicht mehr in gleicher Phase schwingen. Dann gibt das Produkt aus Spannung und Stromstärke nicht mehr den vollen Wert $E \cdot J$, sondern einen kleineren Wert, nämlich $E \cdot J \cdot \cos \varphi$. Die Größe $\cos \varphi$ wird hiernach auch als Kosinus der Phasenverschiebung (zwischen Spannung und Stromstärke) bezeichnet. Sie spielt naturgemäß bei allen Wechselstrom-Schweißmaschinen eine bedeutsame Rolle.

Die Leistung im Drehstromkreis ist $N = E \cdot J \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi$, worin die $\sqrt{3}$ mit den drei hier zusammenarbeitenden Wechselströmen und ihrer Schaltung zusammenhängt.

Der Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad einer jeden Maschinenanlage, also auch einer Schweißmaschine, ist stets $\eta = \frac{\text{Nutzleistung der Maschine}}{\text{aufgewendete Leistung}}$. Die Größe von η ist naturgemäß stets kleiner als 1; sie kann z. B. bei Umspannern den Wert 0,95 (= 95 vH) erreichen, ist aber bei vielen elektrischen Maschinen, insbesondere auch bei Schweißmaschinen, meistens wesentlich kleiner.

1406

VERBODEN
TECHNISCHE
BIBLIOTHEK

D. Überblick über die elektrischen Schweißverfahren und ihre Einrichtungen.

1. Widerstandsschweißverfahren.

Strom von hoher Stärke (bis 80000 A) und niedriger Spannung (1...10 V) wird einem Hauptstromnetz über einen Umspanner entnommen. Man schweißt also nur mit Wechselstrom, da die Umformung in Gleichstrom von erforderlicher niedriger Spannung und hoher Stromstärke die Verwendung großer und teurer umlaufender Umformer bedingen würde. Sämtliche zum Schweißen erforderlichen Teile einschließlich des Umspanners baut man in einer Schweißmaschine zusammen. Im einzelnen unterscheidet man: Stumpf-, Punkt- und Nahtschweißung.

Stumpfschweißung. Abb. 15 zeigt, daß vom Wechselstromnetz (gewöhnlich Anschluß an eine Phase des Drehstromnetzes) aus der Umspanner gespeist wird. Die Sekundärwicklung des Umspanners führt zu kupfernen Klemmbacken, die

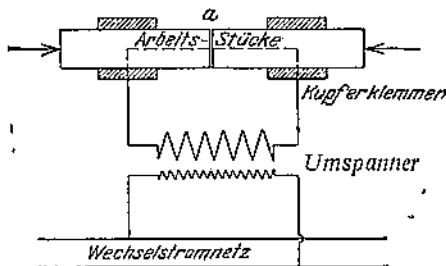


Abb. 15. Grundform der elektrischen Stumpfschweißung.

waagrecht und senkrecht verstellbar sind. In diese Klemmbacken wird das Schweißgut, im vorliegenden Falle Vierkant- oder Rundstahl, mittels irgend-einer Spannvorrichtung eingespannt. Schaltet man den Strom ein, so muß er den Widerstand an der Stumpfstoßstelle *a* der Schweißenden überwinden. Da durch Berührung der Stoßflächen bei *a* dort der größte Widerstand im Stromkreis entsteht, muß sich an der Stoß- und Schweißstelle die gewünschte, größte Wärme im

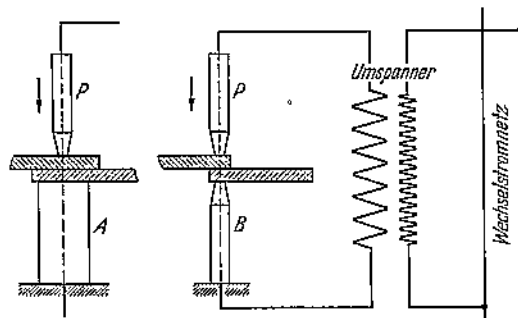


Abb. 16. Grundform der elektrischen Punktschweißung.

Sobald die Temperatur bei *a* auf Schweißhitze gestiegen ist, setzt im richtigen Augenblick eine Unterbrechung der Stromzufuhr und in den Pfeilrichtungen eine die Schweißung vollendende Stauchung ein. Aus der Stumpfschweißung wurde in neuerer Zeit die Abbrennschweißung entwickelt, die auf Stumpfschweißmaschinen ausgeführt wird, bei der aber die Stoßflächen durch geringes Entfernen beider Schweißstücke nach der Berührung und Bildung von Lichtbogen zuerst abgeschmolzen und dann erst gegeneinander gedrückt und verschweißt werden.

Ferner sind aus den Stumpfschweißmaschinen später auch elektrische Erwärmungsmaschinen (Elektroessen, elektrische Niet erhitzer) hervorgegangen, bei denen das Werkstück durch Stromzufuhr nur erwärmt (nicht geschweißt) wird.

Punktschweißung. Sie hat den Zweck, überlappende Bleche in beliebigen Abständen durch punktwises Schweißen, durch Punktieren, zu verbinden. Dieses Verfahren dient demnach als Ersatz

für Nietung. Die Grundform ist in Abb. 16 dargestellt. Die Sekundärwicklung des Umspanners steht mit je einer Elektrode *P* und *B* in Verbindung. Der Strom

(D. wie sch sel for um auc str We zeig der troc ein Tem stan tritt und geru auge nen hier teig und fahre Elekt

fließt durch die Elektrode *P*, überwindet den Widerstand der beiden aufeinanderliegenden Bleche, wobei diese örtlich (zwischen den beiden Elektroden) erhitzt werden, und gelangt durch die Elektrode *B* zur Stromquelle zurück. An der Stromdurchgangsstelle entsteht durch Zusammendrücken der Elektroden ein Schweißpunkt, dessen Durchmesser sich nach der Fläche der Elektrodenenden richtet. Abb. 16 zeigt links bei *A* eine Flächenelektrode, die einen zu starken Eindringdruck vermeidet. Durch dichtes, lückenloses Aneinanderreihen der einzelnen Schweißpunkte entsteht eine Schweißnaht, die sich häufig verbessern läßt, wenn man zur Nahtschweißung übergeht.

Rollennahtschweißung. Zur Herstellung von Längsnähten an dünnen Blechen bedient man sich meistens der Rollenelektroden. Zwei drehbar gelagerte, kupferne, als Rollen ausgebildete Elektroden *A* und *B* (Abb. 17) stehen mit dem Umspanner in Verbindung. Beim Hindurchziehen der beiden überlappten Bleche (in Richtung des Pfeiles *a*) zwischen den stromdurchflossenen Rollen entsteht eine ununterbrochene Schweißnaht, wobei vorausgesetzt ist, daß vorerst die Rollen auf das Schweißgut dauernd einen Druck ausüben.

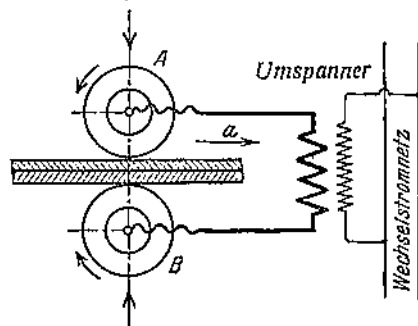


Abb. 17. Grundform der elektrischen Nahtschweißung.

2. Lichtbogenschweißverfahren.

Der Strom wird entweder einem Gleichstromnetz oder einem Wechselstrom-(Drehstrom-) Netz entnommen. Im ersteren Falle kann er mit Hilfe von Vorschaltwiderständen unmittelbar Verwendung finden, was aber infolge großer Unwirtschaftlichkeit und der mit Berührung der Netzspannung verbundenen Gefahr selten geschieht. Fast immer wird der Netzstrom mit Hilfe von Schweißumformern (und zwar Gleichstrom-Gleichstrom- oder Drehstrom-Gleichstromumformern) in Gleichstrom von 15...65 V Spannung oder der Wechselstrom auch mit Hilfe von Umspannern in entsprechend niedrig gespannten Wechselstrom verwandelt. Man schweißt also entweder mit Gleichstrom oder mit Wechselstrom.

Die verschiedenen Schweißverfahren. Die Grundform der Schweißeinrichtung zeigt Abb. 18. Der eine Pol einer Stromquelle *D* wird an das Schweißgut *B*, der andere an einen Schweißstab (Elektrode) *K* angeschlossen. Zwischen Elektrode *K* und dem als Gegenelektrode aufzufassenden Werkstück *B* bildet sich ein Lichtbogen (ähnlich der Bogenlampe), dessen Temperatur von 3500...4000° durch den Widerstand entsteht, der durch den Aus- und Eintritt des Stromes an den Elektroden *K* und *B* und durch den Luftübergangswiderstand hervorgerufen wird. Die heiße Flamme führt eine fast augenblickliche Schmelzung der von ihr getroffenen Stelle des Schweißgutes herbei; wir haben es hier demnach mit einem Schmelzschweißverfahren zu tun, im Gegensatz zum teigigen Zustand der Schweißnaht beim Widerstandsschweißverfahren. Nach Art und Beschaffenheit der Stabelektrode *K* richtet sich das Wesen des jeweiligen Verfahrens. Benardos, der Erfinder der Elektroschmelzschweißung, verwendete als Elektrode Kohlestäbe. Der beim Schmelzen durch Verdampfen verlorengelende

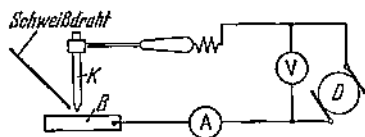


Abb. 18. Grundform einer Lichtbogenschweißanlage.

und in der Schweißfuge fehlende Werkstoff wird durch Einsmelzen von Metalldrähten derselben Art ergänzt. Tritt an Stelle der Kohlelektrode K eine solche aus Metall, so erhalten wir das weitaus gebräuchlichste Slavianoffverfahren,

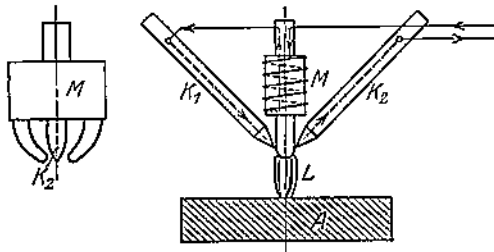


Abb. 10. Grundform des Zerenervverfahrens.

bei dem die Metallelektrode gleichzeitig als Zusatzwerkstoff dient. Zerenerv gestaltet das Benardosverfahren insofern um, als er der einen Kohlelektrode (K in Abb. 18) eine zweite hinzufügt (K_1 und K_2 in Abb. 19) und beide spitzwinklig zueinanderstellt. In diesem Falle wird der Lichtbogen L nicht mehr zwischen Elektrode und Schweißgut, sondern zwischen den beiden Kohlestäben K_1 und K_2 gezogen; mithin erfolgt die Lichtbogenbildung selbständig und vom Schweißgut unabhängig. Mit Hilfe eines in denselben Stromkreis eingeschlossenen Elektromagneten M wird der Lichtbogen auf die Schweißstelle abgelenkt. Dieses Verfahren hat heute keine praktische Bedeutung mehr.

Die Schweißeinrichtungen. Als Stromquellen kommen, wie bereits erwähnt, fast immer besondere Gleichstromschweißumformer oder Wechselstromumspanner in Betracht. Dazu gehören dann noch Meßinstrumente (wie z. B. das Voltmeter V und Amperemeter A in Abb. 18) und Regeleinrichtungen. Schweißkabel leiten den Strom zum Elektrodenhalter und Elektrode K sowie zum Schweißgut B . Der Schweißer muß eine Lichtschutzvorrichtung (Schild oder Kappe) und, besonders bei größeren Schweißungen, entsprechende Schutzkleidung tragen. Gasabsaugevorrichtungen vervollständigen die Einrichtung.

3. Schweißen durch Elektrolyse.

Das von Lagrange und Hoho zuerst angewandte Schweißverfahren beruht auf der Elektrolyse des Wassers. An einen von der Erde gut isolierten, mit Bleiplatten belegten Bottich B (Abb. 20) wird der $+$ -Pol einer Gleichstromquelle D angeschlossen. Der Bottich B wird mit einer Soda-

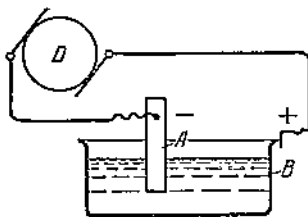


Abb. 20. Schweißen durch Elektrolyse.

lösung gefüllt, deren Leitfähigkeit für den elektrischen Strom durch geringen Zusatz an Schwefelsäure erhöht wird. Beim Eintauchen der an den $-$ -Pol des Stromkreises angeklemmten Schweißstücke A entsteht ein Vorgang, wie er sich bei der Wasserstoffherstellung in Elektrolyseuren abspielt, d. h. das Wasser bzw. die Lösung wird durch den elektrischen Strom zersetzt. Am negativen Pol, also am Schweißgut, scheidet sich Wasserstoff ab, der die Metallstücke mit einer dünnen Gasschicht umhüllt. Diese setzt dem elektrischen Strom einen derart großen Widerstand entgegen, daß sich zwischen Elektrolyt (Flüssigkeit) und Metall eine große Anzahl winziger kleiner Lichtbogen bildet, welche das eingebrachte Schweißgut sehr bald zum Glühen bringen. Das Zusammenschweißen der Metallstücke wird außerhalb des Stromkreises, meist auf dem Amboss durch Hämmern (oder in Pressen), bewirkt. Das Verfahren hat keine praktische Bedeutung erreicht.

E. Die wichtigsten Eigenschaften der schweißbaren Metalle.

1. Allgemeiner Überblick.

Die Elemente oder Grundstoffe werden eingeteilt in Metalle und Nichtmetalle (Metalloide). Metalle sind z. B. Eisen, Kupfer, Aluminium, Blei, Zink, Zinn usw.; sie zeigen im allgemeinen einen Metallglanz und sind gute Leiter der Wärme und Elektrizität. Nichtmetalle sind z. B. Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Silizium, Phosphor, Schwefel; sie haben im allgemeinen keinen Metallglanz und sind schlechte Leiter der Wärme und Elektrizität. Eine scharfe Grenze zwischen Metallen und Nichtmetallen gibt es nicht. Manche Nichtmetalle, z. B. Silizium, Phosphor, Schwefel, finden wir oft als Beimengungen in den Metallen; sie verändern dann die Eigenschaften der Metalle unter Umständen wesentlich. Mischungen von Metallen untereinander und auch von Metallen und Nichtmetallen nennen wir „Legierungen“. So ist z. B. Messing eine Mischung (Legierung) von Kupfer und Zink, Bronze eine solche von Kupfer und Zinn. Der Ausdruck „legierte Stähle“ besagt auch, daß dem normalen Stahl noch besondere Metalle, z. B. Chrom, Wolfram, Nickel usw., beigemischt sind. Ein Metall, z. B. Eisen oder Kupfer, müßte strenggenommen nur aus Eisen bzw. Kupfer ohne jede Beimengung bestehen. Praktisch wären aber dann manche Metalle, insbesondere das Eisen, kaum oder gar nicht verwendbar. Demnach ist also für uns eigentlich jedes Metall eine Legierung, deren Eigenschaften durch Zusetzen einer kleinen Menge anderer Metalle oder Nichtmetalle verbessert werden.

Die schweißbaren Metalle. Das weitaus wichtigste Metall ist das Eisen, das unterteilt wird in Roheisen (mit praktisch 3...4 vH Kohlenstoff) und in Stahl (schmiedbares Eisen, mit praktisch 0,03...1,6 vH Kohlenstoff). Beim Roheisen kennt man zwei Untergruppen, und zwar das weiße Roheisen — bei dem der Kohlenstoff sich fast restlos in gebundener Form (als sog. Eisenkarbid) vorfindet — und das graue Roheisen — bei dem der größte Teil des Kohlenstoffs in reiner Form auskristallisiert ist (als Graphit). Der Stahl wird eingeteilt in Schweißstahl oder Flußstahl, je nachdem er in teigigem oder in flüssigem Zustande hergestellt worden ist. Weicher Stahl mit 0,03...0,3 vH C wird vom Praktiker meistens noch als Schmiedeeisen (oder auch kurzweg „Eisen“) bezeichnet. Roheisen kommt für Schweißungen nicht in Frage, dagegen wohl Gußeisen, das aus dem Roheisen durch einfaches Umschmelzen im Kupolofen der Gießerei erhalten wird.

Wegen der besonderen Wichtigkeit des Eisens bezeichnet man die übrigen Metalle heute als „Nichteisenmetalle“. Von ihnen sind elektrisch mehr oder weniger gut (bzw. nach bestimmten Verfahren) schweißbar: Kupfer, Aluminium, Silber, Gold, Platin. Von Legierungen kommen bisher praktisch für elektrische Schweißungen in Betracht: Messing (Kupfer mit Zink gemischt), Bronze (Kupfer und Zinn), Rotguß (Kupfer, Zink und Zinn), die Aluminiumlegierungen (Aluminium mit Kupfer, Magnesium, Silizium usw.), die Magnesiumlegierungen (Magnesium mit Aluminium, Mangan, Zink oder Silizium) und Monelmetall.

Farbe. Jedes Metall hat zwar eine ihm eigentümliche Farbe, jedoch sehen die meisten Metalle weiß, grauweiß oder grau aus. Nur Kupfer hat eine kennzeichnende rote (Kupferlegierungen rötlich oder gelb) und Gold eine gelbe Farbe. Mit steigender Erwärmung geht die normale Farbe des Metalls allmählich verloren. Es entstehen oft Anlauffarben infolge der Verbindung der Oberflächenschichten des Metalls mit dem Sauerstoff der Luft. Weiter sprechen wir z. B. von „Rotglut“ (bei 600°...900°) und „Weißglut“ (bei 1200°...1400°) beim Stahl, weil er bei den angegebenen Temperaturen rot bzw. weiß aussieht.

Spezifisches Gewicht. Die Wichte oder das spezifische Gewicht (Eigengewicht, Einheitsgewicht, d. h. diejenige Zahl, die angibt, um wievielfach schwerer das betreffende Metall ist als der gleiche Rauminhalt Wasser) der Metalle ändert sich mit der Temperatur und ist außerdem von der Art der Bearbeitung — ob nur gegossen oder gewalzt oder gezogen — abhängig. Tabelle 3 enthält daher nur Mittelwerte.

Geschmeidigkeit. Festigkeit. Unter der Geschmeidigkeit eines Metalls versteht man seine Dehnbarkeit, Ziehbarkeit und Zähigkeit, und unter Festigkeit seine Widerstandsfähigkeit gegen Zug, Druck, Biegung, Verdrehung usw. Ein Metall ist dehnbar, wenn es sich hämmern, walzen, pressen läßt; andernfalls nennt man es spröde. Die Dehnbarkeit ist oft an gewisse Temperaturgrenzen gebunden — z. B. ist Zink nur bei $90\cdots 120^{\circ}$ und $140\cdots 170^{\circ}$ gut walzbar — und nimmt oft auch bei fortgesetzter Formveränderung ab, z. B. beim Kupfer. Ein Metall ist zähe, wenn es sich oft hin- und herbiegen läßt, ohne zu brechen. Die Festigkeit läßt sich mit Hilfe von Prüfmaschinen sehr genau messen. Sie ist bei den einzelnen Metallen sehr verschieden und läßt sich durch Wärmebehandlung wesentlich verändern, ebenso wie die Härte (Härten des Stahls). Nähere Angaben erscheinen hier nicht notwendig; die für das Schweißen wichtigen Zahlen werden im Abschnitt „Güte der Schweißnaht“ erwähnt.

Verhalten in der Wärme. Beim Erhitzen werden manche Metalle allmählich weich (teigig) und dann erst flüssig, andere gehen fast plötzlich in den flüssigen Zustand über (Schmelzpunkt). Alle Metalle haben einen bestimmten, ihnen eigentümlichen Schmelzpunkt¹ (s. Tabelle 3) und Siedepunkt; bei letzterem werden sie gasförmig. Der Siedepunkt liegt wesentlich höher als der Schmelzpunkt, bei Zink aber z. B. schon bei 907° . Der Schmelzpunkt und der Erstarrungspunkt (beim Wiedererkalten) fallen praktisch zusammen.

Tabelle 3.

Metall	Spezifisches Gewicht	Schmelzpunkt	Metall	Spezifisches Gewicht	Schmelzpunkt
Weicher Stahl . .	7,85	1500	Kupfer	8,9	1083
Harter Stahl . . .	7,8	1400	Aluminium	2,7	658
Gußeisen	7,25	1200	Zink	7,1	419
Platin	21,4	1764	Blei	11,3	327
Gold	19,3	1063	Zinn	7,3	232
Silber	10,5	961	(Messing)	8,5	900

Fast alle Metalle dehnen sich beim Erwärmen aus, nehmen also dann einen größeren Raum ein, und ziehen sich beim Erstarren zusammen. Letzteres, das „Schwinden“, ist bei der Schweißung von besonderer Bedeutung, da die Spannungserscheinungen im Metall hierauf zurückzuführen sind (s. die späteren Abschnitte).

Auch das Wärmeleitvermögen des Metalls ist für den Schweißvorgang wesentlich. Alle Metalle sind zwar gute Wärmeleiter, immerhin aber mit deutlichen Unterschieden. Der beste Wärmeleiter ist Silber. Ihm folgen in absteigender Linie: Kupfer, Gold, Aluminium, Zink, Platin, Zinn, Eisen und Blei, so daß also von diesen Metallen Blei das schlechteste Wärmeleitvermögen hat. Platin, Zinn und Eisen haben nahezu dieselbe Wärmeleitfähigkeit; die des Aluminiums ist etwa $3\frac{1}{2}$ mal, die des Kupfers etwa 6 mal so groß.

¹ Schmelzpunkte nach Werkstoffhandbuch Stahl und Eisen, 2. Aufl. 1937.

Verschiedene Metalle haben die Eigenschaft, in flüssigem Zustande stark Gase aufzusaugen, zunächst gelöst bei sich zu behalten und bei der Abkühlung wieder abzugeben. Das Gaslösungsvermögen ist z. B. bei Stahl, Stahlguß und Kupfer besonders groß für Wasserstoff, bei den genannten Eisensorten, ferner bei Nickel und Platin auch groß für Kohlenoxyd. Das aufgenommene Gas — auch eine Stickstoffaufnahme findet statt — führt zu mehr oder weniger großer Porigkeit der Schweiße. Langsames Abkühlen fördert das Entweichen der gelösten Gase. Außerdem können auch geeignete Zusätze im Schweißstabe die Porigkeit vermindern, indem sie sich mit den Gasen verbinden und mit diesen gasförmig entweichen oder in die Schlacke übergehen.

Warmverformung und Feinkornstruktur. Wird ein Metall oberhalb einer bestimmten Temperaturgrenze verformt, so spricht man von einer Warmverformung (Warmrecken), von einer Kaltverformung (Kaltrecken) dann, wenn es unterhalb dieser Temperatur verformt wurde. Die wegen der besseren technologischen Eigenschaften erwünschte Feinkornstruktur wird erreicht, wenn nach dem Kaltrecken genügend hoch erhitzt oder warmverfestigt wird. Die für Stahl geeignete Temperatur liegt meistens zwischen 800 und 900°. Dem Schweißer ist bekannt, daß insbesondere Kupfer und Aluminium in der Schweiße und deren Übergang ausgesprochen grobe Kornbildung aufweisen, die im allgemeinen eine geringe Bruchfestigkeit und Dehnung ergibt. Zur Verfeinerung des Gefüges muß diese Schweiße in der Hitze gehämmert oder ausgeglüht und darauf durch Hämmern verfeinert und damit verbessert werden.

Korrosion. Im allgemeinen versteht man unter Korrosion (wörtlich Zernagung) eine von der Oberfläche eines metallischen Werkstoffs ausgehende Zerstörung, die durch chemisch oder elektrochemisch wirksame Stoffe (Agenzien) herbeigeführt wird. Die dabei gebildeten Korrosionsergebnisse stellen chemische Verbindungen zwischen dem angreifenden Stoff (Agens) und dem korrodierten Metall dar und können sehr verschiedener Natur sein. Man hat dabei zu unterscheiden zwischen vollkommener Unlöslichkeit (Beständigkeit gegen Korrosion) gegenüber dem angreifenden Stoff, vollkommener Löslichkeit (Unbeständigkeit) und teilweiser Löslichkeit. Im ersten Falle bildet sich eine Schutzschicht, die einen weiteren chemischen Angriff des Metalls abwehrt (z. B. Patina, Aluminiumoxydschicht), im zweiten Falle wird das gesamte Metall mehr oder weniger rasch aufgezehrt (z. B. Rost) und im dritten Falle wird der Werkstoff nur teilweise durch die neue Oberflächenschicht geschützt und unterliegt allmählich der Zerstörung. Die Korrosionsvorgänge, die langsam oder schnell, gleichmäßig oder ungleichmäßig verlaufen können, sind an sich sehr verwickelter Natur, um so mehr als die verschiedensten Faktoren hierfür bestimmend sind, wie Konzentration des angreifenden Stoffes, dessen Druck und Temperatur; sein Aggregatzustand (fest, flüssig oder dampfförmig) und die Art der Einwirkung ob ruhend, bewegt, strömend, ständig oder wechselnd. Von gleichfalls großem Einflusse sind außerdem der Gefügebau des Werkstoffs (Grob- oder Feinstruktur), seine Dichte und sein Reinheitsgrad, die Oberflächenbeschaffenheit, die Art der vorausgegangenen Verformung und Wärmebehandlung, der Spannungszustand und manches andere.

Daraus ergibt sich die Folgerung, daß die oft aufgeworfene Frage, inwieweit eine Schweißverbindung korrosionsbeständig sei, nicht ohne weiteres zu beantworten ist, sondern nur auf Grund von sicheren Erfahrungen und umfangreichen zuverlässigen praktischen, wenn auch Schnellkorrosionsversuchen geklärt werden kann. Da nicht selten der Grad der Korrosionsfestigkeit verschiedener Metalle an sich ungeklärt ist, macht seine Bestimmung bei Schweißverbindungen erhöhte Schwierigkeiten. Diese Aufgabe ist jedoch von außerordentlicher Wichtigkeit,

da häufig die Anwendung der Schweißung von der Korrosionsfestigkeit der jeweiligen Metallverbindung allein abhängig ist. Mitunter genügt schon die Feststellung des korrodierenden Einflusses von Luftfeuchtigkeit, von Wasser und ähnlichen scheinbar einfachen Agenzien, um über die Branchbarkeit einer Schweißverbindung zu entscheiden.

Erfahrungsgemäß und auf Grund planmäßig durchgeführter Versuche kann man etwa folgendes allgemein feststellen: Für die Korrosionsfestigkeit der Schweißverbindung sind günstig: möglichst gleiche Werkstoffbeschaffenheit (Schweiße und Werkstoff), feines Korn, Metallegierungen ohne Eutektikum (s. Unterabschnitt 3), glatte Oberfläche und große Dichte. Ungünstig sind neben grobem Korn und ungleicher Werkstoffbeschaffenheit, vor allem Kornverletzungen, gezwungene Formgebung, Spannungen, Gas- und Schlackeneinschlüsse, Flußmittelnester usw. Die Korrosionsbeständigkeit einer guten Schweiße steht der des Grundwerkstoffs nicht nach und übertrifft diese mitunter. So ist es z. B. bekannt, daß die gehämmerte Schweißhaut nicht selten widerstandsfähiger ist als die Walzhaut von Stahlblechen. Ungünstig verhalten sich Stahlschweißen insbesondere gegen den Einfluß von Salzlösungen (Sole) und Salzsäure, wobei in dem durch Kornvergrößerung gekennzeichneten Übergangsgefüge starke Auszehrungen möglich sind.

Die Lieferwerke für bestimmte Metallegierungen, wie Monelmetall, Chrom-Nickelstähle, Nickel, Bronzen usw., machen in ihren Prospekten neben den Angaben über die Verwendbarkeit dieser Werkstoffe meist auch Angaben darüber, gegen welche angreifenden Stoffe sie unempfindlich und in welchem Grade sie gegen andere empfindlich sind.

2. Besonderes über Stahl und Eisen.

Stahl. Die schmiedbaren Eisensorten werden entweder im Puddelofen in teigigem Zustande hergestellt und dann Schweißstahl (0,03...1,6 vH Kohlenstoffgehalt) genannt, oder sie werden nach den neueren Verfahren flüssig erzeugt und in eiserne Blockformen (Kokillen) gegossen; sie heißen dann Flußstahl. Im einzelnen unterscheidet man beim Flußstahl noch nach dem Herstellungsverfahren: Bessemer-, Thomas-, Siemens-Martin-Stahl. Der im Tiegelofen verfeinerte Werkstoff ist als Tiegelstahl oder Tiegelgußstahl zu bezeichnen (nicht mehr als „Gußstahl“, da jeder Flußstahl auch ein Gußstahl ist) und der im Elektroofen gereinigte, besonders gute Werkstoff als Elektrostahl. Aus den letzten beiden Sorten erhält man durch Zusatz von Chrom, Wolfram, Nickel usw. die Sonderstähle oder legierten Stähle. Diese, Tiegel- und Elektrostahl, werden auch Edelmetalle genannt.

Außer dem wichtigsten Nebenbestandteil, dem Kohlenstoff, enthält Stahl noch wechselnde Mengen von Mangan (unter 1 vH), Silizium (unter 0,5 vH), Phosphor (unter 0,1 vH) und Schwefel (unter 0,1 vH). Werkstoff mit mehr als 0,1 vH Phosphor ist stark kaltbrüchig — leichtes Reißen beim Bearbeiten in kaltem Zustande —, solcher mit mehr als 0,1 vH Schwefel ist stark warmbrüchig — leichtes Reißen beim Bearbeiten im rotwarmen Zustande. Je geringer der Anteil aller genannten Beimengungen im Stahl ist, desto besser ist er schweißbar.

Stahlguß. Der Werkstoff ist Stahl — mit 0,1...1,0 vH Kohlenstoff — aus dem Tiegel-, Martin- oder Elektroofen in Formen gegossen. Wir haben es also mit einem schmiedbaren Eisen zu tun, das sich, obwohl es schwer blasen- und lunkerfrei gießbar ist, für Schweißungen recht gut eignet. Die Schweißstellen lassen sich sauber verhämmern. Jeder Gußkörper ist mit Spannungen behaftet, was beim Schweißen besonders zu beachten ist. Jedoch sind beim Stahlguß

diese Spannungen größtenteils durch Ausglühen nach dem Gießen beseitigt; sie sind auch bei dem dehnbaren Stahlguß nicht so gefährlich als bei dem spröden Gußeisen.

Temperguß. Kühlt man Roheisen von bestimmter Zusammensetzung rasch ab, so erhält man weißes Roheisen, das im Bruch weiß und strahlig aussieht, den ganzen Kohlenstoff gelöst, also keinen Graphit enthält und sehr hart ist. Aus diesem weißen Roheisen wird nun Temperguß gewonnen, indem die Gußstücke 4...6 Tage lang in Temperöfen geglüht werden, und zwar meistens eingebettet in sauerstoffabgebende Stoffe. Solche Stoffe sind Walzsinter, Eisenerze u. a., die bei dem Temperverfahren ihren Sauerstoff an einen Teil des Kohlenstoffs des Weißeisengusses abgeben, mit diesem Kohlenoxyd bildend. Der im Ausgangswerkstoff vorhandene, an Eisen gebundene Kohlenstoff wird also größtenteils entfernt, teilweise aber auch durch das Glühen in freien Kohlenstoff, Temperkohle, verwandelt; das entstandene Erzeugnis ist weißer Temperguß (weiße Bruchfläche); es ist geschmeidiger und in beschränktem Maße schmiedbar geworden. Läßt man beim Glühen die sauerstoffabgebenden Stoffe fort, so wird der Kohlenstoff fast nur in Temperkohle verwandelt. Das Gußstück hat einen schwarzen Kern, der von einer dünnen, entkohlten Randzone umgeben ist. Man spricht dann von schwarzem Temperguß (Schwarzguß).

Werkstücke in Temperguß werden nur in kleineren Abmessungen hergestellt. Beim Schweißen kommt es zunächst auf den Kohlenstoffgehalt des Tempergusses an, der nach den vorigen Ausführungen sehr verschieden sein kann. Ist das Werkstück lange getempert, so ist es kohlenstoffarm und infolgedessen verhältnismäßig leicht schweißbar. Ist das Stück dagegen nur kurze Zeit getempert, so wird es noch ziemlich kohlenstoffreich und in seinen Eigenschaften auch hinsichtlich der Spannungen, mehr oder weniger dem Gußeisen ähnlich sein. Ob der Temperguß mehr stahlähnlich oder mehr gußeisenähnlich ist, merkt man bei Beginn des Schweißens sehr bald am Fluß. Temperguß ist elektrisch besser schweißbar als autogen.

Gußeisen. Dieses Eisen ist aus grauem Roheisen durch Umschmelzen in Kupol-, Flamm- oder Tiegelöfen erzeugt. Der Kohlenstoff ist, je nach der Geschwindigkeit der Abkühlung und dem Siliziumgehalt des Gußeisens, in mehr oder weniger großen Mengen als reiner, freier Kohlenstoff — Graphit — auskristallisiert. Gußeisen ist ein spröder, weder schmiedbarer, noch im Feuer schweißbarer Werkstoff. Mit steigendem Kohlenstoffgehalt sinkt sein Schmelzpunkt, der im allgemeinen 1200...1250° beträgt. Das Gußeisen hat die Eigenschaften des gegossenen Werkstoffs; es hat die Geschmeidigkeit und Biegsamkeit des schmiedbaren Eisens gänzlich eingebüßt und geht, was für den Schweißer wichtig ist, gleich in den flüssigen Zustand über, ohne vorher eine teigige Zone wie Stahl zu durchlaufen. Im übrigen ist Gußeisen unter Beobachtung gewisser, im folgenden näher behandelter Vorsichtsmaßregeln im allgemeinen gut schweißbar. Da der Schmelzpunkt des Eisenoxyds höher liegt als der des Gußeisens — im Gegensatz zum Stahl — so muß im allgemeinen, um die sich bildende Oxydhaut in eine leichtflüssige Schlacke zu verwandeln, mit ummantelten Elektroden geschweißt, oder bei Warmschweißung auch ein Schweißpulver benutzt werden.

Neben 3...4 vH Kohlenstoff enthält Gußeisen in wechselnden Mengen Silizium, Mangan, Phosphor und Schwefel. Silizium (meist 1...3 vH) fördert die Ausscheidung des Kohlenstoffs als Graphit und macht infolgedessen den Guß weich. Der Siedepunkt des Siliziums liegt verhältnismäßig niedrig, weshalb es sich teilweise unter Einwirkung der Schweißflamme verflüchtigt (verdampft). Sorgt

man daher nicht für ausreichenden Ersatz an diesem Element, so wird die Ausscheidung von Graphit beeinträchtigt, der Werkstoff wird hart. So erklärt es sich, daß die Schweißelektroden (bei der sog. Warmschweißung) einen hohen Siliziumgehalt haben müssen. Mangan (meist 0,5...1 vH im Guß) behindert die graphitische Ausscheidung des Kohlenstoffs, es macht Gußeisen hart. Phosphor (0,1...1,25 vH im Guß) macht Gußeisen dünnflüssig, Schwefel hingegen dickflüssig und erhöht die Sprödigkeit. Der Schwefelgehalt der Gußstücke wird daher auch möglichst unter 0,1 vH gehalten.

In neuerer Zeit hat man nach verschiedenen Verfahren hochwertiges Gußeisen hergestellt, und zwar in der Hauptsache entweder durch weitgehende Entschwefelung und Entgasung oder durch Verwendung kohlenstoffärmeren Gußeisens (mit etwa 2,4...3,0 vH Kohlenstoff) und heißes Vergießen, nachträgliches Glühen oder Verlangsamung der Abkühlung usw. Hierhin gehören u. a. der Perlitguß von Lanz, der Thyssen-Emmelguß und der Sternguß von Krupp. Alle diese verbesserten Gußeisensorten haben gegenüber gewöhnlichem Gußeisen höhere Zug- und Biegefestigkeit, eine gewisse Dehnung und manchmal sogar eine gewisse Bieg- und Hämmbarkeit. Ihr Gefüge ist mehr oder weniger perlitisch, d. h. die Graphitausscheidung ist zum Teil unterbunden, der Kohlenstoff ist an das Eisen als Eisenkarbid gebunden; der Guß ist dichter und fester. Diese Gußeisensorten sind naturgemäß nicht schlechter, sondern eher besser schweißbar als der normale Guß, um so mehr, als sie auch weniger Spannungen im Gußstück ergeben.

Hartguß entsteht, wenn Gußeisen in eiserne Formen gegossen wird, worin es an seiner Oberfläche rasch abkühlt. Rasche Abkühlung verhindert die Ausscheidung von Graphit und hat also Härtung zur Folge. Demnach wird der Guß in seinen äußeren Schichten viel härter (Hartgußwalzen) als in den inneren. Hartguß ist meist mit starken inneren Spannungen (zwischen den Eisenkristallen) behaftet. An der Schweißstelle wird er ausgeglüht, und die Oberflächenhärtung geht verloren.

Es gibt Gußsorten, die trotz Anwendung aller erdenklichen Mittel durchaus nicht schweißbar sind. Ein solcher Werkstoff ist vor allem verbrannter Guß, worunter man ein längere Zeit hindurch hohen Temperaturen, überhitztem Dampf oder offenem Feuer ausgesetzt gewesenes Gußeisen versteht. Diesem Guß ist ein großer Teil des Kohlenstoffs und Siliziums entzogen; es hat eine Verbrennung (Oxydation) dieser Bestandteile stattgefunden, und es ist ein Werkstoff mit vollkommen anderen Eigenschaften entstanden. Verbrannter Guß wird entweder gar nicht flüssig oder zerbröckelt wie trockener Kitt, ohne daß eine Verbindung herbeizuführen wäre; er erreicht Glashärte. Von der Schweißung solchen Gußeisens (Roststäbe, gußeiserne Kochkessel, Herdplatten, Verdampferschalen, Heizkesselglieder u. dgl.) ist meistens abzuraten. Nur selten sind marktschreierische Abbildungen von angeblich gelungenen Ausbesserungen dieser Art ernst zu nehmen.

Gußspannungen treten hauptsächlich an den Übergangsstellen vom schwachen zum stärkeren Querschnitt und in doppelwandigen Hohlkörpern (Zylindern), großflächigen Ebenen, Gittern, Rädern, Scheiben u. dgl. auf und sind ausnahmslos die Folge der Schwindung (Zusammenziehung), verbunden mit ungleichmäßiger Abkühlung des gegossenen Stückes. Sie lassen sich vielfach gar nicht beseitigen, da sich die dünneren Stellen des Gußstücks immer schneller abkühlen werden als die dickeren. Sitz und Größe der Spannungen richten sich nach Abmessung und Form des jeweiligen Gußkörpers. Zu diesen, fast also in jedem Gußstück vorhandenen Spannungen treten beim Schweißen noch neue Spannungen

hinzu, hervorgerufen durch Teilerhitzung des Schweißstücks. Übersieht oder mißachtet man die im Gußstück bereits vorhandenen und die durch das Schweißen neu hinzukommenden Spannungen, so sind meistens unerwartete Fehlschläge die Folge. Die Körper verziehen sich, reißen, sie bersten, brechen und schlimmstenfalls fliegen sie in Stücke.

Werkstoffnormen. Von den bisher erschienenen deutschen Werkstoffnormen sind Auszüge aus einigen wichtigen Normblättern in den Tabellen 4 bis 7 wiedergegeben. Die Abkürzung DIN heißt: „Das ist Norm.“

Tabelle 4 (Auszug aus DIN 1611)¹.

Maschinenbaustahl					
Schwefel und Phosphor nicht mehr als je 0,06 vH, zusammen jedoch nicht mehr als 0,1 vH					
Markenbezeichnung	Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²	Bruchdehnung mindestens vH		Kohlenstoffgehalt ≈ vH	Eigenschaften
		δ_5	δ_{10}		
St 34·11	34...42	30	25	0,12	einsatzbar, feuerschweißbar
St 42·11	42...50	25	20	0,25	noch einsetzbar, schwer feuerschweißbar
St 50·11	50...60	22	18	0,35	nicht einsetzbar, kaum feuerschweißbar, wenig härtbar
St 60·11	60...70	17	14	0,45	härtbar, vergütbar
St 70·11	70...85	12	10	0,60	hoch härtbar, vergütbar

In Tabelle 4 bedeutet δ_5 die Bruchdehnung für eine Meßlänge gleich dem fünffachen Stabdurchmesser (kurzer Normalstab, Kurzstab), δ_{10} gilt entsprechend für den langen Normalstab (Langstab). Bei der Markenbezeichnung bedeutet St = Stahl, 34 = Mindestzugfestigkeit in kg/mm² und 11 = letzte beide Zahlen des Normblattes 1611.

Tabelle 5 (Auszug aus DIN 1612).

Flußstahl gewalzt (Formstahl, Stabstahl, Breitflachstahl)										
Marken- bezeich- nung	Güte	Zug- festig- keit σ_B kg/mm ²	Bruchdehnung mindestens vH						Faltversuch α = Biegewinkel, D = Dorndurchmesser, a = Probedicke	
			am Kurzstab δ_k			am Langstab δ_l				
			Probedicke mm							
			30...8	unter 8	unter 7	7...5	30...8	unter 8	unter 7	7...5
St37·12	Normalgüte	37...45	25	22	18	20	18	15	$\alpha = 180^\circ$ ¹	$D = 0,5a$
St34·12	Sondergüte	34...42	30	26	22	25	22	18	$\alpha = 180^\circ$	bis 20 mm Dicke: $D = a$ über 20 mm Dicke $D = 2a$ $D = 3a$
St42·12	Sondergüte	42...50	24	22	18	20	18	16		
St44·12	Sondergüte	44...52	24	22	18	20	18	15	$\alpha = 180^\circ$	
St00·12	Handels- güte	Der Stahl darf weder kalt- noch rotbrüchig sein, d.h. die Proben müssen sich im warmen und kalten Zustande bis zum rechten Winkel ($\alpha = 90^\circ$) biegen lassen bei einem Dorndurchmesser $D = 4a$								
¹ Die Probe muß sich, ohne Anrisse auf der Zugseite zu zeigen, kalt zusammenschlagen lassen, bis die Schenkel flach aneinander liegen.										

¹ Die Probe muß sich, ohne Anrisse auf der Zugseite zu zeigen, kalt zusammenschlagen lassen, bis die Schenkel flach aneinander liegen.

¹ Die Tabellen 4 bis 7 werden mit Genehmigung des Deutschen Normenausschusses abgedruckt.

Weitere wichtige Stahlnormen sind u. a.:

- DIN 1613 Schraubeneisen, Nieteisen (St 38 · 13 usw.),
 DIN 1621 Eisenbleche (St 00 · 21 usw.),
 DIN 1622 Stahlblech, Mittelblech (St 00 · 22 usw.),
 DIN 1623 Stahlblech, Feinblech (St I 23 usw.),
 DIN 1661 Einsatz- und Vergütungsstahl (St C 25 · 61 usw.),
 DIN 1662 Nickel- und Chromnickelstahl (ECN 25 usw.),
 DIN 1663 (Vornorm) Chromstahl, Chrommolybdänstahl (ECMo 80 usw.),
 DIN E 1664 Chromstahl, Chrom-Mangan-Stahl (EC 30 usw.),
 DIN E 1665 Chromstahl, Chrom-Mangan-Stahl, Manganstahl (VMC 140, VM 125 usw.).

In Deutschland ersetzt man seit einigen Jahren den Nickel- und Chromnickelstahl durch Chrom-Molybdän- und Chrom-Vanadin-Stahl, auch durch Chrom-Mangan-Stahl und Manganstahl.

Tabelle 6 (Auszug aus DIN 1681).

Stahlguß (Normalgüte)		
Markenbezeichnung	Zugfestigkeit σ_B kg/mm ² mindestens	Bruchdehnung (δ_5) mindestens in %
Stg 38 · 81	38	20
Stg 38 · 81R	38	25
Stg 45 · 81	45	16
Stg 50 · 81R	50	19
Stg 52 · 81	52	12
Stg 60 · 81	60	8
Die Marken Stg 38 · 81R und Stg 50 · 81R sind nur für Lokomotiv- und Wagenbau nach Vorschrift der Deutschen Reichsbahn bestimmt.		

Tabelle 7 (Auszug aus DIN 1691).

Maschinenguß (mit besonderen Gütevorschriften)			
Markenbezeichnung	Zugfestigkeit σ_B kg/mm ² mindestens	Biegefestigkeit ¹ σ_B' kg/mm ² mindestens	Durchbiegung f mm mindestens
Ge 14 · 91	14	(28)	7
Ge 18 · 91	18	(34)	7
Ge 22 · 91	22	(40)	8
Ge 26 · 91	26	(46)	8
¹ Diese Werte gelten nur vorläufig und nur für den angegebenen Biegestab von 600 mm Stützweite.			

guß, Hartguß u. a. m. Die Zugfestigkeitswerte gelten für einen angegossenen Probestab, die Werte der Biegefestigkeit und Durchbiegung für einen getrennt gegossenen Biegestab von 30 mm Durchmesser und 600 mm Stützweite, der in unbearbeitetem Zustande zu prüfen ist.

In DIN 1692 wird der Temperguß behandelt (Markenbezeichnung Te 32 · 92 usw.).

3. Grundlagen der Metallographie des Eisens.

Erstarrungskurve. Mißt man die Temperaturen beim Erstarren eines Metalls in gewissen Zwischenräumen und trägt man die gemessenen Werte in ein Koordinatensystem ein, — auf der Waagerechten (Abszisse) die Abkühlungszeiten,

DIN 1681 für Stahlguß enthält außer den Marken der Normalgüte, die in Tabelle 6 angegeben sind, noch drei Marken „Sondergüte“ und zwei Marken „Stahlguß mit besonderen magnetischen Eigenschaften“, ferner Angaben über Prüfung und Abnahme der Stahlgußstücke. Sollen die Festigkeitswerte durch Zugversuch nachgeprüft werden, so sind sie an angegossenen (in Sonderfällen nach vorheriger Vereinbarung auch an lose aus der Schmelzung mitgegossenen) Probestücken zu ermitteln.

DIN 1691 enthält außer dem in Tabelle 7 angegebenen Maschinenguß mit besonderen Gütevorschriften noch solchen ohne besondere Gütevorschriften, ferner Bauguß und Handelsguß, Feinguß und Kunstguß.

auf der Senkrechten (Ordinate) die Temperaturen — so erhält man die Erstarrungskurve dieses Metalls. Bei einer Legierung wird diese Erstarrungskurve (Abb. 21 I) bei der Temperatur t_1 einen Knick zeigen (Punkt T_1), von da ab flacher und bei der Temperatur t_2 mit einem neuen Knick (Punkt T_2) wieder parallel zur ursprünglichen Kurve verlaufen. Da der erstarrenden Legierung von außen her keine Wärme zugeführt wird, ist der flache Verlauf der Kurve — der auch zu einem kurzen waagerechten Stück führen kann (sog. „Haltepunkt“) — nur erklärlich, wenn im Inneren der Legierung Wärme frei wird, die Kristallisationswärme. Wir erkennen also, daß von T_1 bis T_2 sich Kristalle in der Schmelze bilden, bei T_1 die ersten und bei T_2 die letzten, und daß unterhalb der Temperatur t_2 die Legierung ganz erstarrt ist, während sie oberhalb t_1 vollständig flüssig war.

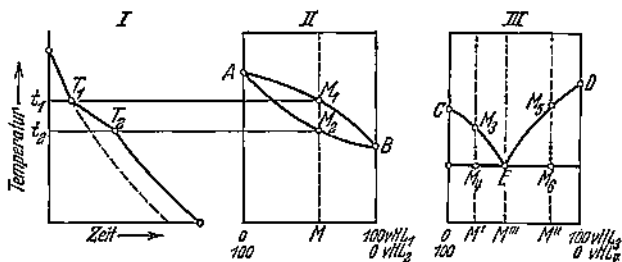


Abb. 21. Erstarrungskurve und Erstarrungsschaubilder.

Erstarrungsschaubild. Untersucht man in entsprechender Weise die verschiedensten Mischungsverhältnisse der Legierung mit den beiden Bestandteilen L_1 und L_2 , von der wir vorhin nur eine Mischung herausgegriffen hatten, und trägt man die Knickpunkte und etwaige Haltepunkte jeder Erstarrungskurve in ein Schaubild ein, dessen Senkrechte wieder die Temperaturen, dessen Waagerechte aber die Gewichtsprozent der Legierungsbestandteile sind, so erhält man ein Erstarrungsschaubild (auch Erstarrungs- oder Zustandsdiagramm genannt), im vorliegenden Fall zunächst das Erstarrungsschaubild II. In ihm entstehen durch Verbinden der verschiedenen Punkte M_1 und der entsprechenden Punkte M_2 die Kurven AM_1B und AM_2B . Oberhalb AM_1B sind alle Einzellegierungen, die ein solches Schaubild also zusammenfaßt, flüssig und unterhalb AM_2B sind sie fest. Dieses Schaubild kennzeichnet gleichzeitig eine der einfachsten Erstarrungsformen von Legierungen, nämlich die, bei der die Legierungsbestandteile im flüssigen und im festen Zustand vollkommen ineinander löslich sind. Man erhält beim Erstarren eine sog. „feste Lösung“. Da diese festen Lösungen kristallisiert sind und in jedem Kristall beide Legierungsbestandteile L_1 und L_2 (z. B. Kupfer und Nickel) gemischt enthalten, nennt man sie auch „Mischkristalle“. Hat man also ein Schaubild nach Art von II vor sich, so kann man mit Bestimmtheit sagen, daß beim Erstarren der verschiedenen Mischungen stets nur Mischkristalle entstehen.

Anders sieht das Erstarrungsschaubild aus, wenn die Legierungsbestandteile zwar im flüssigen Zustand ineinander löslich sind — diese Bedingung muß jede brauchbare Legierung erfüllen —, aber im festen Zustand ineinander unlöslich sind (Fall III in Abb. 21). Bei Beginn der Erstarrung werden sich dann nicht Mischkristalle, sondern Einzelkristalle bilden. Beim Fortschreiten der Erstarrung verändert naturgemäß der Rest der flüssigen Masse (der Schmelze) seine Zusammensetzung, bis ein für beide Bestandteile gesättigter Schmelzrest entstanden ist, der dann sehr schnell unter gleichzeitiger Ausscheidung feiner Einzelkristalle von L_3 und L_4 erstarrt. Diese gewissermaßen günstigste Mischung heißt „eutektische (gutflüssige) Legierung“ oder „Eutektikum“. Greifen wir aus III z. B. die dem Punkt M' entsprechende Legierung heraus, so werden sich bei deren Erstarrung zunächst unterhalb M_3 Einzelkristalle des Legierungs-

Wir vergleichen das Schaubild zunächst am besten mit dem Schaubild III auf Abb. 21 und erkennen, daß bei *C* ein Eutektikum liegt, oberhalb *AOD* alles flüssig, unterhalb *ABCF* alles fest ist. Denken wir uns weiter das Bild durch eine Senkrechte in *E* — bei 1,7 vH Kohlenstoff, Grenze zwischen Stahl und Roheisen — in zwei Teile zerlegt, so entspricht der linke obere Teil einem Abschnitt aus dem Schaubild II der Abb. 21. Wir stellen demnach weiter fest, daß sich in diesem linken Teil — der dem Stahl entspricht — zunächst nur Mischkristalle aus



Abb. 23.
Stahl mit 0,1 vH
Kohlenstoff ($V = 200$).

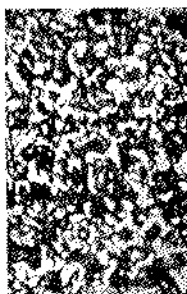


Abb. 24.
Stahl mit 0,4 vH
Kohlenstoff ($V = 200$).

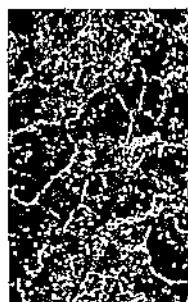


Abb. 25.
Stahl mit 1,3 vH
Kohlenstoff ($V = 200$).

Eisen- und Eisenkarbid bilden, so daß unterhalb *AB* nur noch eine feste Lösung (Mischkristalle) besteht. Im rechten Teil der Abbildung legen wir das Eutektikum bei *C* als eine feinkörnige Mischung von Mischkristallen und von Eisenkarbid fest; es hat die Bezeichnung Ledeburit (nach dem deutschen Forscher Ledebur) erhalten. Im übrigen befassen wir uns in der Hauptsache nur noch weiter mit dem Stahl im erstarrten Zustande.

Eisenkarbid wird metallographisch Zementit genannt. Die Mischkristalle des erstarrten Stahls, die also aus Eisen (Ferrit) und Eisenkarbid (Zementit) bestehen, heißen Austenit. Die Linien *GOS* und *ES* und die Waagerechte durch *S* (bei 721°) zeigen uns, daß der Austenit im festen Zustande (in der Hauptsache in Rotglut) noch Umkristallisationen erfährt. Bei *S* (Temperatur 721°) wandelt er sich in eine eutektische feste

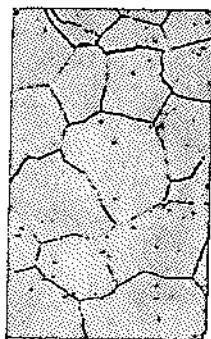


Abb. 26.
Austenit ($V = 600$).



Abb. 27.
Perlit ($V = 600$).

Lösung um, die in Anlehnung an das Eutektikum als Eutektoid bezeichnet wird, wegen ihres perlmuttartigen Glanzes und Aussehens (im Metallschliff) den Namen Perlit führt, aus feinen Kristallen von Ferrit und Zementit besteht und bei 0,9 vH Kohlenstoff liegt. Längs *GOS* scheiden sich überschüssige Ferritkristalle aus dem Austenit aus, so daß unterhalb *PS* nur Ferritkristalle in einer Grundmasse von Perlit vorhanden sein können, und zwar mit wenig Perlitinseln innerhalb der hellen Ferritkristalle (Abb. 23), wenn der Stahl nur etwa 0,1 vH Kohlenstoff enthält, und mit viel Perlit (Abb. 24), wenn er z. B. schon 0,4 vH Kohlenstoff hat. Längs *ES* scheiden sich dementsprechend überschüssige Zementitkristalle aus den Mischkristallen (Austenit) aus, so daß unterhalb der

Waagerechten *PSK* rechts von *S* nur Zementitkristalle als helle Adern (Abb. 25) in der starkdunklen Grundmasse von Perlit in einem Stahl von z. B. 1,3 vH Kohlenstoff enthalten sein können. Die Struktur des Austenits (Mischkristalle) zeigt uns Abb. 26 und die des Eutektoids Perlit Abb. 27, letzteren in streifiger (lamellarer) Form. Durch Glühen bei etwa 700° kann man auch einen körnigen Perlit bekommen. Für einen Vergleich der Schliffbilder des vergrößerten Gefüges ist es übrigens wichtig, daß jedesmal die Vergrößerung angegeben wird (z. B. Abb. 27: $V = 600$, d. h. 600fach vergrößert).

Gußeisen, Temperguß. Alle bisher besprochenen Vorgänge haben zur Voraussetzung, daß die Abkühlung genügend langsam vor sich geht. Bei ganz langsamer Abkühlung einer höher gekohlten Schmelze, begünstigt durch einen hohen Siliziumzusatz, zerfällt der Zementit in Graphit und Ferrit; es entsteht das graue Roheisen bzw. Gußeisen, das natürlich noch Reste von Zementit und dann auch Perlit enthalten kann. Graphit, Ferrit und auch Perlit sind verhältnismäßig weiche Bestandteile, Zementit ist demgegenüber außergewöhnlich hart. Schnell abgekühltes Roheisen und Gußeisen wird noch viel Zementit enthalten, also viel härter sein als langsam abgekühltes.



Abb. 28.
Grobnaedliger Martensit
($V = 200$).

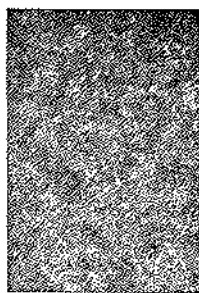


Abb. 29.
Feinnadliger Martensit
(Hardenit, $V = 200$).

Die Fähigkeit des Zementits, sich zu zerlegen, bleibt nach dem Erstarren bis auf etwa 800° erhalten. Man kann also durch längeres Ausglühen eines weißen Roheisens in Hitze-graden von etwa 800...1000° freien Kohlenstoff, Temperkohle genannt, in Form schwarzer Knötchen erhalten (Temperguß).

Härten des Stahls. Auch ein langsam abgekühlter Stahl wird bei einem Gehalt

bis etwa 0,9 vH Kohlenstoff weich sein, da er ja aus Ferrit und Perlit oder aus Perlit besteht. Kühlt man jedoch warmen Stahl von Temperaturen etwas oberhalb *GOSK* sehr schnell ab, so unterbindet man die Umwandlung in Ferrit und Perlit ganz. Der Austenit (Mischkristalle) verwandelt sich dann nur noch in ein mehr oder weniger feinnadliges Gefüge, das wahrscheinlich einer festen Lösung von Eisenkarbid in α -Eisen entspricht und nach dem deutschen Forscher Martens als Martensit bezeichnet wird. Dieser Martensit ist das Gefüge des gehärteten Stahls; er sieht grobnadlig aus (Abb. 28), wenn die Abschrecktemperatur verhältnismäßig hoch war, und feinnadlig bzw. fast strukturlos (Abb. 29, dann auch „Hardenit“ genannt), wenn nur kurze Zeit bis dicht über *GOSK* gegangen ist.

Die praktische Härtung des Stahls besteht demnach zunächst in einem Erhitzen bis über die Linie *GOSK* und anschließendem plötzlichen Abschrecken (z. B. in Wasser). Allerdings wird dieser schroff abgeschreckte Stahl spröde (glas-hart). Man schreckt also zweckmäßig weniger schroff ab (z. B. in Öl, im Luftstrom) oder erwärmt den Stahl nachträglich auf etwa 225...330° („Anlassen“ genannt).

Sonderstähle (legierte Stähle). Die zum Legieren benutzten Metalle (Nickel, Chrom, Wolfram usw.) verschieben einmal die Umwandlungspunkte des Stahls im festen Zustande, und zwar meist nach unten, und machen außerdem den Stahl träger in der Umwandlung, so daß sich auch bei langsamer Abkühlung Martensit bildet oder sogar der Austenit erhalten bleibt. Man unterscheidet dementsprechend: Perlitische Stähle (mit niedrigen Legierungszusätzen), die unbehandelt aus

Perlit (gegebenenfalls mit Ferrit oder Zementit) bestehen. — Martensitische Stähle (mit mittelhohem Gehalt an Nickel, Chrom oder Mangan), die aus Martensit bestehen, auch „naturharte Stähle“ genannt. — Austenitische Stähle (hochprozentige Nickel-, Chrom- und Chrom-Nickel-Stähle), die bei Raumtemperatur austenitisch sind (d. h. also nur aus Mischkristallen bestehen). — Doppelkarbid- oder Ledeburitstähle (hauptsächlich Chrom-Wolfram-Stähle für Werkzeuge) mit Doppelkarbiden in einer Grundmasse von Austenit und Martensit. — Ferritische Stähle (mit niedrigem Kohlenstoff- und hohem Chromgehalt), die keine Umwandlung erfahren haben und aus grobkörnigem Ferrit bestehen. Näheres über diese Stähle wird noch im späteren Abschnitt „Schweißung von Sonderstählen“ ausgeführt.

Dieser kurze Ausschnitt aus der Metallographie des Eisens möge hier zunächst genügen.

4. Besonderes über die Nichtisenmetalle.

Kupfer. Das Metall kommt nach DIN 1708 als Hüttenkupfer A...F mit einem Reinheitsgrad von mindestens 99,0...99,9 vH, als Hüttenkupfer S (sauerstofffrei) und als Kupfer E, Elektrolytkupfer (letzteres hauptsächlich für elektrische Leitungen, nicht nach dem Reinheitsgrad, sondern nach der elektrischen Leitfähigkeit beurteilt) in den Handel, und zwar meist als gewalzter und gezogener Werkstoff (in Blech-, Rohr-, Stangen- und Drahtform). Sein Schmelzpunkt ist 1083° (Reinkupfer), sein Siedepunkt 2360°. Kupfer hat eine lachsrote Farbe, ist sehr geschmeidig und dehnbar, aber schlecht gießbar, hat ferner eine große Leitfähigkeit für den elektrischen Strom und für Wärme. Hüttenkupfer und umgeschmolzenes Kupfer enthalten 0,5...1,0 vH Kupferoxydul (Cu_2O), entsprechend einem Sauerstoffgehalt von 0,05...0,11 vH. Kupferoxydul ist in flüssigem Kupfer löslich, in festem Kupfer dagegen gänzlich unlöslich. Über 0,9 vH Cu_2O setzt die Festigkeit des Kupfers herab. 3,45 vH Cu_2O (entsprechend dem Eutektikum Kupfer-Kupferoxydul) erniedrigt den Schmelzpunkt des Kupfers auf 1064°. Kupfer neigt in flüssigem Zustande, insbesondere wenn es kupferoxydulhaltig ist, stark zur Wasserstoffaufnahme und stößt den Wasserstoff beim Erkalten unter Zurücklassung von Poren (Blasen, Lunkern) wieder aus (Spratzen des Kupfers).

Die Wärmeausdehnung des Kupfers beträgt bei einer Erwärmung von 10° auf 100° auf 1 m Länge 1,6 mm, also beim Erwärmen bis zum Schmelzpunkt etwa 26 mm, was beim Schweißen besonders zu beachten ist. Die Zugfestigkeit beträgt bei gegossenem Kupfer 15...20 kg/mm², bei gewalztem (geglühtem) 20...23 kg/mm², letztere bei einer Dehnung von 38...40 vH. Normalisiertes Kupfer — ein Kupfer, das nach der Warm- oder Kaltverformung 1 h lang bei 650° ausgeglüht wurde — hat 20...24 kg/mm² Zugfestigkeit bei einer Dehnung von 40...60 vH. Für den Schweißer ist es wichtig zu wissen, daß die Zugfestigkeit des Kupfers mit steigender Temperatur stark abnimmt, und zwar z. B. auf 8,5 kg/mm² (bei 400°), 3,8 kg/mm² (bei 600°) und 0,8 kg/mm² (bei 970°).

Im Feuer ist Kupfer nicht härtbar und nur sehr beschränkt schweißbar. Durch oberflächliche Oxydation wird es dunkelrot. Überhitztes und verbranntes Kupfer sieht in der Bruchfläche ziegelrot aus; es ist dann nicht mehr brauchbar und kann nicht wieder brauchbar gemacht werden.

Messing (auch „Gelbguß“ genannt) ist eine Legierung von 58...67 vH Kupfer, Rest Zink, ausnahmsweise mit kleinen Zusätzen von Blei, und kommt als Hartmessing (Schraubenmessing), Schmiedemessing, Druckmessing und Gußmessing in den Handel (Näheres s. DIN 1709), ist gut gießbar und in kaltem Zustand

hämmerbar, walzbar, ziehbar. Der Schmelzpunkt schwankt zwischen 800° und 900°; er ist um so niedriger, je mehr Zink in der Legierung ist. Die Wärmeleitfähigkeit ist infolge des Zinkzusatzes bedeutend geringer als die des Kupfers. Messingähnliche Legierungen sind Deltametall, Duranametall usw., die man jetzt auch als „Sondermessing“ bezeichnet. Sie enthalten, neben Kupfer und Zink, etwa 3...5 vH Eisen, Mangan, Blei und Aluminium. Nach den Normen werden auch die kupferreicheren Legierungen Halbtombak (Lötmessing), Gelbtombak (Schaufelmessing), Hellrottombak, Mittelrottombak und Rottombak, die 67...90 vH Kupfer enthalten, unter die Gruppe der Messinge gerechnet.

Die Zugfestigkeit der Messingsorten ändert sich innerhalb weiter Grenzen zwischen 25 und 70 kg/mm², je nach der Legierungssorte und je nachdem, ob weicher, 1/2 harter, harter oder federharter gewalzter Werkstoff vorliegt. Dem entsprechend wechselt auch die Dehnung stark (zwischen 5 und 50 vH). Die Gefahr der Wasserstoffaufnahme ist bei Messing nur gering, da Zink die Löslichkeit für Wasserstoff sehr stark herabsetzt. Dagegen neigt der Zinkanteil des Messings zu schneller Verdampfung (Siedepunkt des Zinks bei 907°), was beim Schweißen besonders zu beachten ist.

Bronze und Rotguß. Bronze ist eine Legierung aus 80...94 vH Kupfer, Rest Zinn und kommt als Guß- oder Walzbronze in den Handel (DIN 1705, Blatt 1 u. 2). Die sog. „Phosphorbronzen“ sind ebenso zusammengesetzt; sie erhalten nur bei der Herstellung einen Phosphorzusatz zur Sauerstoffentfernung (Desoxydation). Der Phosphor soll sich mit dem Sauerstoff des Kupferoxyduls verbinden — auf diese Weise das Kupferoxydul zerstören — und in die Schlacke gehen. Diese Bronze wird also dichter im Gefüge. Die „Sonderbronzen“ enthalten außer Kupfer und Zinn noch etwas Blei oder Aluminium (s. DIN 1714, Aluminiumbronze, u. DIN 1716, Bleibronze u. Blei-Zinn-Bronze). Die Schweißung von Aluminiumbronze ist erst neuerdings einwandfrei gelungen. Der Schmelzpunkt der Bronzen liegt zwischen 720° und 1000°; je höher der Zinngehalt, um so niedriger der Schmelzpunkt. Alle Bronzen sind gut gießbar, aber nur ein Teil ist schmiedbar.

Rotguß (auch DIN 1705, Blatt 1 u. 2) ist eine Legierung von 82...93 vH Kupfer, 4...10 vH Zinn und 3...6 vH Zink, manchmal auch mit etwas Bleigehalt. Der Schmelzpunkt liegt zwischen 800° und 900°. Die Legierung gibt infolge des Zinkzusatzes besonders dichten und guten Guß. Rotguß rechnet nach den Werkstoffnormen zu den Bronzen und führt auch den Namen „Maschinenbronze“.

Die Festigkeitsziffern sind je nach der Zusammensetzung sehr verschieden. Phosphorbronze hat 60 kg/mm² Zugfestigkeit, Rotguß etwa 20 kg/mm² bei 6...25 vH Dehnung.

Aluminium wird aus Tonerde (Aluminiumoxyd) durch deren elektrolytische Zersetzung hergestellt und kommt nach DIN 1712 in den Handel als: Al 99,7 H — Al 99,5 H — Al 99 H (Reinaluminium H in Blöcken und Barren), ferner als Reinaluminium U (umgeschmolzen) mit Reinheitsgraden von 98...99,5 vH und als Reinaluminium im Halbzeug mit den gleichen Reinheitsgraden 98...99,5 vH. Es ist bekanntlich sehr leicht (spezifisches Gewicht 2,7), sein Schmelzpunkt liegt bei 658°, der Siedepunkt bei 2270°. Die Farbe ist weiß; der Werkstoff ist schmiedbar, streckbar, hämmerbar und auch genügend gießbar und hat in seinen Eigenschaften manche Ähnlichkeit mit dem Kupfer. In Deutschland geht das Streben seit dem Weltkrieg dahin, Aluminium oder seine Legierungen möglichst viel an Stelle des insbesondere von Nordamerika eingeführten Kupfers zu verwenden. Aluminium wird bereits stark benutzt zur Herstellung von Kochgeschirr und anderen Haushaltsgegenständen, Gärbottichen, Milchversandbehältern,

Verdampfern, Schmelzkesseln, sodann in der Automobil- und Flugzeugindustrie, in letzteren Fällen wie auch anderswo, oft in Form aluminiumreicher Legierungen; es hat eine starke Wärmeleitfähigkeit und eine große Verwandtschaft zum Sauerstoff. Letzte erschwert das Schweißen deswegen, weil das sich bildende Aluminiumoxyd einen viel höheren Schmelzpunkt (etwa 2050°) hat als Aluminium. Die beim Schweißen an der Oberfläche des Metalls sich absetzenden Oxydteilchen bilden ein derart widerspenstiges Häutchen, daß eine brauchbare Schweißung ohne Zerstörung der Oxydhaut unmöglich ist. Erst die Erfindung geeigneter Schweißmittel, die sich mit dem Aluminiumoxyd zu einer leichtflüssigen Schlacke verbinden, hat daher eine gute Aluminiumschweißung möglich gemacht.

Die Zugfestigkeit von gegossenem Aluminium beträgt 9...12 kg/mm², von Walzwerkstoff weichgeglüht, 7...9 kg/mm² (Dehnung 25 vH), halbhart 9 bis 11 kg/mm² (Dehnung 10 vH) und hart 11...13 kg/mm² (Dehnung 6 vH).

Aluminiumlegierungen. Das Normblatt DIN 1713 umfaßte bisher 8 Gattungen von Knetbaren und 8 Gattungen von Guß-Legierungen. In der Neuausgabe vom Juni 1941 enthält DIN 1713, Blatt 1 nur noch 6 Gattungen. Ein Teil der Legierungen ist vergütbar (veredelbar) oder wie man jetzt allgemein sagt, aushärtbar. Diese Aushärtung besteht in einer Erhitzung auf 500...560° und darauf folgender genügend schneller Abkühlung. Anschließend härten die Legierungen entweder selbsttätig durch mehrtägiges Lagern bei Zimmertemperatur aus (erstmalig 1909 von Wilm beim Duralumin durchgeführt) oder sie müssen bis zu 8 Tage lang auf 125...170° angelassen werden. Bei der ersten Erhitzung findet eine Auflösung der Aluminiumzusätze zu Mischkristallen statt. Die anschließende Aushärtung erklärt man sich durch Ausscheidung bestimmter Kristallarten während des Lagerns in so fein verteilter Form, daß dadurch die Festigkeitseigenschaften besonders günstig beeinflusst werden.

Über die große Zahl der Aluminiumlegierungen kann im folgenden nur das Wichtigste gesagt werden.

A. Knetlegierungen. Die zunächst benannten Legierungssorten sind aushärtbar. Hierher gehören die Gattung Al-Cu-Mg mit 2,5...5,0 vH Cu und 0,2...2,5 vH Mg (neben bis zu 1,5 vH Si und 0,3...1,5 vH Mn); die Gattung Al-Cu-Ni mit 3,5...4,5 vH Cu, 1,8...2,2 vH Ni und 1,3...1,8 vH Mg und die Gattung Al-Mg-Si ohne Kupfer mit geringem Magnesium- und Siliziumgehalt (0,3...1,5 vH Mg, 0,2...1,5 vH Si und 0...1,5 vH Mn). Die Festigkeiten dieser Legierungen schwanken zwischen 11 und 58 kg/mm², je nach dem Grade der Aushärtung und Kaltverfestigung. Zur Gattung (Sorte) Al-Cu-Mg, die besonders hohe Festigkeit hat, gehören z. B. Duralumin, Aludur, Bondur, Silal usw. Die zur Gattung Al-Cu-Ni gehörigen Legierungen, z. B. Duralumin W und Leg. Y, zeichnen sich durch hohe Warmfestigkeit aus. Die zur Gattung Al-Mg-Si gehörigen Legierungen haben neben guter Korrosionsbeständigkeit den Vorzug guter Verform- und Polierbarkeit; zu nennen sind beispielsweise Aludur 533, Legal, Anticorodal, Pantal, Aldrey, Ulmal.

Die folgenden Gattungen sind nicht aushärtbar, dagegen alle von höherer Festigkeit (10...46 kg/mm²) als Reinaluminium und von hoher Korrosionsbeständigkeit, teils auch gegen Seewasser. Die Gattung Al-Mg mit 2,5...10 vH Mg neben kleinen Mengen von Mn, Zn und Cr ist vertreten durch: Hydronalium, BS-Seewasser, Duranadium, Peraluman 7 und Heddronal. Mittleren Magnesiumgehalt (1,5...2,5 vH) neben 1...2 vH Mn und 0...0,2 vH Sb hat die Gattung Al-Mg-Mn, zu der KS-Seewasser und Peraluman gehören. Endlich ist die Gattung Al-Mn eine solche mit geringem Manganengehalt (1...2 vH). Ihr gehören an: Mangal, M 115, Aluman (AW 15), Silal K, Wieromal, Heddal und MN 20.

Der Schmelzpunkt dieser Legierungen liegt zwischen 570° und 650° . Wie im Abschnitte „Nichteisenmetallschweißung“ noch näher ausgeführt wird, sind einige dieser Legierungen nur in beschränktem Maße, die meisten aber gut schweißbar.

B. Gußlegierungen. Sie sind in DIN 1713, Blatt 2 vom Dezember 1941 neu genormt. Die Legierungen G-Al-Si (mit 0,3...0,45 vH Mn und 11...13,5 vH Si), G-Al-Si-Cu (mit 0,7...1,0 vH Cu, 0,3...0,45 vH Mn, 11...13,5 vH Si) und G-Al-Si-Mg (mit 0,2...0,5 vH Mg, 0,3...0,45 vH Mn, 11...13,5 vH Si) sind nicht aushärtbar, die Legierungen G-Al-Mg 3...7 (mit hauptsächlich 1,8...7,5 vH Mg), G-Al-Mg-Si und G-Al-Cu-Ni sind aushärtbar. Hinsichtlich der auch hierher gehörenden Legierungen G-Al-Zn-Cu, G-Al-Cu-Zn, G-Al-Cu-Si und G-Al-Si 10 (Deutsche und amerikanische Legierung usw.) wird vorbehaltlich einer späteren DIN-Normung auf das Heeresgeräte-Normblatt HgNE 12239 verwiesen. Bei unbehandeltem Sand- und Kokillenguß liegt die Zugfestigkeit bei 11...26 kg/mm², die Dehnung bei 0,5...8 vH, bei ausgehärtetem Sand- und Kokillenguß liegt die Zugfestigkeit bei 14...34 kg/mm², die Dehnung bei 0,3...8 vH.

Magnesium und seine Legierungen. Magnesium ist ein weißes, rein deutsches Heimmetall (aus Magnesit, Dolomit gewonnen) und noch leichter als Aluminium (spezifisches Gewicht 1,74). Sein Schmelzpunkt liegt bei 650° , der Siedepunkt bei 1107° . Reine Magnesium wird technisch noch wenig, hauptsächlich als Leitwerkstoff für Sammelschienen, verwendet.

Die demgegenüber schon viel benutzten Magnesiumlegierungen sind in DIN 1717 genormt. Die Knetlegierungen Mg-Al 3, Mg-Al 6, Mg-Al 9 haben 3 bzw. 6 bzw. 9 vH Aluminiumzusatz, Mg-Zn hat 4...5 vH Zn und Mg-Mn enthält 1...2,5 vH Mn. Ihre Zugfestigkeit beträgt ohne Wärmebehandlung 24 bis 37 kg/mm², ausgehärtet bis 43 kg/mm² bei Dehnungen von 1...18 vH. Die Gußlegierungen G Mg-Al und G Mg-Al-Zn enthalten bis 11 vH Al, bis 3,5 vH Zn und bis 0,5 vH Mn; G Mg-Mn hat nur 1...2,5 vH Mn und G Mg-Si nur 0,5...2 vH Si. Die Zugfestigkeiten liegen hier bei 8...24 kg/mm². Die Magnesiumlegierungen sind hauptsächlich unter den Bezeichnungen Elektron und Magnewin (seltener Magnesal und Magnedur) im Handel.

Reine Magnesium und alle seine Legierungen sind zwar widerstands-, nicht aber lichtbogenschweißbar. Gut schweißbar ist insbesondere die Knetlegierung Mg-Mn und die Gußlegierung Mg-Mn (Handelsbezeichnung AM 503). Die oft erwähnte Brennbarkeit des Magnesiums und seiner Legierungen ist bei Werkstücken wegen der guten Wärmeleitfähigkeit gering. Dagegen können sich Späne und Staub bei unvorsichtiger Bearbeitung leicht entzünden. Magnesiumbrände¹ sind keinesfalls mit Wasser zu löschen, da sich das Wasser unter Wasserstoff- (Stichflammen-) Bildung zersetzt, vielmehr mit Graugußspänen oder trockenem Sand oder der Löschflüssigkeit Magnexin.

Blei. Handelsblei hat 99,99 vH Blei, ist also sehr rein. Seine Farbe ist bläulich-weiß, sein Schmelzpunkt liegt bei 327° , sein Siedepunkt bei 1750° . Seine Zugfestigkeit beträgt nur 2...3 kg/mm² bei 40...50 vH Dehnung, es ist also sehr weich. Bleidämpfe sind giftig. Bleischweißer müssen daher Atmungsmasken (Respiratoren) tragen. Blei ist nur beschränkt widerstandsschweißbar. Für die Lichtbogenschweißung kommt nur der Kohlebogen in Frage.

Zink. Das Normblatt DIN 1706 sieht vor: Feinzink in 6 Abstufungen mit 99,5...99,995 vH Zink, raffiniertes Hüttenzink in 3 Abstufungen mit 98,5...99,0 vH Zink, Hüttenroh-zink mit 97,5 vH Zink und Umschmelzzink (aus Abfällen) mit

¹ Siehe Sicherheitsvorschriften für Magnesiumlegierungen vom 28. Juli 1938. (Deutscher Reichsanzeiger vom 5. 8. 1938.)

96...98,5 vH Zink. Die Farbe des Zinks ist bläulichweiß, sein Schmelzpunkt liegt bei 419° , sein Siedepunkt schon bei 907° . Der Beginn des Verdampfens liegt aber schon bei 500° , was auch für die Messinglegierungen von Bedeutung ist. Die Zugfestigkeit von Gußzink beträgt nur $2\cdots 3 \text{ kg/mm}^2$ (Dehnung fast 0), bei Preß- oder Walzzink dagegen $14\cdots 18 \text{ kg/mm}^2$ (Dehnung $20\cdots 60 \text{ vH}$ bei Preßzink, $20\cdots 35 \text{ vH}$ bei Walzzink). Das spröde gegossene Zink wird bei $90\cdots 120^{\circ}$ und bei $140\cdots 170^{\circ}$ gut walzbar und preßbar, bei 200° ist es wieder spröde mit Ausnahme des sehr reinen Elektrolytzinks, das noch bis 250° walzbar ist. Auch Zink ist nur widerstands-, nicht aber lichtbogenschweißbar.

Monelmetall. Dies ist eine Natur-Nickellegierung, d. h. die Grundstoffe (67 vH Nickel, 28 vH Kupfer und 5 vH Mangan und Eisen) sind schon im Erz in dieser Zusammensetzung vorhanden. Es ist sehr witterungsbeständig und bearbeitbar wie Kupfer, sein Schmelzpunkt liegt bei 1360° .

Silber, Gold, Platin. Silber schmilzt bei 961° und hat von allen Metallen die größte Leitfähigkeit für Wärme und für Elektrizität. Gold schmilzt bei 1063° und Platin bei 1774° . Alle drei Edelmetalle sind infolge ihres geringen Oxydationsvermögens zwar gut autogen und widerstandsschweißbar, jedoch nicht mit dem Lichtbogen.

II. Die Widerstandsschweißverfahren.

A. Allgemeines.

Grundsätzliches. In dem Abschnitt „Einleitung“ sind die drei Widerstandsschweißverfahren Stumpf-, Punkt- und Nahtschweißung im Grundsätzlichen bereits erläutert worden. Die Widerstandsschweißung dient der Massenfertigung und Massenviederherstellung mannigfachster Werkstücke, so daß Sonderbauarten von Widerstandsschweißmaschinen recht häufig sind. Trotzdem haben sie einen gemeinschaftlichen Charakter und Grundaufbau. Sie werden nur mit Wechselstrom gespeist und besitzen deshalb ausnahmslos einen Umspanner, der im Maschinengehäuse untergebracht ist und durch Anzapfungen auf der Hochspannungsseite geregelt wird.

Zu dem elektrischen Teil gehören ferner die Stromzuführungen vom Umspanner zu den Einspannwerkzeugen, die Stromschalter und -unterbrecher, die Schweißstrombegrenzer oder elektrische Steuerungen für vollselbsttätigen Betrieb, sowie der Rollenantrieb, bei größeren Maschinen der motorische Antrieb für das Einspannen und Druckgeben.

Zum mechanischen Aufbau gehören: Maschinengehäuse oder -gestell; Einspannböcke oder Elektrodenarme; Elektroden in Form von Blöcken, Stiften oder Rollen; die mechanischen Staucheinrichtungen mit Übertragungsorganen; Hand- und Fußhebeln; Preßluft- oder Öldruckeinrichtungen. Die Abmessungen und Formen sowie der Zusammenbau der genannten Teile richten sich nach den Werkstücken, die auf der jeweiligen Maschine zu schweißen sind.

Das Widerstandsschweißen verlangt nur ein kurzes Anlernen des Schweißers und keine längere Ausbildung wie die Lichtbogenschweißung. Dafür aber müssen mehr technische Überlegungen angestellt werden hinsichtlich der Formgebung und Vorbereitung des Werkstücks, der Umgestaltung der Einspannwerkzeuge, der Bestimmung der Einspannlängen sowie der schweißtechnischen Betriebsbedingungen ganz allgemein (z. B. Druck, Zeit, Leistung).

Netzanschluß der Maschinen. Alle Widerstandsschweißmaschinen werden an ein Wechselstromnetz, bei Drehstrom zwischen zwei Phasen (Abb. 30) bzw.

zwischen eine Phase und den Nulleiter angeschlossen. Mehrere Maschinen werden sinngemäß auf die drei Netzphasen gleichmäßig verteilt. Steht nur Gleichstrom zur Verfügung, dann muß dieser durch einen Motorgenerator oder einen Einanker-

umformer in Wechselstrom umgeformt werden. Fehlt ein Stromnetz gänzlich, so wird die Aufstellung einer besonderen Wechselstrom-Erzeugungsanlage notwendig.

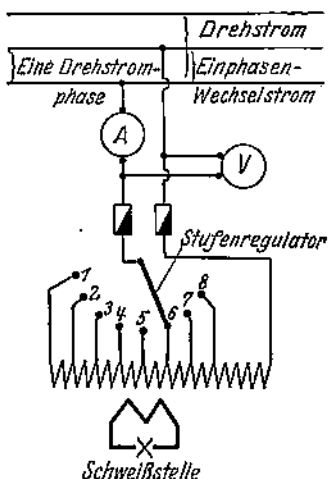


Abb. 30. Regelung durch achtstufigen Hebel-schalter.

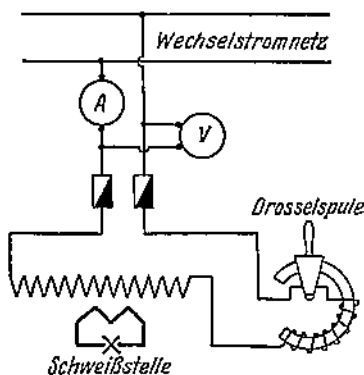


Abb. 31. Regelung durch Drosselspule.

Regelung der Maschinen. Sie beruht meist auf dem Ab- und Zuschalten von Primärwindungen (Hochspannungsseite) des Umspanners (Abb. 30) im Leerlauf, aber nie bei Belastung, und zwar stufenweise mit Steckern oder Schaltwalzen. Eine stufenlose genauere, indessen verlustreichere Einstellung des Stromes gestatten Drosselspulen (Abb. 31). Normalerweise soll die Regelung mittelgroßer Maschinen bis zu ein Zehntel der Höchstlast möglich sein.

Bauarten. Mit Rücksicht auf die Vielgestaltigkeit der Bauarten, die nach den verschiedensten Gesichtspunkten, vor allem hinsichtlich ihrer mechanischen Einrichtungen, abwandelbar sind, können hier nur einige der meist angewendeten Grundformen besprochen und bildlich betrachtet werden.

B. Stumpfschweißung.

1. Schweißbarkeit der Metalle.

Schweißbare Metalle. Die elektrische Stumpfschweißung, und zwar sowohl die gewöhnliche, die sog. „Wulststumpfschweißung“ als auch ihre Abart, die „Abbrennschweißung“, ist anwendbar für die Schweißung von: Stahl, Stahlguß, Temperguß, Kupfer, Messing, Bronze, Zink, Aluminium und die Mehrzahl seiner Legierungen und für die Edelmetalle, jedoch nicht für Gußeisen. Unter diesen Metallen kommt naturgemäß die Schweißung des Stahles in erster Linie in Frage. In einigen Fällen läßt die Stumpfschweißung eine Verbindung zwischen zwei ungleichartigen Metallen zu, strenggenommen eine Hartlötung ohne Zusatz.

Hauptanwendungsgebiete. Die elektrische Stumpfschweißung erstreckt sich ausschließlich auf Massenwaren, da jede Formveränderung des Schweißgutes auch eine Änderung der Einspannvorrichtung der Maschine bedingt und die verschieden großen Querschnitte ganze Reihen von Maschinen oft sehr unterschiedlicher Leistung erfordern. Auf Stumpfschweißmaschinen werden geschweißt:

Massenteile der gesamten Draht-, Kleisen- und Schwerindustrie; Stab- und Formstahl; Ketten und Schnallen; Rohre u. a. m.

Grenzen der Schweißquerschnitte. Als untere Grenze der Schweißbarkeit überhaupt kann eine Querschnittsfläche von etwa $0,07 \text{ mm}^2$ gelten, die einem Draht von $0,3 \text{ mm}$ Durchmesser gleichkommt. Die obere Grenze wird durch die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens und die erforderlichen großen Stromstärken bestimmt. Sie dürfte für Stahl bei etwa 40000 mm^2 Querschnitt gelegen sein, was einem Rundeisen von etwa 225 mm Durchmesser entspricht. Für Kupfer, das infolge seiner hohen elektrischen und Wärmeleitfähigkeit viel größere elektrische Leistungen als der Stahl erfordert, kann die obere Grenze der Schweißbarkeit mit 2000 mm^2 Querschnitt angenommen werden, entsprechend einem Rundkupferdurchmesser von etwa 50 mm .

2. Stumpfschweißmaschinen.

Normale Maschinen. Eine Stumpfschweißmaschine für 125 kVA Höchstleistung und für Querschnitte bis zu 5000 mm^2 veranschaulicht Abb. 32. Auf dem Maschinengehäuse, in dem der Umspanner untergebracht ist, sitzt links der feststehende Einspannbock, während der rechte durch die Staucheinrichtung in der Waagerechten bewegt werden kann. Die unteren Spannbacken (Klemmbacken oder Elektroden) sind feststehend, die oberen durch die beiden Handräder senkrecht verstellbar. Der rechte Einspannbock wird in waagerechter Richtung durch spiralverzahnte Kegelräder bewegt, die durch ein stark übersetztes Handrad (Handstern oder Stauchrad) betätigt werden. Die nicht sichtbare, gegen Verspritzen verdeckte Stromzuführung zu den Backen verläuft über bewegliche Kupferdrahtseile oder Bündel von luftgekühlten dünnen, aber breiten Kupferstreifen. Durch Fußhebelbetätigung (Anordnung der Hebel im Bild rechts unten) wird der Schweißstrom ein- und ausgeschaltet.

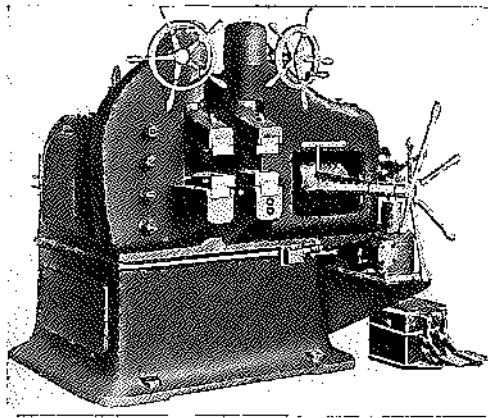


Abb. 32. Größere Stumpfschweißmaschine.

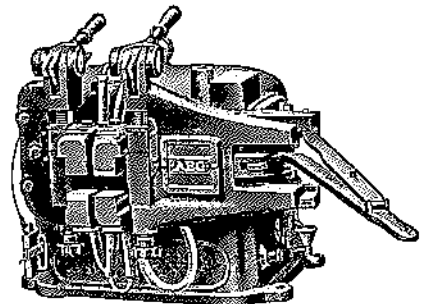


Abb. 33. Kleine Tisch-Stumpfschweißmaschine.

Eine Stumpfschweißmaschine kleinerer Bauart für eine Leistungsaufnahme von $8 \cdots 10 \text{ kVA}$ ist in Abb. 33 dargestellt. Im Gegensatz zur vorigen Maschine hat diese eine Schnellspannvorrichtung aus Handhebeln mit Exzentern.

Kettenschweißmaschine. Unter den Sonderbauarten kommt der Kettenschweißmaschine Bedeutung zu. Die Kettenglieder werden auf selbsttätig arbeitenden Biegemaschinen bis zur fertig verhängten Kette vorgebogen und so der Schweißmaschine zugeführt. Die Arbeitsweise ist in Abb. 34 in der Grundform dargestellt. Zwei Elektroden führen den Strom zu und drücken den Spalt des

vorgebogenen, an einem Gegendrucklager aufliegenden Gliedes zusammen. Neben Handkettenschweißmaschinen und halb selbsttätigen gibt es auch voll selbsttätige Maschinen, bei denen Schweißen, Stauchen, Fortbewegen der Glieder, Abdrücken des Stauchwulstes und Kalibrieren selbsttätig erfolgen.

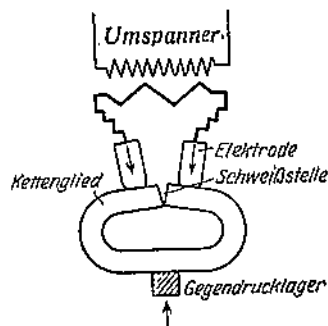


Abb. 34. Grundform der Ketten-schweißung.

Universalmaschinen. In Anpassung an die vielseitigen Bedürfnisse der Praxis sucht man hin und wieder die günstigsten Ausführungsformen elektrischer Stumpfschweißmaschinen in sog. Universalmaschinen zu vereinigen. Man nimmt eine über dem Umspannergestell angeordnete Deckplatte, auf der alle Einspann-, Schweiß-, Stauch- und u. U. auch Abgratvorrichtungen Platz finden und durch wenige Handgriffe ausgewechselt werden können.

Einspannvorrichtungen. Den wichtigsten Bestandteil der Einspannvorrichtung bilden die Einspann- oder Klemmbacken, auch Elektroden genannt, weil sie gleichzeitig die Enden der Stromzuführung zum Werkstück darstellen. Metallart, Form und Größe des Schweißgutes bestimmen die Beschaffenheit der Einspannbacken, die infolgedessen sehr vielgestaltig sind und auswechselbar sein müssen.

Alle elektrischen Widerstandsschweißmaschinen — mit Ausnahme solcher von geringer Leistungsaufnahme — erfordern eine gute Kühlung der Elektroden durch fließendes Wasser. Deshalb sind sie als Hohlkörper ausgebildet, deren Hohlräume oder Kanäle ständig von Wasser durchflossen werden, da insbesondere bei starkem Betrieb eine unzulässig hohe Wärmeableitung in das Maschineninnere und ein Abschmelzen oder Verformen der Elektrodenbacken verhindert werden muß. Je nach Größe und Beanspruchung der Maschine sind 5...3000 l Kühlwasser in der Stunde notwendig. Um eine wirksame Kühlung des Umspanners herbeizuführen, wird vielfach das Kühlwasser durch Bohrungen im Umspannerkern geleitet. Die Temperatur des abfließenden Wassers soll 60° nicht überschreiten, um Kesselsteinbildung zu vermeiden.

Als Werkstoffe der Elektroden verwendet man vorteilhaft Legierungen des Kupfers mit Silber oder Beryllium (0,5 vH), auch geschmiedete Siliziumbronze usw.,

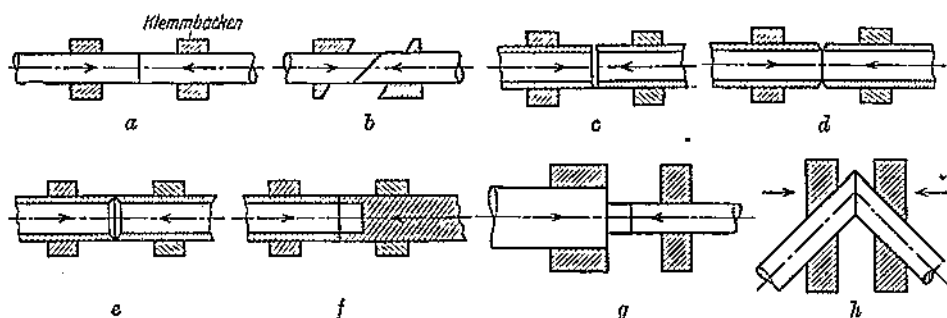


Abb. 35. Ausführungsformen von Klemmbacken.

wobei allerdings die elektrische Leitfähigkeit nicht merklich herabgesetzt werden darf. Auch Hartkontaktmetalle, z. B. Elkonite und Wolkumit (mit Wolfram legiert) werden in Form von Plättchen auf die Elektroden hart aufgelötet.

Einige Skizzen kennzeichnender Ausführungsformen von Klemmbacken dürften ausreichend sein, um die mannigfache Formgestaltung der Einspannbacken zu erkennen. Die Skizzen a bis h in Abb. 35 sind als Darstellung im Grundriß bzw. Aufriß aufzufassen. Die gebräuchlichste, für jede gewöhnliche Schweißung geeignete Konstruktion zeigt a. Skizze b veranschaulicht die Anordnung bei Schrägstoß, c beim Schweißen rohrförmiger Querschnitte. Die Skizzen d, e, f und g beziehen sich auf die Vorbereitung der Schweißstücke. Skizze h kennzeichnet die Anordnung beim Schweißen auf Gehrung, wobei die Stäbe um 45° gegen die Maschinenachse geneigt sind. Für die Stumpfschweißung von Rohrenden ist für jeden Durchmesser der Rohre ein entsprechender Satz Backen notwendig, in deren lagerschalenförmige Aushöhlung (Abb. 36) die Rohrdurchmesser genau hineinpassen. Flächenbacken würden infolge des Einspanndrucks ein Flachdrücken der Rohre verursachen. Bei Rohren größeren Kalibers und vor allem bei solchen von dicker Wandung kann man den Backen eine prismatische Aushöhlung geben, wie dies z. B. in Abb. 37 vorgeschlagen ist.

Die Stromzuführung soll möglichst durch die Mitte der Schweißfläche gehen, um den ganzen Querschnitt gleichmäßig auf Schweißtemperatur zu bringen. Meist sind nur die unteren Backen an den sekundären Stromkreis der Maschine angeschlossen, so, daß die Stromzuführung nach Art der Abb. 38 A von a nach a_1 erfolgt. Nach einem AEG-Patent ist bei Darstellung Abb. 38 B der Weg des Stromflusses von a nach a_1 diagonal. Die den Kupferbacken gegenüber liegenden stromlosen Backen werden als Stahlbacken ausgeführt. Vorteilhaft ist natürlich auch die Stromzuführung zu allen vier Backen, gegebenenfalls in doppeldiagonaler Stromzuführung (überkreuz), wie bei C. Bei Anwendung des später besprochenen Abbrennverfahrens dürfte übrigens die Stromzuführung zu den unteren Backen fast immer genügen.

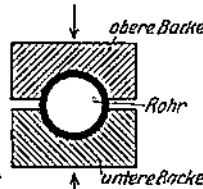


Abb. 36. Klemmbacken für Rohrschweißung.

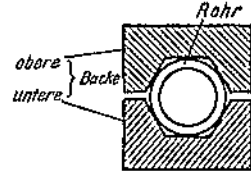


Abb. 37. Besondere Klemmbackenform für Rohre.

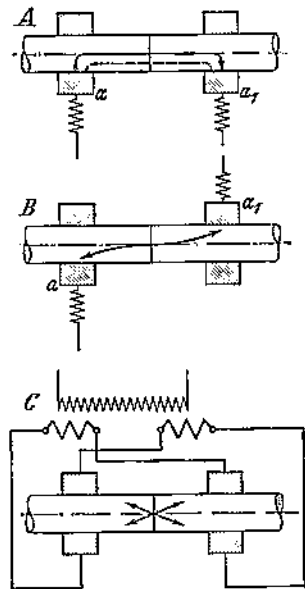


Abb. 38. Stromzuführung zu den Klemmbacken.

3. Die Technik der Stumpfschweißung.

a) Vorarbeiten.

Die Wulststumpfschweißung verlangt außer glatten Stoßflächen des Schweißgutes auch deren möglichst gleiche Größe, da sonst die Erhitzung des im Querschnitt schwächeren Teiles bis zur Verbrennung getrieben würde, bevor das dickere Stück auf Schweißhitze gebracht werden kann. Der dickere Querschnitt muß entweder vorgewärmt werden, was im Schmiedefeuer, auf elektrischen Erhitzungsmaschinen oder auf besonderen mit Vorwärmeumspannern ausgestatteten Schweißmaschinen, also im Vorwärme-Parallelstromkreis geschehen kann, oder

die ungleichen Querschnitte müssen an der Stoßfläche annähernd flächengleich gemacht werden. Man erreicht dies dadurch, daß man entweder absetzt oder zuspitzt (Zapfen *g* in Abb. 35, *e* und *h* in Abb. 39) oder indem man ausbohrt (Rohr an Rundstaben *f* in Abb. 35). Vielfach genügen kleine Sägeeinschnitte (*3* in

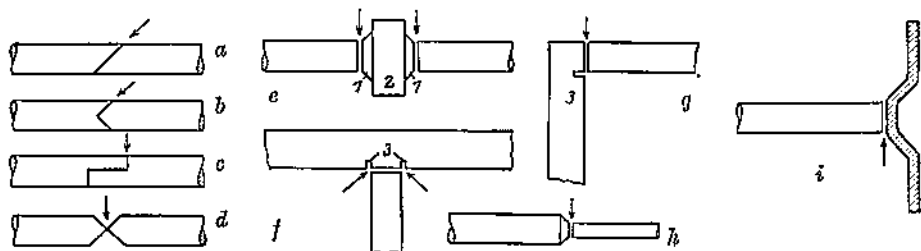


Abb. 39. Vorbereitungsarbeiten zur Stumpfschweißung.

Abb. 39f und g), um die Schweißhitze an der gewünschten Stelle zu stauen. Zur Verringerung des Stauchwulstumfangs sind Vorbereitungen im Sinne der Abb. 39a bis d möglich, aber weniger üblich. Da das Werkstück um die Stauchlänge und beim Abbrennverfahren auch noch um die Abbrennlänge verkürzt wird, muß es von vornherein um diesen Betrag länger zugeschnitten werden.

b) Das Schweißen selbst.

Vorzüge der Stumpfschweißung. Die Vorzüge liegen in der ständigen Betriebsbereitschaft, der Sauberkeit der Arbeit, im Ausschalten des Lufteinflusses auf die erhitzten Teile, im Erwärmen von innen heraus und in verschiedenen anderen Umständen begründet. Trotz der überaus hohen Stromstärke besteht für den Schweißer keine Gefahr, da ja nur niedrige Spannungen (normal kaum über 5 V) in Frage kommen. Die den Primärstrom führenden Teile sind ganz ins Maschineninnere verlegt, gegen das Maschinengehäuse überall gut isoliert, und dieses selbst wird gut geerdet.

Höhe der Erhitzung. Da der spezifische Widerstand des Schweißgutes mit wachsender Temperatur zunimmt, verbreitet sich die Schweißhitze rasch über die ganze Stoßfläche. Um die Wärmeverluste auf ein erträgliches Maß zu vermindern, muß die Schweißzeit so kurz wie möglich gehalten werden. Dem Umstand, daß die Erhitzung, wie bereits betont, von innen nach außen erfolgt, also gerade umgekehrt wie bei allen übrigen Schweißverfahren, ist eine gute Schweißung zu verdanken. Doch soll auf Sauberkeit der Einspannstellen (Kontaktflächen) geachtet werden, da sonst bei den niedrigen Schweißspannungen der Stromübergang behindert wird. Bei von Hand bedienten Maschinen ist besonders die richtige Schweißhitze gut abzuspassen, und das Ausschalten des Stromes bzw. der Eintritt der Stauchung muß im richtigen Augenblick erfolgen, wenn ein Verbrennen des Werkstoffs verhütet werden soll. Die Wahrscheinlichkeit einer Überhitzung oder sogar einer Verbrennung ist bei selbsttätig arbeitenden Maschinen sehr gering, weil im Augenblick des Eintritts der Schweißwärme Stauchung und Stromöffnung von selbst einsetzen und nicht von der Aufmerksamkeit des Schweißers abhängen.

Leistungsaufnahme, Schweißdauer, Stromverbrauch¹. Da jede Schweißmaschine nur für einen bestimmten Stromstärkebereich eingerichtet ist, werden für verschiedene Werkstoffdicken und Metalle auch Maschinen verschiedener Leistungsaufnahme benötigt. Weiter ist mit Rücksicht auf Wärme- und Stromverlust ein

¹ Siehe Rietsch: Stand der Widerstandsschweißtechnik. Z. VDI 1935 Nr. 29.

weicher Stahl und weicher Stahl, $l = 1,4d$; $l/2 = 0,7d$ (Abb. 40 I),

m + m_1

harter Stahl und harter Stahl $l = 1,2d$; $l/2 = 0,6d$ (Abb. 40 I),

m + m_1

weicher Stahl und harter Stahl $l_1 = 2,1d$: a (harter Stahl) $= 0,6d$,

m_3 + m_2 b (weicher Stahl) $= 1,5d$ (Abb. 40 II),

Kupfer und Kupfer, $l = 4d$; $l/2 = 2d$ (Abb. 40 I),

m + m_1

Messing und Messing $l = 3d$; $l/2 = 1,5d$ (Abb. 40 I),

m + m_1

weicher Stahl und Kupfer $l_2 = 2,5d$; a_1 (weicher Stahl) $= 0,7d$,

m_5 + m_4 b_1 (Kupfer) $= 1,8d$ (Abb. 40 III).

Daraus geht hervor, daß schlecht stromleitende Metalle kürzer, gut leitende jedoch länger eingespannt werden müssen. Wegen seiner hohen elektrischen Leitfähigkeit muß Kupfer in der in Abb. 40 III angedeuteten Weise (bei m_4) am

Ende konisch verjüngt werden. Überdies ist die Einspannlänge von nicht zu unterschätzendem Einfluß auf den Stromverbrauch. Dies zeigt Abb. 41, die die Leistungsaufnahme und die Schweißdauer in Abhängigkeit von verschiedenen Einspannlängen wiedergibt. Der Aufzeichnung liegt die Schweißung eines 12×12 mm Quadratstahls (also 144 mm^2 Querschnittsfläche) zugrunde.

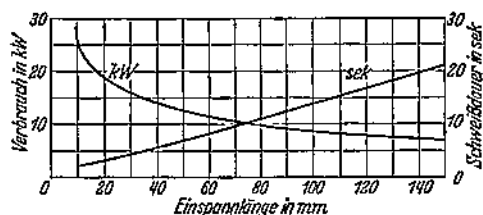


Abb. 41. Leistungsaufnahme und Schweißdauer bei verschiedenen Einspannlängen.

Verschweißen ungleicher Metalle. Die Verbindung von gewöhnlichem Stahl mit Edelstahl, Messing und Neusilber gelingt ziemlich einwandfrei, während Stahl mit Kupfer nur eine wenig feste Verbindung ergibt. Geeignete Schweißpulver oder Flußmittel sind bei der Vereinigung von Nichteisenmetallen empfehlenswert.

Schweißen der verschiedenen Metalle. Mit Rücksicht auf die Gefahr der Entkohlung muß harter Stahl sehr vorsichtig behandelt und darf nicht überhitzt werden. Ein Vorwärmen außerhalb der Maschine auf $350 \dots 400^\circ$ ist empfehlenswert, ebenso langsames Abkühlen.

Da Kupfer kurz vor seinem Schmelzpunkt spröde und brüchig ist, darf der Stauchdruck nur mäßig sein. Das Kupferoxyd wird an der Schweißstelle am besten durch Hämmern der erkalteten Schweiße entfernt, was außerdem eine Festigkeitssteigerung infolge Strukturverfeinerung bewirkt.

Auch Messing erfordert eine große Leistungsaufnahme und damit einen hohen Stromverbrauch, der sich dem für Kupfer nähert. Dies kommt daher, daß der Widerstand des Messings mit zunehmender Temperatur sich nur wenig erhöht. Für den Erfolg der Messingschweißung sind vor allem die Legierungsbestandteile ausschlaggebend. Im allgemeinen nimmt die Schweißbarkeit mit wachsendem Zinkgehalt ab. Messing wird im rotwarmen Zustande leicht brüchig und rissig. Ein ähnliches Verhalten zeigt Bronze. Doch lassen sich Bronzedrähte, nicht aber Bronzezug verhältnismäßig gut schweißen. Auch einige andere Legierungen des Kupfers, z. B. Neusilber, Pakfong, Alfenide, lassen sich stumpfschweißen.

Während die Punktschweißung bei der Verbindung von Leichtmetallen bereits im größeren Umfange praktisch Anwendung findet, trifft dies für die Stumpfschweißung nur in geringem Maße zu. Die Schwierigkeit beruht auf der stark hinderlichen Oxydbildung und der geringen Festigkeit erhitzten Aluminiums, das selbst bei kurzer Einspannung leicht ausweicht. Zur Zeit können mit einiger Sicherheit Stumpfschweißungen (nicht Abbrennschweißungen) an Querschnitten von 1...200 mm² ausgeführt werden¹.

Die Edelmetalle Gold, Silber und Platin sind ziemlich gut schweißbar. Die Schweißung von Ketten, Ringen, Ösen, chirurgischen Instrumenten, wie Pinzetten, Kapseln u. dgl., aus diesen Metallen verursachen keine Schwierigkeiten. Dasselbe gilt für Zink, doch ist bei diesem Metall der Eintritt der Schweißwärme schwer feststellbar, weshalb die Regelung des Stromes mit großer Sorgfalt erfolgen muß. Blei kommt für die Widerstandsschweißung kaum in Frage. Rohre aus diesem Werkstoff werden, wenn überhaupt, nach Art der Abb. 39 d und e zur Schweißung vorbereitet.

Der durch das Stauchen der Teile entstehende Wulst (Abb. 42), d. i. die Verdickung an der Schweißstelle, die an sich eine Verstärkung bedeutet, muß in vielen Fällen nach beendeter Schweißung wieder entfernt werden. Wie in Abb. 39 a...d gezeigt wurde, kann sie bei kleineren Gegenständen durch zweckmäßige Formgebung der Schweißenden nahezu vermieden oder dort, wo sie nicht störend wirkt, wie bei Vieh- und Handelskettengliedern, belassen werden. Der Wulst kann auch durch Hämmern in der Schweißhitze, u. U. im Gesenk oder in einer besonderen Wulstpresse, z. B. in Verbindung mit Kettenschweißmaschinen, beseitigt werden. Andererseits sind mit dem Pressen der Wulst gewisse Gefahren verknüpft, die bei einer druckfreien Entfernung auf kaltem Wege, durch Drehen, Schleifen, Schmirgeln oder Feilen, nie zu befürchten sind.

Nach dem Wulststumpfschweißverfahren lassen sich hauptsächlich nur Arbeitsstücke von rundem oder quadratischem Querschnitt schweißen. Schwierige Querschnitte, wie Formstähle, Felgen, Schienen u. dgl., sind infolge ungleicher Massenverteilung, unregelmäßig am Stoß erhitzt, nur sehr schlecht schweißbar. Diese Nachteile treten bei dem Abbrennverfahren² nicht auf, weshalb dieses heute in der Mehrzahl der Fälle auch für größere runde und quadratische Querschnitte bevorzugt wird.

c) Das Abbrennverfahren.

Arbeitsvorgang. Das Abbrennverfahren unterscheidet sich von dem älteren Wulstschweißverfahren dadurch, daß der Strom bereits eingeschaltet wird, bevor die Teile sich berühren. Mit Hilfe einer Schlittenführung wird durch mehrmaliges Nähern und Entfernen der Stoßflächen ein Funkensprühen erreicht, das schließlich in einen den ganzen Querschnitt umfassenden Feuerregen übergeht, so daß der Werkstoff an den Stoßflächen hochoverhitzt und verflüssigt in Form glühender Teilchen ausgeschleudert wird. Ist die erforderliche Schweißglut sowie das Stauchmaß durch Nachschieben von Werkstoff erreicht, so werden

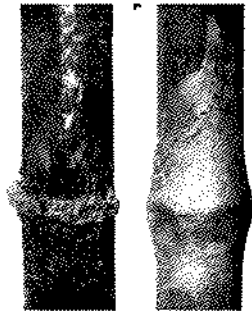


Abb. 42. Wulst beim Stumpf- und Grat beim Abbrennschweißen.

¹ Siehe Anleitungsblätter für das Schweißen und Löten von Leichtmetallen. Berlin: VDI-Verlag 1940.

² Siehe Kilger: Fertigungstechnik und Güte abbrenngeschweißter Verbindungen. Braunschweig: Verlag Vieweg 1936.

die Schweißstücke unter Ausschaltung des Stromes mit kräftigem Stoß schlagartig zusammengepreßt. Da die Funken an hervorstehenden Teilen natürlich zuerst überspringen, schmelzen diese Stellen schnell ab, womit die saubere flächenplane Bearbeitung der Stoßflächen, wie sie beim Wulstschweißen erforderlich ist, fortfällt. Bei diesem Verfahren tritt infolge des Funkenausgleichs eine gleichmäßige

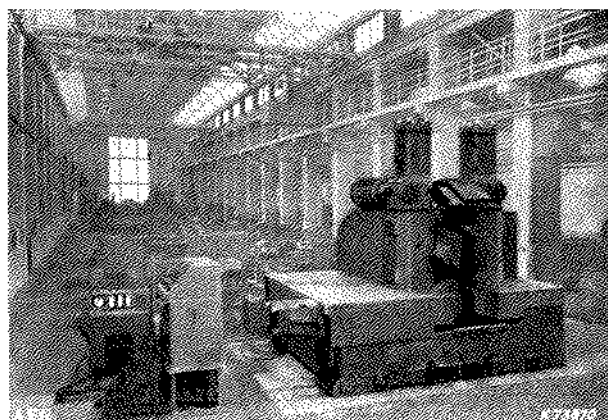


Abb. 43. Besonders große Abbrenn-Stumpfschweißmaschine.

Erhitzung über dünne und dicke Stellen ein, und da ferner der geschmolzene Werkstoff durch das schlagartige Vereinigen an der Stoßstelle herausgequetscht und die Erhitzung noch örtlicher gehalten wird als beim Wulstschweißen, so bildet sich nur ein geringer, das Abbrennverfahren kennzeichnender perlenartiger Grat. Abb. 42 zeigt nebeneinander den Stauchwulst der Stumpfschweißung und den nach dem Abbrennverfahren entstandenen viel kleineren

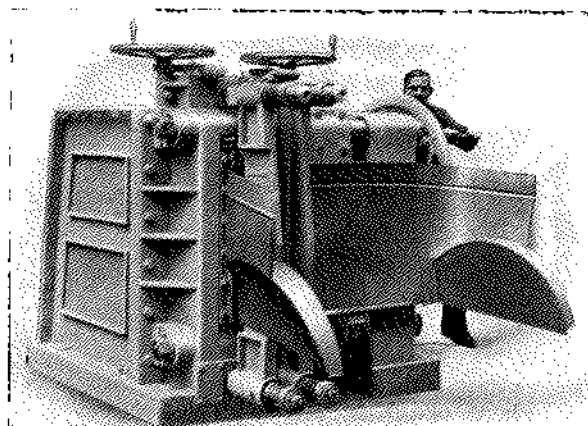


Abb. 44. Abbrennschweißen von Karosserierückwandnähten.

Grat. Die erhöhte Gefahr des Einpressens der aus der Schweißfuge herausgequetschten Werkstoff- und Schlackenteilechen verbietet die Entfernung des Grates durch Pressen vollkommen. Der Grat darf nur durch Meißeln oder sonstwie spanabhebend entfernt werden. Leistungsfähigkeit und Anwendungsgebiete. Das Verfahren ist heute auf fast jeder gewöhnlichen Stumpfschweißmaschine durchführbar. Im allgemeinen wird die Schweißung mit etwas höherer Spannung (bis 10 V) und geringerer Stromstärke ausgeführt; Stromverbrauch und Schweißzeit sind geringer, die Festigkeit der Schweißnaht ist höher als beim Wulstschweißen¹.

¹ Siehe Wilbert: Die Steuerung des Arbeitsvorganges bei der elektrischen Widerstandsschweißung. Elektroschweißg. 1936 Heft 12.

Dem Abbrennverfahren fällt auch das Gebiet des Vorschuhens von Rauch- und Siederohren zu. Zum Entfernen des im Rohrrinneren sich bildenden Stauchgrats dienen im Rohrlichten zentrisch geführte, fräserartige Ausstoßdorne. Die Entgratung geschieht am warmen Rohr. Während man die Schweißung kleiner Schnelldrehstähle auf gewöhnliche Stahlhalter nach dem normalen Stumpfschweißen ausführt, ist man dazu übergegangen, hochwertige Schneidwerkzeuge aller Art, überhaupt alle legierten Stähle nach dem Abbrennverfahren zu verbinden. Neuerdings werden auch Blechnähte größerer Längen abbrenngeschweißt. Eine solche Maschinenkonstruktion für senkrechte Einspannung und für die Schweißung von Karosserierückwandnähten veranschaulicht Abb. 44.

Die mannigfachen Vorteile der Abbrennschweißung haben die rasche Einführung dieses Verfahrens gefördert, und man kann behaupten, daß es schon heute die Bedeutung des Wulstschweißens überflügelt hat.

Elektroessen. Der Grundgedanke der Stumpfschweißmaschine wird auch zum bloßen Erhitzen, zum Stauchen und Pressen von Arbeitsstücken verwendet. Sollen Maschinen nur diesem Zwecke dienen, so bezeichnet man sie als „Elektroesse“ und gibt ihnen besondere Bauformen, unter denen der Niet erhitzer die meiste Verbreitung gefunden hat.

C. Punktschweißung.

1. Schweißbarkeit der Metalle.

Die Punktschweißung eignet sich hauptsächlich für die Verbindung dekapiert (d. h. entzunderter) Bleche. Doch läßt sich auch gewöhnliches Schwarzblech gut schweißen, wenn die Oberfläche nicht stark zundrig, verrostet oder sonstwie verunreinigt ist. Verunreinigte Bleche müssen vor der Schweißung gesäubert werden. Auch verzinktes, verzinnertes (Weißblech), verbleites oder sonstwie überzogenes Stahlblech ist punktschweißbar. Unter bestimmten Voraussetzungen können auch hochwertige Stahlsorten, die meisten Messinge, Kupfer, Walzbronze, Zink, Aluminium und seine Legierungen, Silber u. a. punktiert werden.

2. Punktschweißmaschinen.

a) Die elektrische Einrichtung der Maschinen.

Die elektrische Punktschweißung ist aus der Stumpfschweißung entstanden. Sie stellt eine punktweise Verbindung von flachen Metallteilen her und dient vor allem als Ersatz für das Nieten, weniger für das Falzen und Löten.

Schaltung und Stromzuführung. Wie Abb. 45 zeigt, ist sie die gleiche wie bei den Stumpfschweißmaschinen. Die Primärseite f des Umspanners läßt sich durch einen Stufenschalter g regeln.

h ist der Hebelschalter, i sind die Sicherungen und k ist das Wechselstromnetz, an das die Maschine bzw. der Umspanner angeschlossen ist. Die beiden an die Leitungsenden des Niederspannungskreises d angeschlossenen Elektroden b und c sind stabförmig. Zwischen ihnen wird das Schweißgut eingeklemmt. Nach Andrücken der Elektroden Spitzen gegen die Bleche a_1 und a_2 und Einschalten des Stromes fließt dieser durch die Bleche hin-

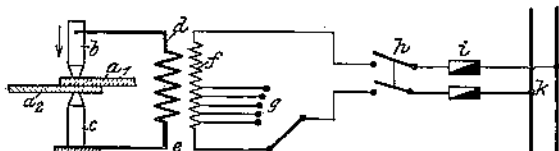


Abb. 45. Schaltung und Stromzuführung bei Punktschweißmaschinen.

durch und stellt einen Schweißpunkt her, dessen Durchmesser von dem der Elektrode und von der Blechdicke abhängig ist.

Die Maschinen sind so eingerichtet, daß durch Betätigung eines Fuß- oder Handhebels der obere bewegliche Hebelarm, der die Elektrode b trägt, zunächst ein Andrücken der Elektrode und Festlegen der beiden Bleche a_1 und a_2 bewirkt. Weiteres Durchdrücken des Hebels schließt den Stromschalter. Umgekehrt wird nach beendeter Schweißung zuerst der Strom ausgeschaltet und darauf das Blech freigegeben. Die Zeitfolge im Arbeitsgang muß auch beim Vorstellen der Ausladung und Hubhöhe der Elektrodenarme beibehalten werden, da sonst beim Schließen, besonders aber beim Öffnen des Stromkreises Schweißpunkt und Elektrodenfläche anschmoren.

b) Die mechanische Einrichtung der Maschinen.

Normale Maschinen. Eine Punktschweißmaschine einfacher Bauart und mittlerer Größe für etwa 20/10 kVA ist in Abb. 46 veranschaulicht. Oberhalb des Fußhebels, mit dem sie betätigt wird, befindet sich ein Stufenschalter mit drei Anzapfungen zur Stromregelung. Am unteren Elektrodenarm und an der oberen Elektrode sind die Kühlwasseranschlußstücken angebracht. In den T-förmigen Nuten der messingnen Stirnplatte an der Vorderseite wird der untere feststehende, jedoch gegen solche beliebiger Form und Ausladung auswechselbare Elektrodenarm befestigt. Darüber ist der in seiner Ausladung verstellbare und seitlich drehbare Oberarm, der durch den Fußhebel betätigt wird, angeordnet. Vorn an den Armen sind die axial genau übereinander stehenden kupfernen Elektroden sichtbar, die, weil mit normalem Morsekonus versehen, gegen solche verschiedener Formen leicht auswechselbar sind. Auf dem Oberarm sitzt das Relais, das den Schweißstrom begrenzt, zu dem noch der verdeckte Ausschalter rechts unten am Maschinengestell gehört.

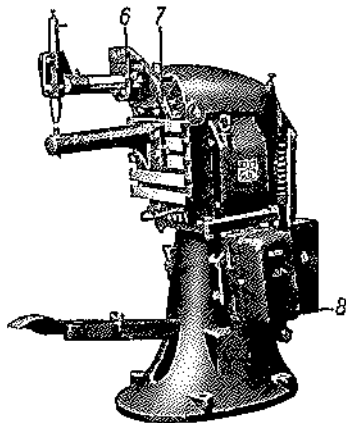


Abb. 46. Punktschweißmaschine mit Kontroller.

Sondermaschinen. Ein Aufschweißen von Stahlplättchen auf Dreh- und Hobelstäbe in jedem beliebigen Winkel gestatten sog. Edelstahlaufschweißmaschinen. Sondermaschinen sind auch die Schneltpunktschweißmaschine und die Mehrpunktschweißmaschine. Erste wird z. T. als Ersatz für die Nahtschweißmaschine verwandt und ist neben Hand- und Fußhebelbetrieb mit motorischem Antrieb ausgerüstet. Die Punkte können dadurch in sehr rascher Folge, bis zu drei Punkten je Sekunde, gesetzt werden. Die Arbeitsweise gleicht etwa der einer Nähmaschine; die schweren Elektrodenarme stehen während des Betriebes fest, und lediglich der obere Elektrodenkopf ist senkrecht beweglich. Entsprechend der Arbeitsgeschwindigkeit und meist großer Armausladung haben diese Maschinen für gleiche Blechdicken eine höhere Leistungsaufnahme als normale (etwa 60 kVA).

Mehrpunktmaschinen. Da das gleichzeitige Schweißen mehrerer Punkte, die in einem Stromkreis parallel liegen, nicht möglich ist, werden mehrere Elektrodenpaare zwar einzeln nacheinander, aber in rascher Folge (Folgeelektroden) in einem Stromkreis eingeschaltet. Für jeden Schweißpunkt ist ein Elektrodenpaar vorgesehen. Solche Mehrpunktmaschinen werden nur für bestimmte Werkstücke umfangreicher Massenfertigung als Einzelkonstruktion hergestellt.

Bei Doppelpunktschweißmaschinen trägt der obere Elektrodenarm zwei nebeneinander liegende, in ihrem Mittenabstand zwischen 20 und 100 mm verstellbare Elektroden *a* (Abb. 47); der Unterarm ist nur ein Gegenlager. Der Stromweg ist durch eine gestrichelte Linie angedeutet. Daraus ergibt sich, daß der Unterteil *c* beliebige Abmessungen haben kann und nur die Blechdicke *b* (praktisch mit 2 mm nach oben begrenzt) für die Leistung der Maschine maßgebend ist. Soll nur ein Punkt gesetzt werden, wie in Abb. 47 II bei *e* angedeutet, so dient die zweite Elektrode *f* als Blindelektrode mit großer Auflagefläche.

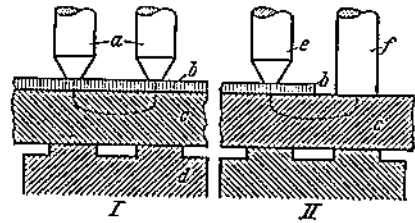


Abb. 47. Grundform der Doppelpunktschweißung.

Bewegliche Punktschweißmaschinen. Da große, sperrige Stücke, z. B. Autokarosserien, Wagenaufbauten usw., schwierig oder gar nicht an ortsfeste Punktschweißmaschinen herangebracht werden können, schafft man bewegliche Punktschweißmaschinen zu den Werkstücken. Bewegliche Punktiermaschinen bestehen aus dem Punktschweißzeug und einem damit durch Kabel verbundenen Schweißumspanner einschließlich Zubehörteilen. Der Umspanner ist mit Regler, Einschaltstutz, Schweißbegrenzer und Wasserüberwachungseinrichtung in einem Gestell oder Gehäuse zusammengebaut, das ortsfest, fahrbar oder auch als Laufkatze geliefert wird. Kabel und Kühlwasserschläuche führen zum Punktschweißzeug, das nach seiner Verwendung für besondere Aufgaben als Schweißzange, Kleinpunktschweißzange, Schweißbügel, Stoß- und Hebelelektroden oder als Spreizelektroden ausgebildet ist. Ihre Betätigung erfolgt von Hand oder durch Preßluft. Entweder greifen die Elektrodenarme über das Werkstück oder, wo dies nicht möglich ist, sind Innen- und Außenelektrode völlig getrennt. Wegen der langen Kabelzuführungen ist die Schweißleistung auf dünne Bleche beschränkt, außer-

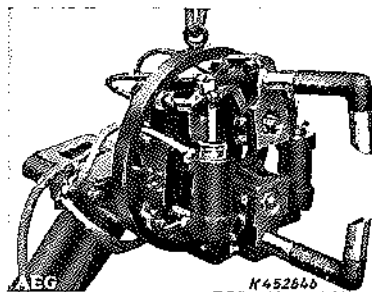


Abb. 48. Punktschweißzange.

dem ist eine Wasserkühlung der hochbelasteten Kabeln in Gummischläuchen notwendig.

Als Beispiel zeigt Abb. 48 einen übergreifenden Schweißbügel mit 160...500 mm Armausladung und für 2 x 4 mm Stahlblechdicke. Er ist in seinem Schwerpunkt aufgehängt, kann geschwenkt werden und

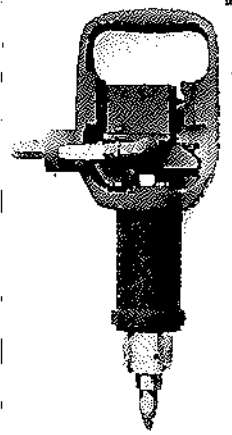


Abb. 49. Punkt-Stoßelektrode.

wird durch Druckluft von einem Handschalter aus gesteuert. Eine Stoßelektrode zeigt Abb. 49. Sie ist mit einer nachstellbaren Spannfeder zur genauen Einstellung des gewünschten Anpreßdruckes ausgerüstet und wird von Hand angepreßt. Mit der Hubbewegung ist die Stromschaltung mittelbar gekuppelt. Das andere Kabel führt zum Werkstück, bzw. wenn nötig zu einem Widerlager¹.

¹ Siehe Hoch: Elektrische Punktschweißzeuge. Elektroschweißg. 1937 Heft 2. Schimpke-Horn, Schweißtechnik II. 4. Aufl.

3. Die Technik der Punktschweißung.

Anwendungsgebiete. Die Punktschweißung läßt sich außerordentlich vielseitig anwenden. Um nur einige Beispiele herauszugreifen, seien genannt: Das Schweißen von Blechwaren aller Art, wie Ofentüren, Radiatoren, Jalousien, Blechmöbel, Blechschornsteine, Karosserien, das Schweißen von Spielzeugen, Drahtwaren (Lampenschirmgestellen), Sicherungen, Schreibmaschinenteilen und vieles andere mehr. Ein dankbares Betätigungsfeld findet das Punktschweißen auch in der Emaillierwarenindustrie zur Befestigung von Henkeln, Griffen und Zotten an Geschirr aller Art und bei der Verschweißung leichter Eisenkonstruktionsteile.

Werkstoffdicken. Dank der ausreichenden Regelfähigkeit besteht eine Begrenzung nach unten kaum, und es können noch die dünnsten Bleche und Drähte gut punktgeschweißt werden. Demgegenüber gibt es naturgemäß eine obere Grenze für die technische Durchführbarkeit und nicht zuletzt für die Wirtschaftlichkeit des Punktschweißens; sie liegt in der Gegend von 25 mm Gesamtdicke für Stahl. In der Praxis wird man über 20 mm Gesamtdicke nur selten hinausgehen, um so weniger, als die Druckfestigkeit des kupfernen Elektrodenwerkstoffs nicht ausreicht, um den bedeutenden Schweißdruck ohne Schaden aufzunehmen. Bei den gutleitenden Nichtisenmetallen geht man über 3 mm Werkstoffdicke praktisch kaum hinaus. Es können sowohl zwei verschieden dicke wie ein ganzes Bündel Bleche gepunktet werden, wenn nur die Wahl der Elektroden und Stromstärke richtig getroffen wird. Darum können auch ohne Schwierigkeit dünne Bleche auf Winkel-, Flach- und Quadratstahl aufgepunktet werden.

Schweißdauer. Durchschnittswerte für Schweißdauer und Leistungsaufnahme normaler Maschinen für verschiedene Blechdicken sowie der Bedarf an Kühlwasser für die Elektroden sind in Tabelle 9 zusammengestellt. Die angegebene Schweiß-

Tabelle 9.

Höchste Leistungsaufnahme	Schweißbare Gesamtlechdicke (Stahl)	Zeitdauer für einen Schweißpunkt	Mittlerer Kühlwasserverbrauch	Höchste Leistungsaufnahme	Schweißbare Gesamtlechdicke (Stahl)	Zeitdauer für einen Schweißpunkt	Mittlerer Kühlwasserverbrauch
kVA	mm	s	l/h	kVA	mm	s	l/h
2	1 (2 × 0,5)	1,8	30	16	12 (2 × 6)	9,0	180
4	2 (2 × 1,0)	2,0	75	18	14 (2 × 7)	10,5	195
8	5 (2 × 2,5)	3,4	100	25	16 (2 × 8)	13,0	200
10	6 (2 × 3)	4,5	130	30	20 (2 × 10)	18,5	230
12	8 (2 × 4)	6,5	150	50	24 (2 × 12)	23...26	300

dauer dürfte die praktisch erreichbaren Mittelwerte darstellen. Sie hat nur auf offene Körper Bezug, also auf gestreckte oder sonstwie geformte, aber nicht auf zusammengeschlossene Bleche. Geschlossenes Schweißgut, wie Blechrümpfe, Eimer, Zargen und Rohre, erfordern einen um 15...40 vH höheren Zeitaufwand. Wegen der hohen Schweißstromstärken ist das Schalten nur im Primärkreis möglich und erfolgt in Verbindung mit dem Druckgestänge durch Hebel-, Rollen- oder Gleitschalter, bisweilen auch durch ein Schütz. Die Schalhäufigkeit bei den großen Leistungen zieht durch den Abschaltlichtbogen Brandkrater auf den Schaltstücken nach sich, so daß sie zum Aufrechterhalten genauen Schaltens häufig gereinigt werden müssen. Alle Nachteile mechanischer Schalter fallen bei gittergesteuerten Röhrenschaltern fort, auf die im folgenden noch eingegangen wird.

Im übrigen hängt die Schweißdauer von der Beschaffenheit der Blechoberfläche ab; dekapierte Bleche sind rascher schweißbar als gewöhnliche, außerdem noch unsaubere Bleche. Je kürzer die Schweißzeit, um so geringer die Wärme-

abwanderung und das Verziehen des Bleches. Deshalb ist man zu Schnell- und Hochleistungspunktschweißmaschinen übergegangen, bei denen die Einzelpunktzeiten ganz außerordentlich kurz (bis $\frac{1}{200}$ s) werden, dafür aber die Leistungen der Maschine im gleichen Verhältnis hinaufgesetzt werden müssen. Es ergeben sich bei dünnen Blechen Punktzahlen von 60...180 je Minute.

Selbsttätige Regelung der Schweißdauer. Bei einer Schweißzeit von mehreren Sekunden läßt sich der Werdegang der Schweißung mit dem Auge verfolgen, so daß die Betätigung des Fußschalters eine genügend genaue Abstimmung der zugeführten Energie ergibt. Das ist das älteste und einfachste Verfahren.

Die Erfahrung hat aber gelehrt, daß selbst sonst zuverlässige Arbeiter, wenn sie stunden- und tagelang einen Schweißpunkt von kurzer Dauer hinter den anderen setzen, dem einzelnen Schweißpunkt nicht mehr die erforderliche Aufmerksamkeit widmen oder infolge Ermüdens auch nicht mehr widmen können. Die Folgen davon sind: stellenweises Verbrennen, ungenügendes Durchschweißen, überhaupt ungenügend feste Schweißpunkte; die Elektroden verschmoren und müssen ausgebessert werden. Die Verhältnisse sind noch ungünstiger, wenn man es mit Metallen zu tun hat, deren Übergang vom festen in den flüssigen Zustand plötzlich, ohne die Zwischenstufe des plastischen Zustandes, vonstatten geht, wie bei Aluminium, Messing, Zink u. a.

Vergegenwärtigt man sich, daß die Bestimmung der Schweißhitze der Willkür des Arbeiters überlassen bleibt, so muß man zu der Einsicht kommen, wie wichtig es ist, menschliche Schwächen auszuschalten und maschinelle Mittel zur Schweißzeitbestimmung zu benutzen.

Parallel hierzu erhebt sich die Forderung, die Wärmeabwanderung und die daraus entstehende Verwerfung möglichst klein zu halten. Um dies zu erreichen, ist die Verkürzung der Schweißzeit, gegebenenfalls auf Bruchteile einer Sekunde, ein wirksames Gegenmittel, das allerdings eine erhebliche Steigerung der Maschinenleistung bedingt, da das Produkt aus Leistung und Schweißzeit bei einer bestimmten Blechdicke konstant (gleich) bleiben muß. Zusatzeinrichtungen, die den Strom selbsttätig unterbrechen, wenn die Schweißung auch in kurzer Zeit beendet ist, wurden im Laufe der Zeit in großer Anzahl entwickelt und erhielten die Bezeichnung Schweißbegrenzer¹. Sie sind Relais, die entweder auf eine fest einstellbare Zeit ansprechen, Zeitbegrenzer genannt, oder die vom Unterschied zwischen der sekundären Klemmspannung des Umspanners und der Elektrodenspannung beeinflusst werden, Differentialbegrenzer, oder solche, die auf den infolge des Verschwindens des Übergangswiderstandes ansteigenden Schweißstrom eingestellt werden können, Strombegrenzer (Abb. 46), oder ferner solche, die wie ein Zähler arbeiten, Energiebegrenzer.

Der Relaiszeitbegrenzer, der nach jedem Schweißpunkt eine gewisse Rücklaufzeit benötigt, erfuhr eine Verbesserung in dem Röhrenzeitschalter, einem kleinen Stromrichter mit Gitter, dessen Einschaltdauer von der Zeit der Entladung eines Kondensators über einen parallel geschalteten, einstellbaren Widerstand abhängig gemacht wird. Die Zeitgabe wird auf ein Schütz übertragen. Die Massenträgheit der vorgenannten Begrenzer, die mit Relais und Schütz arbeiten, gestattet höchstens Schweißzeiten bis zu $\frac{1}{10}$ s = 5 Perioden herab. Da aber Nicht-eisenmetalle, vor allem Aluminium², noch geringere Schweißzeiten bis zu Bruch-

¹ Siehe auch Fahrenbach: Widerstandsschweißen. Heft 73 der Werkstattbücher. Berlin: Springer 1939.

² Siehe Oswald: Über die elektrische Punktschweißung an Leichtmetallen. Luftf.-Forschg. 1937 Hefte 4 u. 5.

teilen einer Wechselstromperiode herab erfordern, ging man zu völlig trägheitslosen und in ihrer Lebensdauer von der Schaltheufigkeit praktisch unabhängigen gittergesteuerten Stromrichtern über. Der Strom wird dadurch ein- und ausgeschaltet, daß an das Gitter ein gegenüber der Kathode positives oder negatives Potential gelegt wird. Für Schaltzeiten bis höchstens eine Halbwelle, also zwischen $\frac{1}{1000}$ und $\frac{1}{100}$ s, genügt ein Entladungsgefäß (auch Stromtor genannt), während für Schweißzeiten über eine Halbwelle bis zu mehreren Perioden zwei gegensinnig parallel geschaltete Stromrichter nötig werden, um jeweils beide Halbwellen des Wechselstromes ausnutzen zu können. Für diese Geräte hat sich auch die Bezeichnung Einweg- oder Zweiwegtaktter eingeführt. Ein Zweiwegtaktter

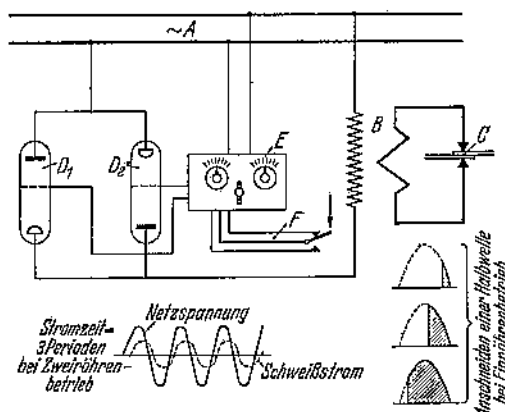


Abb. 50. Stromrichtersteuerung für Punkt- und Nahtschweißung.

kann unter Abschalten des einen Stromtores auch als Einwegtaktter arbeiten. Die Stromrichter werden unmittelbar in den Primärkreis des Schweißumspanners gelegt oder an den Umspanner angekuppelt.

Abb. 50 zeigt eine solche Schaltung. A ist das Anschlußnetz, B der Schweißumspanner, C die Schweißstelle, D₁ und D₂ sind die beiden Stromrichter, F ist der mit der Elektrodenbewegung gekoppelte Schalter des Steuerkreises und E die eigentliche Steuereinrichtung mit den Drehknöpfen zur Einstellung von Stromzeit und Strompause und ein Umschalter auf Ein- oder Zweiröhrenbetrieb. Das gesamte Zusatzgerät

erfordert einen verhältnismäßig großen Schaltschrank, der von der eigentlichen Schweißmaschine getrennt Aufstellung findet.

Zwischen Gitter und Kathode liegt normalerweise eine Sperrspannung, zu der durch einen mit der Elektrodenbewegung gekoppelten Steuerschalter eines Hilfsstromkreises ein Steuerimpuls tritt und der Stromdurchgang freigegeben wird. Die Phasenlage, bzw. der Zeitpunkt der Zündung ist regelbar; das Abschalten erfolgt entweder beim nächsten Nulldurchgang der Spannung oder kann aber auch auf mehrere Perioden eingestellt werden, wie dies in Abb. 50 unter dem Schaltbild in Skizzen dargestellt ist.

Leistungsaufnahme. Sie beträgt für normale Maschinen zwischen 2 und 50 kVA; für Hochleistungsmaschinen mit Stromrichtersteuerung bis 200 kVA. Die Werte der Tabelle 9 setzen Maschinen mit normaler Längenausladung der Elektrodenarme voraus. Diese soll bei kleineren und mittleren Maschinen 500 mm, bei größeren 1000 mm nicht überschreiten. Der Grund ist einerseits der, daß mit wachsender Ausladung der Arme und der zwischen sie gebrachten Metallmasse eine gesteigerte Leistungsaufnahme (bis zu 30 vH) erforderlich wird, andererseits aber auch der, daß die mechanische Beanspruchung mit der Länge des Armes zu sehr gesteigert würde, da ja die untere Elektrode als Widerlager dient und im allgemeinen auf ihre ganze Baulänge freitragend sein muß.

Elektrodenformen. Die Wahl der Elektrodenform ist nach der Art des Schweißgutes und nach der Lage der Schweißpunkte zu treffen. Eine Anzahl Skizzen soll die Formenverschiedenheit der Elektroden und ihre Verwendbarkeit vor Augen führen.

Die Normalelektrode hat die Form der Abb. 51a, ist also stab- oder stiftförmig. Sie ist am unteren Ende kegelstumpfförmig verjüngt und trägt oben einen Morsekonus, der wegen rascher Auswechselbarkeit lediglich in den Elektrodenhalter der Maschine hineingesteckt wird. Bei Ausführung des ersten Schweißpunktes zieht sich der Konus von selbst fest an. Der Durchmesser der Kegelfläche ist abhängig von der Art des zu schweißenden Werkstoffs und dessen Dicke. So kann man für Abb. 51b

den Durchmesser $x = 3$ mm setzen für Stahlblech von $0,3 \cdots 0,8$ mm Dicke

„ „ „ $x = 4,5$ mm „ „ „ „ $0,8 \cdots 1,3$ mm „
 „ „ „ $x = 6$ mm „ „ „ „ $1,6 \cdots 2$ mm „

Über diese Dicken hinausgehend, empfiehlt sich die Anwendung zweier zugespitzter Elektroden nach Art der Abb. 51a. Das Maß x beträgt dann beiderseits (auch für die Gegenelektrode):

für $2,3 \cdots 2,5$ mm Dicke $x = 6$ mm,
 „ $2,9 \cdots 3,8$ mm „ $x = 7,5$ mm,
 „ $4,1 \cdots 5,5$ mm „ $x = 9$ mm.

Vielfach ist auch eine leichte Wölbung (ballige Fläche Abb. 51c) oder kegelige Form der Elektroden zweckmäßig, insbesondere beim Schweißen oxydierter oder galvanisierter Bleche, weil dadurch der Schweißdruck anfänglich erhöht ist.

Wenn es die Lage der Schweißpunkte und die Form des Gegenstandes erfordern, sind gekröpfte oder Winkelelektroden nötig (Abb. 52a, b u. c). Das Anschweißen zylindrischer oder ähnlicher Stifte oder Bolzen an

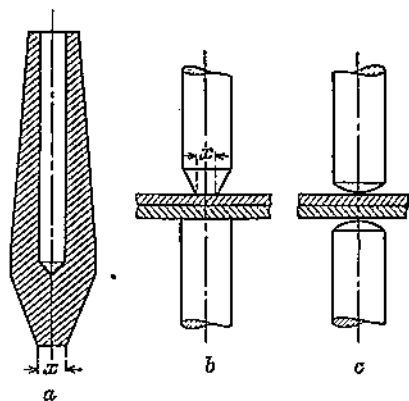


Abb. 51. Normalelektroden.

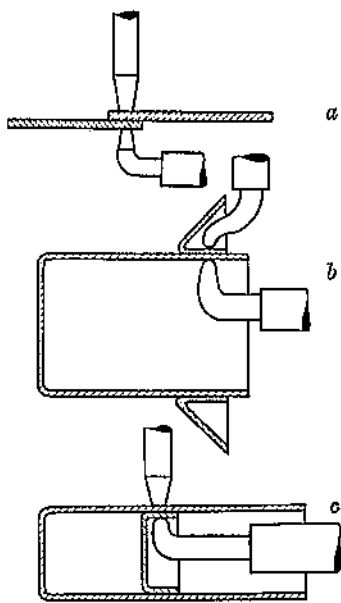


Abb. 52. Gekröpfte Elektroden.

Bleche (Zapfenschweißung) erfordert eine besondere Ausbildung der unteren Elektrode, wie dies in Abb. 53 skizziert ist. Die Auflagefläche der oberen Elektrode entspricht etwa dem Stiftdurchmesser, während die untere Elektrode hohl gehalten ist und den Stift aufzunehmen hat. Das Maß a , um welches die obere Fläche des Stiftes die Elektrode überragt, beträgt $1 \cdots 2$ mm. Auf ähnliche Weise werden zur Verstärkung dienende Butzen an Blechkonstruktionen angeschweißt. Zwischen Blechdicke und Zapfendurchmesser müssen bestimmte praktisch zu erprobende

Verhältnisse bestehen. Der Zapfen soll möglichst kein Mittelloch enthalten und nicht ringförmig sein, da ja die Erhitzung von der Mitte des Zapfens aus beginnt.

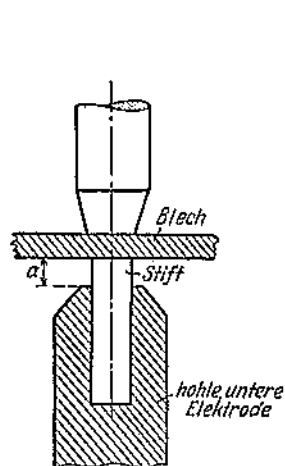


Abb. 53. Elektroden für Zapfenschweißung.

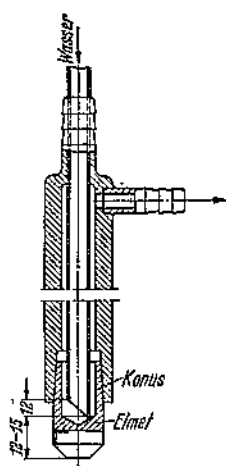


Abb. 54. Wassergesühlte Punktelektrode.

Den Schnitt durch eine wassergekühlte Punktelektrode mit Preßsitz zeigt Abb. 54, aus der ihr Aufbau klar zu erkennen ist. Die Maße beziehen sich auf einen Elektrodendurchmesser von 15 bis 25 mm.

Lebensdauer der Elektroden. In der Abnutzung weit fortgeschrittene Elektroden werden rauh, rissig, verschmort und sind von schwarzem Kupferoxydul überzogen. Deshalb ist von Zeit zu Zeit ein Säubern der Elektroden mit Schmirgelpapier oder mit einer Schleiffeile unerlässlich. Auch die Elektrodenarme und Verbindungsstellen an der Maschine sind des öfteren gut zu reinigen, weil

Zunder, Fett und Schmutz aller Art bei der niedrigen Betriebsspannung der Maschine schlechten Kontakt geben.

Aus den erwähnten Gründen sind die Elektroden der Punktschweißmaschine leider einem verhältnismäßig raschen Verschleiß unterworfen und müssen häufig ausgewechselt werden, da das wiederholte Abfeilen sehr bald die Elektroden unbrauchbar macht. Deshalb ist man zu legiertem Kupfer oder auch anderen druckfesteren Metallen übergegangen. Je nach dem zu schweißenden Werkstoff verwendet man sonderlegierte Elektroden, die als Hauptstoff Kupfer, daneben aber Kadmium, Wolfram, Silber und andere Metalle enthalten und die verschiedenen Bezeichnungen führen, wie z. B. Elmet, Durana-Elektra, Blombit und Kusit. Wolfram wird mitunter auch in Form kleiner Plättchen auf die Elektrodenflächen aufgeschweißt oder -gelötet. Ein immer wieder anzutreffender Fehler ist der, die Elektrodenflächen, die durch den fortwährenden Stauchdruck naturgemäß vergrößert werden, zu groß zu belassen. Erfahrungsgemäß soll bei normalen Arbeiten die obere Elektrodenfläche zwischen 3 und 6 mm Durchmesser haben, während man die Gegenelektrode etwas größer wählt. Ungünstig geformte Elektroden, hauptsächlich gekröpfte und gebogene von zu kleinem Leistungsquerschnitt und zu breiten Druckflächen, sowie solche mit schlechter Kühlung erhöhen Zeit- und Energiebedarf und haben einen besonders raschen Verschleiß.

Der Schweißdruck. Er wird durch Fuß- oder Motorkraft erzeugt und durch eine Feder so geregelt, daß ihre verstellbare Vorspannung die Elektrodenkraft bestimmt und ständig gleichhält. Preßluft, Wasser oder Drucköl dienen zur Erzeugung eines großen Schweißdrucks. Bei balligen oder kugeligen Elektroden spitzen ist er anfangs erhöht, sinkt aber mit dem Weichwerden des Werkstoffs und dem Eindringen der Elektroden spitze auf den gewünschten Wert ab. Der Schweißdruck richtet sich außer nach der Dicke auch nach der Metallart, und zwar muß der Druck mit dem spezifischen Gewicht des Metalles steigen. Ferner ist die Reinheit der Werkstoffoberfläche von Bedeutung; z. B. erfordern Aluminium sowie verzünderte Bleche einen höheren Druck als reine. Im Gegensatz

hierzu kann beim Schweißen gut leitender Metalle, wie Kupfer, Messing, Zink, und beim Schweißen galvanisierter oder sonstwie oberflächenüberzogener Stahlbleche der Druck ermäßigt werden. Jedoch ist in diesen Fällen mehr Strom erforderlich. Der richtigen Bemessung des Schweißdruckes ist besonderes Augenmerk zuzuwenden. Eine Erhöhung des Druckes über das tatsächliche Maß hinaus ist nicht allein zwecklos, sondern auch schädlich, da der nutzbare Widerstand an der Schweißstelle verringert wird. Wird ein zu kleiner Druck ausgeübt, so treten ähnliche Zustände ein wie bei zu starkem Strom; es bilden sich auffällig viele Funken an der Schweißstelle. Wird der Schweißkreis geschlossen, bevor die innige Berührung der Metalle herbeigeführt ist, was auch eine Folge zu geringen Druckes sein kann, dann bilden sich zwischen beiden Blechen Nebenstromwege (Lichtbogen), die statt zu einer Schweißung zu einem beiderseitigen Einbrennen von Löchern in die Bleche führen. Die Bleche müssen satt aufliegen und dürfen nicht, wie Abb. 55 zeigt, sperren. Mitunter bedient man sich der in Abb. 56 angedeuteten Buckel- oder Dellenschweißung, die darauf beruht, das eine Blech mit Körnereindrücken zu versehen, um von vornherein eine gute Berührung zwischen den Blechen und eine hohe Stromdichte zu erzielen.

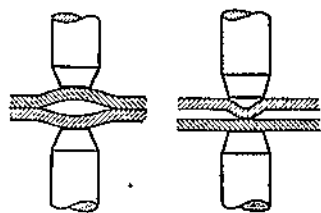


Abb. 55.
Schlechtes Auf-
liegen der Bleche.

Abb. 56.
Buckel- oder
Dellenschweißung.

Auch bei richtigem Schweißdruck hinterläßt jedes Punkten auf beiden Seiten infolge einer Stauchung des Schweißgutes eine mehr oder weniger wahrnehmbare Vertiefung (Eindruck). Dort, wo diese aus irgendeinem Grunde stört, wird die Elektrodenfläche vergrößert und die Gegenelektrodenfläche verkleinert (Abb. 51 b).

Ausführung von Punktschweißungen. Die besten Schweißergebnisse werden an dekapierten Stahl- und reinen Schwarzblechen erzielt. Die Verwendung zundrigen, rostigen oder sonstwie unreinen (fettüberzogenen) Werkstoffs führt sehr häufig zu Störungen. Man wird aus diesem Grunde guttun, derartige Bleche vor dem Punkten mit Säure zu beizen; andernfalls werden infolge der an den Punkten auftretenden Kraterbildung nicht selten Teilchen herausgebrannt und völlig unsaubere, minderwertige Verbindungen entstehen. Zur Entzunderung kann auch ein Sandstrahlgebläse dienen.

Es ist von Wichtigkeit, die zu vereinigenden Metalle an den Schweißstellen in innige Berührung zu bringen und auch einen kurzen Augenblick (Bruchteil einer Sekunde) nach Fertigstellung des Schweißpunktes in dieser Berührung verharren zu lassen, um dem örtlich halb geschmolzenen Metall Zeit zum Erstarren zu geben, bevor der Elektrodendruck nachläßt. Das wird in der Hauptsache durch die Arbeitsweise der Maschine selbst erreicht, da zwischen Stromschluß und Schweißdruck (betätigt durch den Fußhebel), beziehentlich zwischen diesem und der Stromunterbrechung selbsttätig eine Pause einsetzt.

Beim Aufbringen des Schweißgutes auf den unteren Elektrodenarm ist darauf zu achten, daß das Schweißstück nur die Spitze der Elektrode selbst, im übrigen aber nirgends den unteren stromführenden Arm der Maschine berührt, da sich sonst während des Stromschlusses an den Kontaktstellen Lichtbogen bilden. Mitunter wird die Anordnung eines isolierten Anschlags am unteren Arm oder an der Nutzenplatte der Maschine vorteilhaft sein.

Anordnung der Schweißpunkte. Diese können dem jeweiligen Erfordernis entsprechend angeordnet werden, da ja an keiner Stelle eine Schwächung des Werkstoffs wie beim Nieten (Nietlöcher) eintritt. Die Punkte können deshalb

ein- oder zweireihig, geradlinig, parallel oder zickzackförmig wechselweise versetzt angebracht werden. Der Abstand der Punkte richtet sich zunächst nach der Beanspruchung der Verbindung und weiterhin nach der Gestaltung des Schweißkörpers.

D. Rollennahtschweißung.

1. Schweißbarkeit der Metalle.

Die Nahtschweißung kommt nur für dünne Bleche bis höchstens 5 mm Gesamtdicke in Frage und eignet sich wie alle anderen Widerstandsschweißverfahren hauptsächlich für Stahl. Nach dem mit Stromunterbrechung arbeitenden Verfahren lassen sich außer dekapierten und hochwertigen Stahlblechen auch gewöhnliches Schwarzblech sowie Weißblech und andere metallüberzogene Bleche vereinigen. Das Verfahren ermöglicht auch die Schweißung von Messingblechen in besonders zufriedenstellender Weise. V2A-Stahl- und Aluminiumblechnähte sind seit Einführung der gittergesteuerten Maschinen in hoher Güte herstellbar.

2. Rollennahtschweißmaschinen.

a) Die elektrische Einrichtung der Maschinen.

Übergang zur Rollennahtschweißung. Wie sich die Punktschweißung aus der Stumpfschweißung entwickelt hat, so ist die Rollennahtschweißung ihrerseits

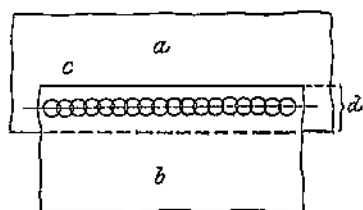


Abb. 57. Dichtes Aneinanderreihen von Schweißpunkten.

aus der Punktschweißung hervorgegangen. Auf jeder Punktschweißmaschine läßt sich durch dichtes Aneinanderreihen der einzelnen Schweißpunkte eine geschlossene Naht herstellen, wie dies in Abb. 57 dargestellt ist. Die beiden Bleche a und b sind in der Breite d überlappt und c ist die Schweißpunktkeite, dadurch entstanden, daß jeder folgende Punkt den vorausgegangenen um einen Teil überdeckt. Es lag nun der Gedanke nahe, die Stiftelektroden der Punktschweißmaschine gegen scheibenförmige oder Rollenelektroden auszutauschen und zwischen diesen die zu vereinigenden Bleche hindurchzuziehen, wodurch der Oberarm nicht für jeden Einzelpunkt, sondern

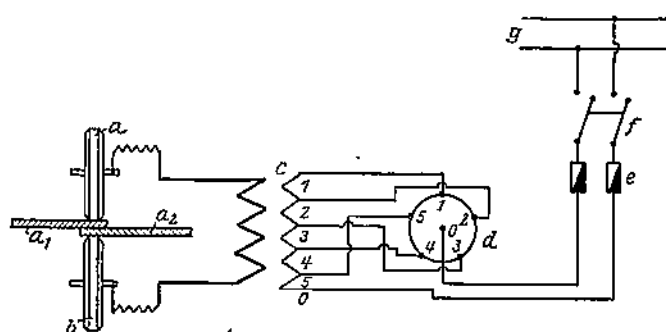


Abb. 58. Schaltung und Stromzuführung bei Nahtschweißmaschinen.

nur für die gesamte Naht einmal betätigt werden braucht.

Schaltung und Stromzuführung. An die Stelle der beiden Stiftelektroden der Abb. 45 sind in Abb. 58 die Rollenelektroden a und b getreten. Sie stehen mit der Sekundärwicklung des Umspanners c in Verbindung. Zwischen ihnen werden die

Bleche a_1 und a_2 hindurchgeführt. In den Stromkreis der Primärwicklung ist ein fünfstufiger Schalter d eingebaut. g ist wiederum das Wechselstromnetz, f der Schalter und e sind die Sicherungen.

Die verschiedenen Arten der Rollennahtschweißung. Nach dem heutigen Stand der Schweißtechnik hat man zwischen drei verschiedenen Arten der Nahtschweißung zu unterscheiden. Die älteste ist die, bei welcher die Rollen sich ununterbrochen gleichförmig drehen, bei ständig eingeschaltetem Strom. Die zweite besteht darin, die Rollen auch fortlaufend zu drehen, jedoch mit unterbrochenem Strom zu arbeiten. Bei der dritten werden sowohl die Bewegung der Rollen als auch deren Stromführung gesetzmäßig unterbrochen (Rollenschrittverfahren).

Der ältesten Art der Nahtschweißung haften mancherlei Mängel an, insofern, als Spannungsunterschiede von etwa 5 vH. genügen, um schlechte Schweißergebnisse zu bekommen. Die Schweißgeschwindigkeit muß gering gehalten werden (höchstens 30 mm/s). Die obere Grenze der Anwendbarkeit liegt bei nur 1 mm Gesamtdicke, wobei vollständig zunderfreies, sauberes, am besten dekapiertes Blech und nur kurze Nähte von höchstens 300 mm Länge vorausgesetzt sind.

Dauernd laufende Rollen, unterbrochener Strom, die zweite Art der Nahtschweißung, ist entschieden vorteilhafter. Die Maschinen sind weniger empfindlich gegen Spannungsschwankungen, und Bleche von 4 mm Gesamtdicke sind noch schweißbar. Als Überlappungsbreite genügt schon $\frac{1}{4}$ der nach Verfahren 1, und es können auch verzünderte Bleche geschweißt werden. Bezeichnungen dieser Nahtschweißungsart sind ferner: Maschennaht- oder Pilgerschritt-schweißung. Die in bestimmten Grenzen und Zeitzwischenräumen regelbare Stromunterbrechung wird durch einen in den Primärstromkreis eingebauten Stromunterbrecher besorgt, der zwangsläufig mit dem Regelgetriebe der Maschine gekuppelt ist. Um den Öffnungsfunken zu verringern, wird dem Stromunterbrecher ein hochohmscher Widerstand parallel geschaltet.

Aus diesen beiden Arten hat sich schließlich die dritte entwickelt: die Rollenschrittschweißung. Dieses Verfahren stellt keine ununterbrochene Bandnaht her (Abb. 59 Mitte), sondern eine überlappte Punktreihe (Abb. 59 oben und unten).

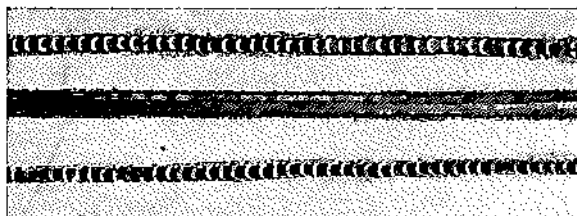


Abb. 59. Aussehen von mit Rollenelektroden geschweißten Nähten.

Das Wesen der Schrittschweißung ist: Nach der eigentlichen Schweißung die Rollenelektroden bei unterbrochenem Strom noch unter Druck ruhen zu lassen, bis der Schweißpunkt fest geworden ist. Dann wird die Bewegung der stromlosen Rollen bis zum nächsten Schweißpunkt (Rollenschritt) fortgesetzt, wo durch Wiedereinschalten des Stromes die nächste Schweißung vor sich geht. Die Arbeitsweise wird nach Werkstoffdicke und -art geregelt, und zwar zeigt die Kurve *a* der Abb. 60 ein Arbeiten mit langer, die punktierte Kurve *b* ein solches mit kurzer Stromschlußzeit. Die waagerechten Strecken der Abbildung entsprechen der Zeit, die senkrechten dem Rollenweg (oben), bzw. dem Strom (unten).

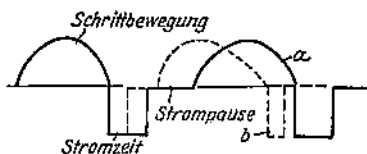


Abb. 60. Arbeitsweise der Rollenschrittschweißung.

b) Die mechanische Einrichtung der Maschinen.

Maschinenarten. Im Grunde genommen ist die gewöhnliche Rollennahtschweißmaschine nichts anderes als eine mit Rollenelektroden ausgerüstete Punkt-

schweißmaschine. Tatsächlich kann die letzte durch Auswechslung der Elektroden in eine Nahtschweißmaschine verwandelt werden und umgekehrt¹. Je nach dem Zweck, dem die Maschine zu dienen hat, unterscheidet man zwischen Längs- und Quernaht-, zwischen Rund- und Bodennaht-, zwischen Normal- und Sondernahtschweißmaschinen. Eine Gruppe für sich bilden die bau-

lich einfachsten sog. Hohlkörperschweißmaschinen.

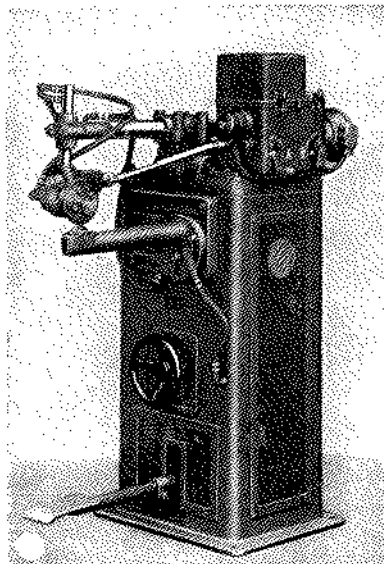


Abb. 61. Nahtschweißmaschine mit Stromunterbrechung.

Elektrodenbewegung. Für kurze Nahtlängen werden die Elektroden bisweilen durch einen Handhebel bewegt. Die Gegenrolle läuft unter dem Druck des Bleches selbsttätig mit. Bei Rund- und Quernahtmaschinen stehen die Rollen rechtwinklig zum Elektrodenarm. Umgekehrt ist es bei Längsnahtschweißmaschinen, wo die Elektroden parallel zum Arm angeordnet sind. Die obere Elektrode wird normalerweise mechanisch (selbsttätig) angetrieben, die untere wieder durch Reibung (Schlepprolle) mitgenommen; selten wird auch diese mechanisch angetrieben. An die Stelle der unteren Rolle kann im Bedarfsfalle ein stromführender Schlitten, eine Revolverscheibe, ein Dorn oder eine ähnliche Vorrichtung treten. Die Oberrolle bleibt jedoch immer bestehen. Von einigen Abarten abgesehen, sind die Hohlkörperschweißmaschinen meist so eingerichtet, daß eine kleine in der Mitte einer Kopfplatte mit dieser parallel laufende Rolle an dem Hohlkörper abrollt.

Rollennahtschweißmaschinen. Abb. 61 gibt eine Längsnahtmaschine wieder, die durch Verstellung des oberen Rollenkopfes und durch Auswechseln des Unter-

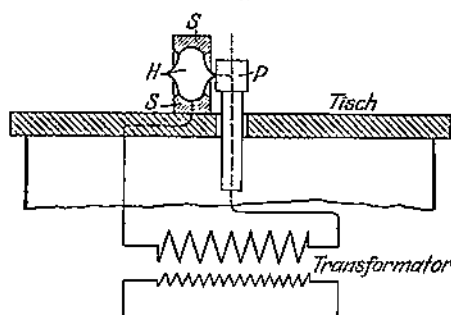


Abb. 62. Hohlkörperschweißung.

armes von einer Längs- in eine Quernahtschweißmaschine umgestellt werden kann. Der Antrieb der Oberrolle erfolgt motorisch über ein auf neun Geschwindigkeiten regelbares Zahnradgetriebe, in dessen Gehäuse (s. Bild oben rechts) auch der Stromunterbrecher untergebracht ist. Die Maschine ist bis 5 mm Gesamtbledicke verwendbar; ihre Schweißleistung bewegt sich zwischen 0,17...1,25 m/min, bei einem Energieverbrauch von 0,03...0,8 kWh je Meter Naht. Durch Austausch der Rollen

gegen Schaftelektroden kann auch diese Maschine als Punktschweißmaschine Verwendung finden.

Die Grundform einer Hohlkörperschweißmaschine zeigt Abb. 62. Auf ihr werden die Nähte von Messergriffen, Türklinden, Feldflaschen, Säbelscheiden, Kannenausgüssen und ähnlichen aus zwei Hälften gestanzten Hohlkörpern ge-

¹ Siehe Wilbert: Elektrische Nahtschweißmaschinen. Techn. Zbl. 1935 Heft 1 bis 4.

schweißt. Die zu schweißenden Hälften *H* werden in besondere Klemmvorrichtungen *S* eingespannt und freihändig an der sich drehenden Rollenelektrode *P*, die oben aus der Mitte des Maschinentisches herausragt, entlanggeführt. Die Ränder werden entweder durch Einlegen eines Drahtes oder, wie es überwiegend der Fall ist, durch die Ränder des Preß- oder Stanzgrates selbst verschweißt.

3. Die Technik der Rollennahtschweißung.

Anwendungsgebiete. Die Nahtschweißung findet ausschließlich für die Vereinigung von Blechen bzw. schwachem Formstahl mit Blechen Anwendung. Sie dient hauptsächlich zur Herstellung von Konservendosen aus Weißblech, Emaillewaren, Benzin-, Öl- und sonstigen Flüssigkeitsbehältern (Kanistern), zur Anfertigung von Stahlfässern, Eimern, Kannen, Rohren, Radiatoren, Umspannerkästen, Eiszellen, Kotflügeln, Radfelgen usw.

Werkstoffdicken. Die Nahtschweißung bezieht sich im wesentlichen nur auf dünne Bleche, und zwar von den praktisch feinsten Blechen bis zu etwa 5 mm Gesamtdicke bei Stahl (2 Bleche von je 2,5 mm). Über 5 mm geht man praktisch selten hinaus. Für die Nahtschweißung kommen fast nur gleich dicke Bleche in Frage, doch lassen sich auch verschieden dicke Bleche verschweißen, wenn der Dickenunterschied nicht mehr als 50 vH ausmacht. Nichteisenmetalle können bis höchstens 3 mm Gesamtdicke verschweißt werden.

Schweißdauer. Die Schweißgeschwindigkeit hängt neben der Umspannerleistung naturgemäß von der Dicke der Bleche, ihrer Art und Oberflächenbeschaffenheit ab. Die mittlere Schweißgeschwindigkeit für verschiedene Blechdicken ist aus Tabelle 10 zu entnehmen. Die Werte beziehen sich auf ununter-

Tabelle 10.

Höchste Leistungsaufnahme kVA	Schweißbare Gesamtlechdicke (Stahlblech) mm	Normale Schweißdauer für 1 m Naht s	Höchste Leistungsaufnahme kVA	Schweißbare Gesamtlechdicke (Stahlblech) mm	Normale Schweißdauer für 1 m Naht s
6	0,4 (2 · 0,2)	30	16	2,5 (2 · 1,25)	110
8	0,8 (2 · 0,4)	50	20	3 (2 · 1,5)	120
10	1,0 (2 · 0,5)	60	25	4 (2 · 2)	150
12	1,5 (2 · 0,75)	75	30	5 (2 · 2,5)	180
14	2 (2 · 1)	90			

brochenes Schweißen auf normalen Maschinen ohne Berücksichtigung der durch das Einspannen, Heften usw. notwendigen Arbeitspausen, wodurch sich die in der Tabelle 10 aufgeführten Leistungen (Arbeitsgeschwindigkeiten) um im Mittel 30 vH verringern. Die Werte können durch den mit den neueren Schweißstromregelverfahren erreichbaren Vorteil ganz erheblich gesteigert werden, wie dies im Absatz Schweißstromsteuerung näher ausgeführt wird.

Leistungsaufnahme. Sie beträgt, wie sich aus Tabelle 10 ergibt, zwischen 6 und 30 kVA für normale Maschinengrößen. Gittergesteuerte Hochleistungsmaschinen werden mit Leistungsaufnahmen bis zu 200 kVA hergestellt.

Schweißstromsteuerung. Die zuverlässigste Naht entsteht durch Aneinanderreihen sich gegenseitig überschneidender Punkte, deren Abstand zwischen 1 und 3 mm schwanken kann, praktisch jedoch meist zwischen 1,5 und 2 mm gewählt wird. Zur Herstellung einer solchen Schuppennaht müssen Stromschlußzeit und Strompause entsprechend dem Punktabstand wechseln. Wenn man die Leistungskurve des Wechselstromes Abb. 63 betrachtet, so könnte es scheinen, als ob der Bereich des Höchstwertes (Leistungsstoß) dem Stromschluß und der Bereich um

den Nullpunkt der Strompause entspräche. Bei einer Frequenz von 50 Hz ergeben sich in der Minute $2 \times 50 \times 60$ Leistungsstöße. Multipliziert man sie mit dem Punktabstand, z. B. 2 mm, dann ergibt sich eine Schweißgeschwindigkeit von $2 \times 50 \times 60 \times 2 = 12000$ mm/min oder 12 m/min. Wenn vereinzelt mit noch größeren Geschwindigkeiten geschweißt werden soll, müssen Frequenzumformer die Frequenz erhöhen. Bei niedrigen Schweißgeschwindigkeiten wäre die Frequenz, um den natürlichen Verlauf der Wechselstromkurve auszunutzen, herabzusetzen, was man jedoch praktisch nicht ausführt, sondern man baute für niedrige Schweißgeschwindigkeiten mechanisch betriebene Stromunterbrecher, die bei Stahlblechschweißungen auch heute noch ihren Zweck erfüllen, wenn nicht allzu große Forderungen an Genauigkeit gestellt werden. Neuere Steuerungen mußten entwickelt werden.

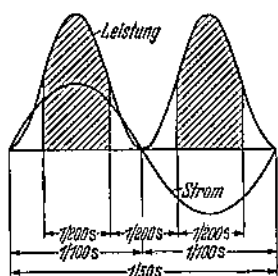


Abb. 63. Darstellung des Abkühlungs- und Erhitzungsvorgangs während einer Periode.

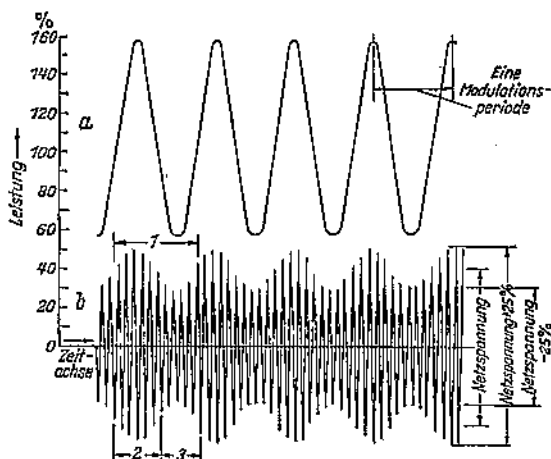


Abb. 64. Spannungsverlauf und Leistungsaufnahme beim Modulationsverfahren.

a = Kurve der Leistungsaufnahme.
b = Oszillogramm der Maschinenspannung.

An erster Stelle ist das Modulationsverfahren zu nennen, bei dem die Unterspannungwicklung eines umlaufenden Einphasenumspanners, auch Modulator oder Drehtakter genannt, mit der Primärwicklung des Schweißumspanners in Reihe geschaltet wird, so daß sich beider Spannungen überlagern und Schwebungen entstehen, die wechselnd in Abhängigkeit von der regelbaren Umdrehungszahl des Modulators Leistungshöchst- und -mindestwerte ergeben. Es findet also keine völlige Stromunterbrechung statt, sondern nur ein Zurückgehen des Stromes auf Werte, die zum Schweißen nicht mehr ausreichen. Abb. 64 zeigt den Spannungsverlauf und die Leistungsaufnahme bei diesem Verfahren. Der Abschnitt 1 entspricht einer Modulationswelle, die sich in die Strecke 2, Schweißzeit, und in die Strecke 3, Schweißpause, unterteilt. Während die Verteilung zwischen Schweißzeit und -pause beim Modulationsverfahren nur im Verhältnis 1:1 erfolgen kann, ist eine beliebige Verteilung bei großen Schweißgeschwindigkeiten nur mit Hilfe der Gittersteuerung zu erreichen. Im Abschnitt Punktschweißung sind solche Schweißtakter (Abb. 50) bereits beschrieben, deren Gitter auf verschiedene Weise gesteuert werden können. Die anfangs benutzten Schaltwalzen sind heute bereits wieder überholt und durch voll elektrische Steuerungen ersetzt, die ihrerseits elektrische Schwingungskreise sind und die Stromzeit und -pause unabhängig voneinander mittels Drehknöpfen einzustellen gestatten. Ins einzelne gehende Schilderungen würden viel zu weit führen¹. Der Umfang einer

¹ Siehe Jacobi: Kurzzeitschalter mit gesteuerten Stromrichtergefäßen. VDE-Fachber. 1936 Heft 8.

solchen Stromsteuerungsanlage, die einen größeren Platz einnimmt, als die eigentliche Schweißmaschine, ist in Abb. 65 veranschaulicht, wobei es sich allerdings um eine Rollennahtmaschine handelt.

Bei diesen Präzisionssteuerungen erfolgt das Ein- und Ausschalten des Stromes plötzlich, während in schwierigen Schweißfällen und bei empfindlichen Werkstoffen ein allmähliches An- und Abschwellen des Schweißstromes günstiger ist.

Dies wird durch die sog. Kaskadensteuerung erreicht, bei der zwei Spezialdrehumspanner mit dem Netz in Kaskadenschaltung gebracht werden. Die Sondermaschinen ergeben Spannungswellen, wie in Abb. 66a dargestellt, derart, daß Spannungsstöße (2) mit zeitlich nahezu gleichen, aber vollkommen spannungslosen Pausen (1) abwechseln. Sollen die Pausen größer werden (b bei 1), dann müssen eine oder mehrere Spannungswellen 2 durch mechanische Schalter ausgeschaltet werden.

Da das mechanische Ein- und Abschalten in die Mitte einer Spannungsnullzeit fällt, arbeiten die Schalter leistunglos, und Abschaltlichtbogen und Kontaktabbrand entfallen. Bei dieser Steuerungsart können die Pausen nicht willkürlich, sondern nur in einem ganzzahligen Verhältnis zum Spannungsstoß gewählt werden. Die Schweißzeit ist in einem Bereiche von 1...17 Perioden regelbar, wobei das Verhältnis Schweißen : Pause zwischen 1:1 bis 1:23 vergrößert werden kann.

Die beschriebenen hochentwickelten Steuerungen beziehen sich auf die Schweißzeit und die dazwischen liegenden Pausen, wobei vorausgesetzt wird, daß sich die anderen Einflußgrößen beim Schweißen nicht ändern. Als letztes sei noch eine Verbundsteuerung für Leichtmetalle erwähnt, die die Bezeichnung Programmsteuerung erhielt, da neben der Stromsteuerung auch eine planmäßige zeitliche Regelung des Elektrodendruckes vorgenommen wird. Dabei werden die Leichtmetallbleche zuerst zur Erzielung eines guten Kontaktes mit großer Kraft satt aufeinander gepreßt und dann der Schweißstrom eingeschaltet, und zwar bei nachgelassenem Elektrodendruck, um den erforderlichen Widerstand zu erreichen. Durch nun folgendes Herabsetzen des Stromes bei gleichzeitigem Wiedererhöhen des Elektrodendruckes soll der fertige Schweißpunkt im warmen Zu-

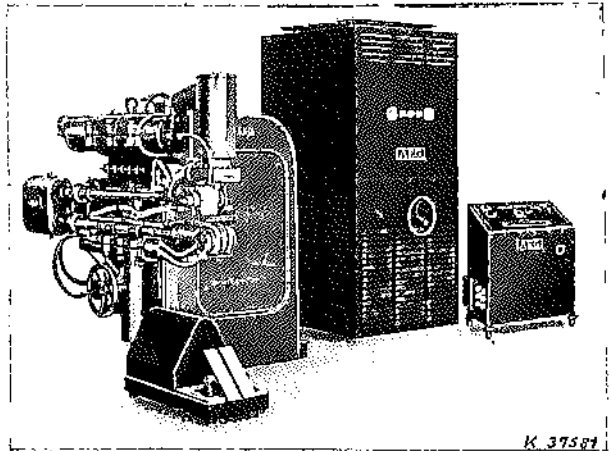


Abb. 65. Elektrische Nahtschweißmaschine für zweistufige Stromsteuerung.

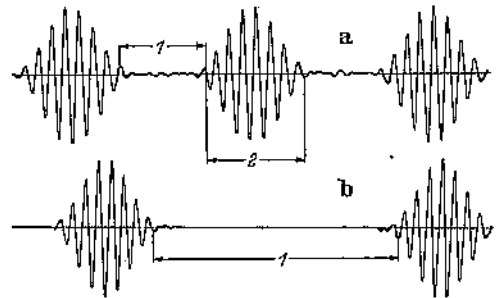


Abb. 66. Spannungsverlauf bei der Kaskadensteuerung.
1 = Schweißpause; 2 = Schweißzeit.

stand vergütet, mithin das grobe Korn der Schweißstelle verfeinert und verfestigt werden.

Unter diesen verschiedenen Stromsteuerungsverfahren das geeignetste zu wählen, ist nur von Fall zu Fall möglich. Dabei sind nicht allein die Gestalt und der Werkstoff des zu schweißenden Gegenstandes, sondern auch die davon abhängigen Schweißzeiten von ausschlaggebender Bedeutung.

Im Laufe der letzten Jahre ist auf dem Gebiete der Steuerungen Außerordentliches geleistet worden. Der Weg zum Idealzustand, für jeden einzelnen Punkt

die immer gleiche Schweißtemperatur zu erreichen und von da ab nach genau bemessener Zeit abzuschalten, ist noch dadurch versperrt, daß eine ausreichende Temperaturmessung der Schweißstelle, die an der Innenseite der Blechüberlappung liegt und dadurch unzugänglich ist, zur Zeit noch nicht möglich ist.

Elektrodenformen. Es wurde bereits gezeigt, daß sie beiderseits als Rollen ausgebildet sein können (Abb. 67) oder die untere Elektrode ist von zylindrischer, dornförmiger (Abb. 68) oder prismatischer Gestalt, je nach dem Gegenstand, der die eine oder andere Einrichtung vorteilhafter erscheinen läßt. Abb. 68 zeigt die An-

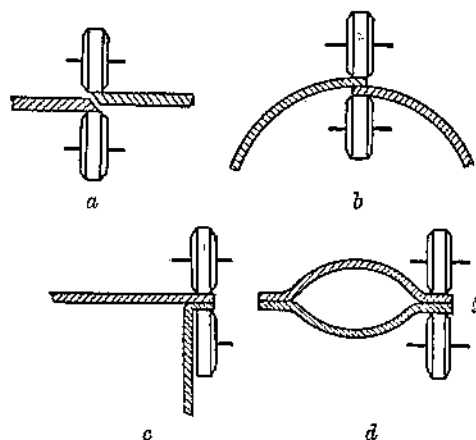


Abb. 67. Elektrodenform und Nahtausbildung.

ordnung einer Rollenelektrode zu einer zylindrischen Gegenelektrode.

Die Rollen sind beiderseits konisch abgeschrägte Scheiben mit schmaler zylindrischer Lauffläche. Die Bleche werden normalerweise überlappt (Abb. 67b,

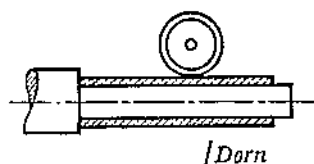


Abb. 68. Rollenelektrode mit Gegendorn.

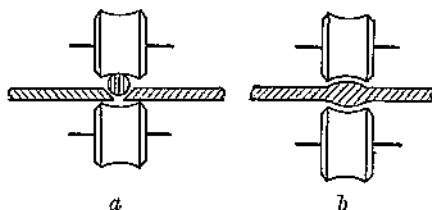


Abb. 69. Elektrodenform und Nahtausbildung.

c und d), und zwar mindestens so breit, daß die Lauffläche der Rollenelektroden mit der Blechkante abschneidet. Bei Blechen unter 0,8 mm Dicke kann die Überlappung so gering wie nur möglich gehalten werden. Die Rollen drücken dann die Überlappkante praktisch auf Einzelblechdicke zusammen, so daß die Stufe der Überlappung verschwindet. Solche Naht hat die Bezeichnung „imitierte Stumpfnah“ oder „Quetschnah“ erhalten. Soll die Überlappungsstufe auch bei dickeren Blechen als 0,8 mm fortgebracht werden, so sind die Bleche abzuschrägen (Abb. 67a) oder, um die Naht gleichzeitig zu verstärken, werden auch Rollen mit nach innen gewölbten (konkaven) Laufflächen ausgebildet, die in die abgeschrägten Blechkanten einen runden oder quadratischen Draht hineinpresse. Dadurch entsteht eine wulstförmig verstärkte Naht (Abb. 69a und b). Die normale Überlappnaht und die Quetschnah ergeben die besten Festigkeitswerte.

Selbstverständlich müssen die Rollenflächen gleichmäßig auf den Blechen abrollen, da sonst ein Auseinandertreiben der Bleche und eine Beulenbildung unvermeidlich sind. Abgenutzte und breitgedrückte Rollenbahnen werden zweckmäßig nicht befeilt, sondern durch Hämmern in die alte Form gebracht, da das Hämmern durch Verdichtung ein Härten des Kupfers und damit höhere Verschleißfestigkeit bewirkt.

Ausführung von Nahtschweißungen. Eine gute Nahtschweißung muß jede Nachbearbeitung, wie Drücken, Poltern, Ziehen, Querkanten usw., aushalten, ohne sich auch nur auf kurze Strecken aus ihrem Verbande zu lösen. Maßgebend hierfür sind u. a. ein richtiger Rollendruck und eine mäßige Vorschubgeschwindigkeit.

Die Bleche sollen sehr rein, insbesondere aber zunderfrei sein, und es genügt nicht immer, wie beim Punkten die Nahtzone zu beizen, sondern häufig muß sie geschliffen werden. Eine Besserung trat erst ein, als man mit unterbrochenem Strom arbeitete, und das Rollenschrittverfahren ermöglicht sogar die Verschweißung dünn verzunderter Bleche. Der Zunder verursacht leichte Brandwirkungen in der Naht, die auch die Rollenauflflächen verunreinigen, und unverbundene Stellen, die beim Nachschweißen Lochbildung zur Folge haben. Die dauernd unter Strom stehende Elektrode neigt besonders zu Funkenbildungen, und es kommt nicht selten vor, daß ganze Stücke strichweise aus der Schweißstelle herausgehoben werden.

Zusammenfassend kann man sagen: Das bestgeeignete Nahtschweißverfahren ist das mit Stromunterbrechung. Es erreicht die Höchstgrenze der Anwendbarkeit bei geringster Rollenabnutzung, sauberstem Nahtaussehen und hoher Festigkeit. Es ist das Verfahren, das von der Oberflächenbeschaffenheit des Bleches, von Stromschwankungen, Werkstoffverschiedenheiten und ähnlichen Faktoren am wenigsten beeinflußt wird, ein Grund, weshalb nach diesem Verfahren auch die dickeren Bleche schweißbar sind.

Was nun die Überlappung anbelangt, so setzt die Maschine, die mit dauernd stromführenden Rollen arbeitet, eine breite Überlappung der Bleche voraus. Bei den anderen mit Stromunterbrechung arbeitenden Verfahren genügt eine der Lauffläche der Rolle entsprechende Breite. Die breitüberlappede Naht reißt bei späterer Bearbeitung leichter auf und ist hauptsächlich beim Emaillieren ein nicht zu unterschätzendes Hindernis (Bläschenbildung). Wie beim Punkten ist auch hier dafür zu sorgen, daß an keiner anderen als der gewünschten Stelle Kontakt und nirgends ein Anschmelzen entsteht. Um gleichmäßige Überlappung und Nahtbreite zu erhalten, ist es notwendig, die Naht vor dem Schweißen auf ihre ganze Länge zu heften; der Abstand der Heftpunkte, die entweder auf der gleichen Maschine unter Verwendung von Hilfsvorrichtungen, wie Heftleisten, oder auf einer bereitgehaltenen Punktschweißmaschine hergestellt werden, richtet sich nach der Blechdicke und der Form des Körpers und beträgt zwischen 30 und 100 mm.

E. Das Weibel- oder Fesa-Verfahren.

Dieses von Weibel entwickelte Verfahren stellt weder ein reines Widerstandsnach noch ein Lichtbogenschweißen dar; man könnte es mit Widerstandsschmelzschweißung bezeichnen. Es eignet sich ausschließlich für die Schweißung einiger, und zwar sehr dünner Nichteisen-, hauptsächlich Leichtmetallbleche; für die Verschweißung von Stahl ist es zur Zeit noch nicht brauchbar.

Die Schweißeinrichtung. Zur Fesa-Anlage (Fesa = Fabrik elektrischer Schweiß-Apparate), die nur mit Wechselstrom betrieben werden kann, gehören ein Um-

spanner, ein Sonderelektrodenhalter und die Anschlußkabel. Der für 220, 380 oder 500 V Anschlußspannung gebaute, in fünf Stufen regelbare und infolge seines geringen Gewichtes (etwa 70 kg) leicht bewegliche Umspanner gibt bei 4...10 V Sekundär- (Schweiß-) Spannung etwa 250 A ab, seine Leistung beträgt daher etwa 2,1 kVA.



Abb. 70. Elektrodenhalter für das Weißverfahren.

Der rund 1000 g schwere, mit Kühlrippen ausgestattete Elektrodenhalter (Abb. 70) besitzt, durch zwei Kabel mit dem Umspanner unmittelbar verbunden und deshalb im Gegensatz zum normalen, für das Lichtbogenschweißen bestimmten Elektrodenhalter, zwei stromführende Arme, wovon der eine feststeht, während der andere drehbar angeordnet ist. Die in den Halter eingespannten zwei Elektroden von besonderer Form sind zueinander beweglich und bestehen aus hochschmelzender Kohle. Es sind nur für diesen besonderen Zweck hergestellte verkupferte Kohlestäbe brauchbar, und ihre Zusammensetzung ist von ausschlaggebender Bedeutung.

Die Ausführung des Verfahrens. Die Eigenart der Elektrodenführung bedingt eine besondere Vorbereitung der Blechränder, wobei hervorzuheben ist, daß sich dieses Verfahren weniger für Stumpf- als für Bördelnähte eignet. Während man bei der normalen Kohlebogen- (Lichtbogen-) und bei der Gasschweißung den Bord rechtwinklig, also auf 90° abkantet, wie dies in Abb. 71a skizziert ist, bereitet man hier Leichtmetallbleche im Sinne von b vor, d. h. mit einem offenen Winkel von etwa 20° , wodurch ein gutes wurzelseitiges Durchschweißen erzielt wird. Zinkbleche werden genau umgekehrt, wie in c dargestellt, also mit geschlossenem Winkel vorbereitet. Der Querschnitt der fertigen Bördelnäht entspricht etwa d. Bei den weniger üblichen Stumpfnähten wird ein Draht gleichen Werkstoffs, aber von etwas größerer Dicke als das Blech in die Fuge eingelegt und mit dieser verschmolzen.

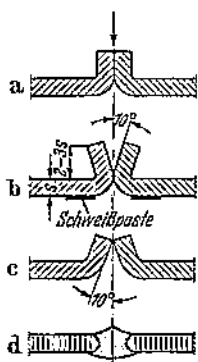


Abb. 71. Vorbereitung der Blechkanten zum Festschweißen.

Kurz dargestellt ist der Schweißvorgang folgender: Durch Anziehen eines am Halter angeordneten Handhebels werden die beiden Elektroden kurzzeitig in Berührung gebracht und damit der Schweißstromkreis geschlossen, wobei die Kohlestäbe auf Weißglut erhitzt werden. Darauf zieht man sie wieder auseinander und führt sie beiderseits der Bördelränder, wie Abb. 70 zeigt, mit gleichbleibender Geschwindigkeit ruhig und drucklos entlang. Da die Bördel verflüssigt und damit, die Nahtfuge ausfüllend, wie beim Gasschweißen niedergeschmolzen werden, ist eine gute Bin-

spannung der Blechränder unerläßlich. Andernfalls sind Lochbrand und ein Verschieben der Bleche in der Waagerechten unausbleiblich. Es muß daher ausdrücklich betont werden, daß nur sorgfältiges Vorbereiten und Einspannen der Bleche ein störungsfreies Schweißen gewährleisten. Bildlich betrachtet entspricht der Vorgang Abb. 72. In der Aufsicht I sind die beiden nach innen abgeflachten und verkupferten Kohlestäbe a und a_1 (8...15 mm Durchmesser), die in Pfeilrichtung bewegt werden, zu erkennen. Die Größe des Öffnungswinkels α ,

innerhalb dessen die Verflüssigung der Bördel c und deren Einschmelzen in die Fuge d eintritt, beträgt etwa 25° . e ist die bereits geschweißte Nahtstrecke an dem Blechpaar $b-b_1$. Seitlich gesehen (Abb. 72 II) fassen die unteren abgerundeten Kohlestäbe bis ziemlich an die Blechoberfläche heran und stehen spitzwinklig zum Bord. Mit den dem jeweiligen Werkstoff entsprechenden Flußmitteln¹ (Schweißpasten) muß sehr sparsam umgegangen werden. Man bestreicht nur die Unterseiten der Bleche (Abb. 71 b), weil sonst der Stromübergang zwischen den Blechen gestört und die Nahtgestaltung infolge reichlicher Schlackenbildung beeinträchtigt wird.

Wenn auch angesichts der geringen Arbeitsspannung von nur 4...10 V eine Lichtbogenbildung während des Schweißens nicht möglich ist, so empfiehlt sich trotzdem das Tragen einer mit schwach dunklen Gläsern versehenen Brille, einmal, um den Schweißvorgang besser beobachten zu können, zum anderen, um die Augen vor den beim Kurzschließen der Kohlelektroden auftretenden Lichtwirkungen zu schützen.

Anwendungsbereich. Das Weibel-Verfahren findet heute z. T. schon ausgedehnte Anwendung beim Schweißen von Leichtmetallblechen in Dicken von 0,2...1,5 mm. In den gleichen Dicken ist Reinzink verhältnismäßig gut schweißbar. Die günstigste Blechdicke liegt für alle Metalle zwischen 0,8 und 1,0 mm. Versuche, auch andere Nichteisenmetalle auf diese Weise zu schweißen, sind noch nicht abgeschlossen; ihr Erfolg dürfte wesentlich von der Zusammensetzung und der Formgebung der Elektroden abhängig sein. Stahlblech ist nach diesem Verfahren leider nicht schweißbar. Außerdem können nur Knetwerkstoffe geschweißt werden.

Neben Stumpf- und Bördelnähten lassen sich Eck- oder Kantennähte einwandfrei schweißen. Ebenso ist die Verbindung dünner Rohrlängs- und -rundnähte möglich, wobei, sofern es sich um Rundnähte handelt, ein Zusatzdraht eingelegt und zwischen der Zange eingeschmolzen wird.

Die von Werkstoffart und -dicke abhängige Schweißgeschwindigkeit beträgt zwischen 0,5 und 1,0 m/min, im Mittel etwa 0,7 m/min. Zur Zeit der Drucklegung dieser Auflage werden die ersten Versuche mit maschinell geführten Schweißzangen durchgeführt; der Erfolg bleibt abzuwarten.

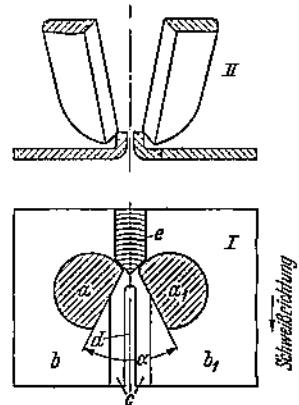


Abb. 72.
Entstehen der Schweißnaht.

III. Die Lichtbogenschweißung.

A. Der Lichtbogen und seine Eigenschaften.

Je nach Verfahren und Art der Elektroden ist zunächst zu unterscheiden zwischen: Kohle-Kohle-Lichtbogen (Zerener-Verfahren [im beschränkten Sinne auch das Weibel-Verfahren]), Kohle-Werkstück-Lichtbogen (Benardos-Verfahren), Metall-Werkstück-Lichtbogen (Slavianoff-Verfahren) und Metall-Metall-Lichtbogen (Wolframelektroden beim Arcatom-Verfahren). Untergruppen sind der Gleichstrom- und der Wechselstromlichtbogen.

¹ Siehe Schimpke u. Horn Bd. 1, 3. Aufl. Berlin: Springer 1938.

Schimpke-Horn, Schweißtechnik II. 4. Aufl.

1. Die Metall-Lichtbogen.

a) Der Gleichstromlichtbogen.

Obwohl unsere Kenntnisse über die physikalischen Eigenschaften und vor allem auch über die chemischen und metallurgischen Wirkungen des Lichtbogens, insbesondere des Metall-Lichtbogens, trotz umfangreicher Forschungsarbeiten noch recht lückenhaft sind und zum großen Teil auf Annahmen beruhen, soll versucht werden, die Vorgänge, die sich im Lichtbogen abspielen, nach dem heutigen Stand der Erkenntnisse übersichtlich darzustellen.

Elektronen und Ionen. Normale Verhältnisse vorausgesetzt, sind Luft und die anderen Gase Nichtleiter, ja sogar mehr oder weniger gute Isolatoren für den elektrischen Strom. Spaltet man jedoch ihre Moleküle in Ionen, was neben anderen Möglichkeiten besonders durch Ionisierung oder Ionenstoß (heftiger Anprall von Elektronen oder Ionen) erreicht werden kann, so werden die Gase befähigt, die Elektrizität zu leiten.

Unter Elektronen versteht man winzig kleine, unter sich gleich große elektrische Urteilchen, die, wie man annimmt, den Gesamtraum des Äthers, des Trägers physikalischer Erscheinungen, ausfüllen. Die Elektronen haben die Neigung, sich mit Atomen und Molekülen zu vereinigen, weshalb man ein normales unelektrisches Atom als eine Vereinigung eines oder mehrerer Elektronen mit einem materiellen Rest anspricht. Werden diesem Atomverband auf irgendeine Weise Elektronen entzogen, so bleibt ein positives Restatom zurück, während die aus dem Verband ausgeschiedenen Elektronen gleich großen negativen Charakter zeigen. Dem positiven Restatom hat man den Namen positives Ion (Anion) beigelegt. Durch Beladung mit Elektronen kann ein Atom oder Molekül auch negatives Ion (Kathion) werden. Die Kraft, wenn man sich der Anschaulichkeit halber so ausdrücken darf, die das Elektron mit dem Atom zusammenkettet, ist in den verschiedenen Stoffen sehr ungleich groß. Sie ist am stärksten in elektrischen Isolationsstoffen, am schwächsten in Leitern, weshalb in ihnen die Wanderung der Elektrizität leicht vonstatten geht; bildlich gesprochen: Ein elektrischer Strom ist eine große Schar wandernder Elektronen.

Entstehung des Lichtbogens. Der Lichtbogen ist in der Lage, die Bedingungen zur Ionisierung der zwischen den Elektroden bzw. zwischen der Elektrode und dem Werkstück bestehenden Gassäule selbst zu erfüllen, da nach Annahme der Ionentheorie die neutralen Gasmoleküle einer Spaltung in Gasionen unterworfen sind. Die ionisierten Gase sind deshalb die eigentlichen Wege, auf denen sich die Wanderung der Elektrizität vollzieht. Im Innern der Gassäule werden die negativen Elektronen mit ungeheurer Geschwindigkeit auf den positiven Pol hin fortbewegt. Die außerordentlich rasche Bewegung der Elektronen oder Ionen verursacht ihren Zusammenstoß mit im Gasstrom befindlichen neutralen Molekülen und hat deren sofortigen Zerfall in negative und positive Ionen im Gefolge, die ihrerseits ebenfalls der Elektrizitätsbeförderung zur Verfügung stehen. Die positiv geladenen Restatome werden vom negativen Pol angezogen, der durch den Aufprall der Ionen hoch erhitzt wird. Diesen Vorgang des Zerfalls der Atome in Ionen und Elektronen bezeichnet man mit Ionisation. Durch die Wucht des Elektronenaufpralles auf den positiven Pol (Anode) wird dieser noch höher erhitzt; seine Temperatur beträgt etwa 4000° . Am —Pol (Kathode) besteht eine um etwa 600° niedrigere Temperatur. Dieses Temperaturgefälle wird, wie später noch gezeigt werden soll, schweißtechnisch ausgenutzt. In der Mitte des Lichtbogens liegt die Temperatur noch wesentlich tiefer, sie dürfte etwa 2000° betragen.

Bekanntlich kann man ein Metall oder einen Leiter stark negativ elektrisch laden, d. h. die Elektronen auf ihm in hohem Maße verdichten, ohne daß sie aus der Oberfläche des Metalls austreten, obwohl die Elektronen im Leiter besonders leicht beweglich sind. Diese merkwürdige Trägheit in der Abwanderung der Elektronen oder anders ausgedrückt, die Starrheit, mit welcher die Metalloberfläche dem Austritt der Elektronen widerstrebt, wird mit wachsender Temperatur abgeschwächt und geht bei Erhitzung des Metalls auf Weißglut vollkommen verloren. Auf die Zündung des Lichtbogens angewandt, gelangen wir zu folgender Überlegung: Durch die Berührung zwischen Elektrodenspitze und Werkstück (Kurzschlußzustand) wird eine hohe Stromdichte herbeigeführt, die vorerst in der noch kurzen Gassacke, unterstützt durch die in jedem Gase anwesenden freien Ionen, einen Glimmstrom (glühelctrische Erscheinung) und damit den vom negativen Pol ausgehenden Elektronenfluß ins Leben ruft. Der rasch folgenden Weißglut schließt sich der vorhin beschriebene Vorgang des Ionenstoßes an, durch welchen neue Ionen gebildet werden. Auf diese Weise wird dann der einmal bestehende Lichtbogen unterhalten. Den weißleuchtenden Ansatzpunkt des Lichtbogens am —Pol (Kathode) bezeichnet man als Kathodenfleck, den Vorgang des Elektrodenaustritts aus der Kathode als Elektronenemission.

Das an sich verschiedene Aussehen des Lichtbogens ist durch die Art des Elektrodenwerkstoffs (Kohle- oder Metallart) und u. a. durch die Gasart bedingt, in welcher er brennt; für uns kommt ausschließlich das Brennen an der Luft in Frage. Die leuchtende, den Kern bildende Gassäule wird von einem hellgelben Gasmantel, der sog. Aureole, eingeschlossen, die beim Kohlebogen eine rötliche Färbung annimmt.

Wie jeder biegsame, stromdurchflossene Leiter wird auch der Lichtbogen durch magnetische Felder abgelenkt; man spricht von einer „Blaswirkung“, auf die später noch näher einzugehen ist, da sie den Schweißvorgang empfindlich stört.

Bei Stahl wird im allgemeinen mit der Elektrode am —Pol gearbeitet, einmal wegen der bereits betonten günstigen Temperaturverhältnisse zwischen Werkstück und Elektrode, zum anderen aber auch deshalb, weil die Elektronenemission trotz des fortwährenden örtlichen Wechsels der Elektrode durch ihre Fortbewegung immer an derselben Stelle auftritt und damit ein Kleben der Elektrode am Werkstück und ein Abreißen des Lichtbogens weniger zu erwarten sind.

Der Metall-Lichtbogen muß, worauf später noch einzugehen ist, so kurz als praktisch durchführbar gehalten werden. Dabei gilt als Faustregel: Bogenlänge $\leq$ Elektrodendicke.

Die Kennlinie des Lichtbogens. Zu jedem Stromstärkewert des Lichtbogens gehört in Abhängigkeit von seiner Länge eine bestimmte Spannung. Das Verhältnis zwischen diesen elektrischen Größen gibt die elektrische Kennzeichnung (Charakteristik) des Lichtbogens wieder. Man nennt deshalb eine zeichnerische Darstellung, die eine Übersicht über die gegenseitigen Verhältnisse zwischen Stromstärke und Spannung zum Ausdruck bringt, eine „charakteristische Kurve“ oder eine Kennlinie (Charakteristik). Eine solche Kennlinie ist in Abb. 73 wiedergegeben. Zur Zündung des Lichtbogens ist eine erheblich höhere Spannung notwendig als zu dessen Unterhaltung. Die Höchst- oder Zündspannung — sie beträgt

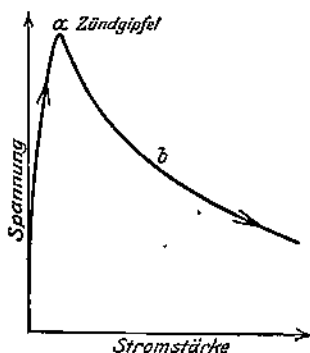


Abb. 73. Kennlinie des Lichtbogens.

bis zu 75 V — nennt man den Zündgipfel (Abb. 73 bei a). Brennt der Lichtbogen, dann nimmt der in ihm gemessene Spannungsunterschied rasch ab, wobei die Stromstärke ebenso rasch ansteigt. Aus diesem Grunde sagt man, der Lichtbogen habe eine fallende Kennlinie (Abb. 73 bei b). Der Spannungsabfall von der Anode zur Kathode beträgt bei nackten Elektroden zwischen 16...25 V, bei ummantelten 22...30 V, beim Gußwarmschweißen zwischen 40...75 V. Die an den Polen gelegenen Höchstwerte bezeichnet man als Anoden- bzw. Kathodenfall. Der Spannungsabfall innerhalb der Lichtbogenstrecke ist demgegenüber nur gering. Um die Zündung des Lichtbogens zustande zu bringen, wendet man nicht hohe Spannungen an, die für den Schweißer gefährlich sind, sondern man erniedrigt den Zündgipfel insofern, als man die Entladungsstrecke zwischen Elektrode und Werkstück auf das geringste Maß verkürzt. Das geschieht, indem man die Elektrode vorübergehend kurzschließt, d. h. für einen Augenblick mit dem Werkstück in Berührung bringt (Aufstupfen). Beim Abziehen der Elektrode bildet sich dann der Lichtbogen, zu dessen Aufrechterhaltung eine Mindestarbeitsspannung von 15 V erforderlich ist.

b) Der Wechselstromlichtbogen.

Allgemeines. Die Vorgänge in dem durch Wechselstrom gespeisten Lichtbogen sind bedeutend verwickelter als im Gleichstrombogen, weil beim Wechselstrom ein bestimmter Pol nicht besteht, vielmehr die Elektroden bzw. Elektrode und Werkstück, z. B. 100mal in der Sekunde bei 50 Hz (50 Perioden), je nach der Periodenzahl ihre Polarität vertauschen, d. h. abwechselnd +Pol und -Pol sind. Mit dem hundertmaligen Wechsel zwischen Anode und Kathode tritt auch ebenso oft eine Umkehr des Elektronen- und Ionenstoßes ein, weshalb beide Pole gleiche Temperaturen haben. Im Aussehen unterscheidet sich die Flamme des Wechselstrombogens von jener des Gleichstrombogens so gut wie gar nicht. Die betonte theoretische Temperaturgleichheit der Pole wird gegenüber der Gleichstromschweißung als Nachteil angesprochen. Inwieweit ein solcher tatsächlich besteht, soll später erörtert werden; dagegen kann man mit Sicherheit behaupten, daß das Halten des Lichtbogens bei Wechselstrom schwieriger ist als bei Gleichstrom. Das ist auch leicht erklärlich, wenn man außer dem Polwechsel noch die Störungen im Lichtbogen berücksichtigt, die durch das Abwandern der Metalltropfen entstehen. Da die Elektronenemission (der Elektronenausstritt) von nacktem Draht nur ungenügend aufrechterhalten werden kann, versucht man, mit irgend welchen Mitteln das Halten des Lichtbogens zu erleichtern. Neben der Verwendung von Seelenelektroden ist das bekannteste die Verwendung umhüllter Schweißstäbe, deren Ummantelung die Lichtbogenstrecke besser leitend macht, worüber im Abschnitt „Schweißelektroden“ eingehender gesprochen wird. Nackte Elektroden können deshalb mit Wechselstrom nicht verschweißt werden. Dem Metall-Wechselstromlichtbogen wird eine gewisse Gleichrichterwirkung zugesprochen.

Daß der Lichtbogen trotz der bei jeder Umkehr in der Stromrichtung eintretenden Unterbrechung des Stromflusses nicht abreißt, ist lediglich eine Folge des kurzen Zeitraumes, während dessen sich die Polwechsel vollziehen; der Gassäule ist keine Gelegenheit gelassen, sich auf Temperaturen abzukühlen, die zum Erlöschen des Lichtbogens notwendig sind.

Statische und dynamische Kennlinie. Die rasche Folge der Wechsel von Strom und Spannung, der weder die Temperatur der Gassäule noch der Elektroden unmittelbar zu folgen vermögen, hinterläßt Nachwirkungen, denen man die aus anderen Gebieten, z. B. aus dem Magnetismus übernommene Bezeichnung

„Hysteresis“ (Nachwirkungserscheinung, wörtlich: „Zuspätkommen“) beigelegt hat. Die Beobachtung dieser Vorgänge ist vor allem durch Aufstellung der dynamischen Kennlinie für Wechselstrom möglich. Die in Abb. 73 erwähnte Kennlinie ist nämlich eine sog. statische Kennlinie. Man nimmt eine solche, z. B. an einer Schweißdynamo in der Weise auf, daß man an Stelle des Lichtbogens einen veränderlichen Belastungswiderstand in den Stromkreis einschaltet und unter Änderung dieses Widerstands die jeweiligen Spannungen und Stromstärken mißt. Die statische Kennlinie veranschaulicht demgemäß mehr einen Dauerzustand, im Gegensatz zur dynamischen Kennlinie, die die Verhältnisse bei schnellen Veränderungen von Strom und Spannung innerhalb einer kurzen Zeitspanne kennzeichnet, wie dies insbesondere bei jedem Wechselstrom, aber auch bei Gleichstrom, vorkommt. Anders ausgedrückt: Die dynamische Kennlinie stellt die Abhängigkeit zwischen Spannung, Strom und Zeit dar.

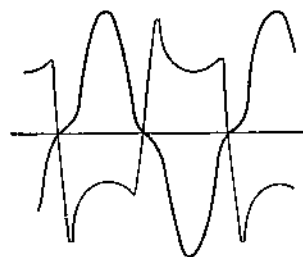


Abb. 74. Oszillogramm eines Wechselstromlichtbogens.

Die dynamische Kennlinie wird an Hand der Strom- und Spannungsschwankungen aufgezeichnet, die man mit Hilfe eines Oszillographen (Schwingungsaufzeichners) aufnimmt. Dieses Gerät gestattet es, die Strom- und Spannungskurven auf eine weiße, sich drehende Rolle zu werfen, wo sie photographisch festgehalten werden können. Die Aufnahme des Oszillogramms eines Wechselstromlichtbogens hat dann etwa das Aussehen der Abb. 74. Man sieht, daß sowohl Stromstärke wie Spannung sich von positiven Höchstwerten durch Null hindurch zu negativen Höchstwerten hin ändern und umgekehrt.

Hochfrequenzüberlagerung. Um den Wechselstrombogen ebenso leicht zünden und halten zu können wie den Gleichstrombogen, müßten Zündspannungen über 100 V verwendet werden, was besonders bei Wechselstrom eine Gefahr bedeutet. Um sie abzuwenden, ist man praktisch auf etwa die Hälfte der Leerlaufspannung heruntergegangen (im Mittel auf 70 V), so daß man zwecks leichterer Zündung und Stabilisierung des Bogens zur Anwendung besonderer Mittel gezwungen ist, von denen die Umhüllung der Elektroden bereits erwähnt wurde. Infolge des hohen Abfalls zwischen Zünd- und Schweißspannung haben alle Schweißspanner einen schlechten $\cos\varphi$ (Leistungsfaktor), den zu verbessern man durch Parallelschalten eines Kondensators anstrebt.

Ein anderes Mittel, um die Zündspannung herunterzudrücken und trotzdem das Zünden und Halten des Bogens zu erleichtern, ist die Überlagerung des Lichtbogens mit Hochfrequenzstrom. Dabei handelt es sich um hochfrequente Ströme von hoher Spannung (3000...5000 V) und außergewöhnlich hoher Schwingungszahl (sekundlich viel millionenmal). Es bestehen verschiedene Schaltungsmöglichkeiten, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann. Die Überlagerung mit hochfrequenten Strömen ermöglicht die Zündung des Bogens auch ohne Berührung der Elektrode mit dem Werkstück und unterhält ständig die Ionisierung der Bogenstrecke. Die bisher nur laboratoriumsmäßig erfolgreich durchgeführten Versuche haben eine praktische Verwendung deshalb nicht ergeben, weil der Isolationsschutz gegen die hohen Spannungen Schwierigkeiten verursacht und die verhältnismäßig verwickelte Einrichtung eine zu teure Ergänzung der Schweißanlage ist.

Um Zweifel auszuschließen, muß noch gesagt werden, daß die Hochfrequenzüberlagerung genau so gut beim Gleichstrombogen möglich ist, aber aus den soeben genannten Gründen auch hier praktisch bisher nicht zur Anwendung kommt.

2. Werkstoffübergang im Lichtbogen.

Allgemeines. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich nur auf die Metallelektrode.

Sofort nach dem Zünden des Lichtbogens beginnt der Werkstoffübergang von der Elektrode zum Werkstück. Gleichgültig, ob mit Gleich- oder Wechselstrom, mit nackten oder ummantelten Elektroden, waagrecht, senkrecht oder überkopf geschweißt wird, also auch unabhängig von der Stromrichtung und dem Elektronenweg, stets wandert der Elektrodenwerkstoff durch den Lichtbogen zum Werkstück ab. Diese ursprünglich merkwürdige Tatsache findet ihre Erklärung in später besprochenen Vorgängen, wenn auch die Auswirkung verschiedener Einflüsse noch der restlosen Klärung bedürfen. Abgesehen von einer erst kürzlich für Zwecke der Überkopfschweißung entwickelten sog. Sprühelektrode, die den Werkstoffübergang in fein verteilter Form (Spritzer) bewirkt, geht der Werkstoffübergang immer pilz- oder fadenförmig vor sich. Form, Ausmaß und Anzahl der flüssigen, meist mit einer Schlackenhaut überzogenen Metalltropfen wird u. a. auch durch die Größe der Oberflächenspannung beeinflusst.

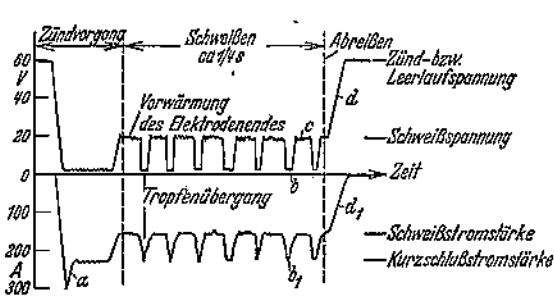


Abb. 75. Erklärungsoszillogramm einer Gleichstromschweißung.

Oszillographische Aufnahmen.

Die Vorgänge im Lichtbogen können bei der Beobachtung durch ein Dunkelglas nur roh erfaßt werden; man erkennt ein mehr oder weniger gleichmäßiges oder ein tropfenförmiges Abschmelzen der Elektrode. Der geeignetste Weg zur genaueren Untersuchung ist hinsichtlich der optischen Erscheinungen die Zeitdehner-Filmaufnahme, hinsicht-

lich der elektrischen Vorgänge die oszillographische Aufnahme der dynamischen Kennlinie, die sich beide zur Erfassung der Vorgänge günstig ergänzen. An Hand des Erklärungsoszillogramms einer Gleichstromschweißung (Abb. 75) soll der elektrische Verlauf eines kurzen Schweißabschnittes erläutert werden.

In der zeichnerischen Darstellung ist oberhalb der Nulllinie die Spannung, unterhalb von ihr die Stromstärke in Abhängigkeit von der Zeit aufgenommen. Das Oszillogramm ist in drei Hauptabschnitte unterteilt, und zwar in Zündvorgang, Schweißen und Abreißen des Bogens. Die Spannungskurve beginnt bei 60 V Zündspannung, wobei die Stromstärke noch 0 ist. Mit dem Aufsetzen der Elektrode auf das Werkstück (Kurzschließen!) fällt die Spannung nahezu auf 0, während ein Strom zu fließen beginnt, der praktisch zur gleichen Zeit seinen Höchstwert in einer Stromspitze a erreicht, um sofort wieder auf die eigentliche Kurzschlußstromstärke zurückzugehen. Beim Abheben der Elektrode bildet sich der Lichtbogen, und die Spannung steigt entsprechend dessen Länge auf den Schweißspannungswert, während der Strom auf die Schweißstromstärke zurückgeht.

Das Schweißen selbst beginnt mit dem Vorwärmen und Schmelzen (c) des Elektrodenendes und dauert eine gewisse Zeitspanne, die als Vorwärmezeit bezeichnet wird. Sie ist abhängig von der Bogenlänge und ein Kennzeichen für die Beschaffenheit der Elektrode. Der von der Elektrode zum Werkstück übergehende Metalltropfen schließt beide kurz, was in den Kurven durch Sinken der Spannung (b) und Anwachsen der Stromstärke (b_1) zum Ausdruck kommt. Sofort nach Abwandern des Tropfens wird die alte Lichtbogenlänge selbsttätig wiederher-

gestellt. Dieser Vorgang wiederholt sich im Oszillogramm während $\frac{1}{4}$ Sekunde siebenmal, womit der Normalfall eines günstigen Abschmelzvorganges gekennzeichnet sein soll. Die kleineren Schwankungen in der Schweißspannung c während des Vorwärmens haben ihre Ursache in der Bewegung des Schmelzbades sowie des verflüssigten Elektrodenendes. Bei beabsichtigtem Abheben der Elektrode oder unfreiwilligem Abreißen des Lichtbogens steigt die Spannung (d) auf den Leerlaufwert, während die Stromstärke (d_1) auf 0 zurückgeht.

Eine mit dem Oszillographen aufgenommene dynamische Kennlinie einer Wechselstromschweißung veranschaulicht Abb. 76. Die Zeitlinie liegt in der Mitte, sie entspricht der Nulllinie für die Stromverhältnisse entsprechend Abb. 75. Die Zeit ist demnach wiederum als Waagerechte, Spannung und Stromstärke sind beiderseits als Senkrechte aufgetragen. Der Bildabschnitt zeigt eine Schweißzeit von $\frac{3}{100}$ Sekunden an. Spannungs- und Stromkurven sind entsprechend Abb. 74 der Übersichtlichkeit halber wechselseitig aufgetragen. Die Spannungskurve ist verzerrt, zeigt zu Beginn jedes Wechsels eine Spitze und schneidet die Nulllinie zu anderer Zeit als die Stromkurve, wodurch die Phasenverschiebung zum Ausdruck kommt. Im mittleren Wechsel erreicht die Stromstärke einen größeren Wert als die beiden anderen unterhalb der Nulllinie, was auf eine gewisse, bereits erwähnte Gleichrichterwirkung des Wechselstrombogens schließen läßt.

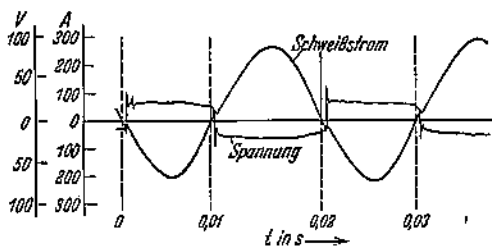


Abb. 76. Oszillogramm einer Wechselstromschweißung.

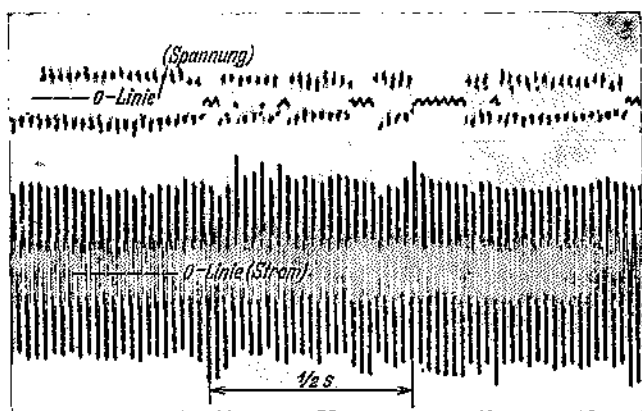


Abb. 77. Oszillogramm einer Wechselstromschweißung mit Tropfenübergang.

Einen Ausschnitt aus einer weiteren Wechselstromaufnahme zeigt Abb. 77, die sich von Abb. 76 dadurch unterscheidet, daß Spannung und Strom keine gemeinsame Nulllinie besitzen und die Kurven stark zusammengedrängt sind, was auch aus den eingetragenen Zeiten hervorgeht. Dadurch lassen sich mehrere Tropfenübergänge veranschaulichen.

Zeitdehner-Filmaufnahmen. Nach ursprünglich erheblichen Schwierigkeiten gelang es, nach dem Verfahren von Thun durch Steigerung der Bildzahl (sekundlich bis zu 4000 Aufnahmen) und Überstrahlung der großen Lichtbogenhelligkeit durch eine noch lichtstärkere Beleuchtungsquelle ein Schattenbild des Werkstoffüberganges zu filmen. Die im Auftrage des Fachausschusses für Schweißtechnik (VDI) von Hilpert und Thun angestellten Untersuchungen erstreckten sich auf oszillographische und Filmaufnahmen gleichzeitig. Unter etwa 3000 untersuchten Tropfengebildern ergeben sich zwei hervortretende Formen, und zwar die Pilz-

und die Fadenform. In Abb. 78 sind Ausschnitte aus Filmstreifen herausgezeichnet; sie entsprechen den unmittelbar aufeinanderfolgenden Zuständen in Zeitfolgen von je $\frac{1}{1600}$ Sekunde. Beim fadenförmigen Übergang (Abb. 78a)

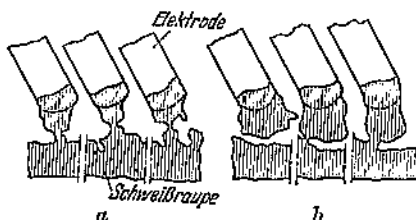


Abb. 78. Ausschnitte aus Filmaufnahmen vom Werkstoffübergang im Lichtbogen.
a = Fadenform; b = Pilzform.

tritt keine Verdickung des schmelzenden Elektrodenendes auf; ein kleiner Tropfen wandert unter Einschnüren und darauf eintretendem Abreißen auf das Werkstück hinüber. Der pilzförmige Tropfen (Abb. 78b) bildet sich unter Verdickung des Elektrodenendes, haftet schwankend an diesem

verhältnismäßig längere Zeit, um dann in größerem Umfang, oft explosionsartig, auf das Werkstück überzugehen. Die Dauer für einen Tropfenübergang schwankte zwischen $\frac{1}{7}$ und $\frac{1}{2000}$ Sekunde. Tropfen-

zahl je Sekunde und Verhältnis von Vorwärmezeit (Brenndauer des Bogens) zur darauffolgenden Tropfenübergangszeit (Kurzschluß) sind abhängig von der Beschaffenheit der Elektrode, von Spannung und Stromstärke. Mit Zunahme der Lichtbogenlänge, der Umhüllungsstärke sowie mit zunehmender Menge der Legierungsbestandteile verringert sich die Anzahl der Tropfenübergänge.

3. Der Kohlelichtbogen.

Der Lichtbogen zwischen Kohle und Metall (Benardos-Verfahren). Während das Schweißende der Metallelektrode tropfbar flüssig wird und in der geschilderten Form zum Werkstück übergeht, wird die Kohle nicht verflüssigt, vielmehr nur in fein zerstäubtem Zustand übergeführt und auf diese Weise die Leitfähigkeit der Lichtbogenstrecke unterstützt. Der Metall-Lichtbogen brennt viel unruhiger, als dies beim Kohlebogen der Fall ist, da ja die anhaltenden Schwankungen in der Bogenlänge, durch den Werkstoffübergang

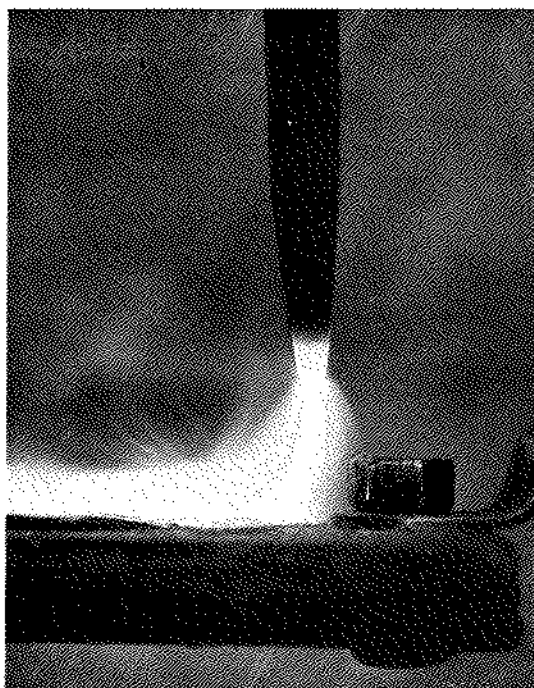


Abb. 79. Die Flucht des Kohlelichtbogens vor der Eintrittsstelle des Stroms.

verursacht, wegfallen. Im Gegensatz zum Metall-Lichtbogen sind hier erheblich größere Bogenlängen erwünscht, um den schädlichen Einfluß des Kohlenstoffs auf die Schweißung zu verhüten. Bogenlängen bis zu 80 mm sind keine Seltenheit.

Die Spannung des Lichtbogens zwischen Kohle und Metall liegt niedriger als die des Bogens zwischen Kohle und Kohle. Man kann den Benardos-Lichtbogen schon mit einer Mindestspannung von 15 V aufrechterhalten. In den Abb. 79 und 80

sind photographische Aufnahmen eines Kohle- und eines Metall-Lichtbogens gegenübergestellt. In der mittleren Zone des Kohlelichtbogens (Abb. 79) sieht man deutlich einen durch hellere Färbung ausgezeichneten Stromkern, das ist der Weg der Elektronen. Diesen Kern umgibt ein lichtschwächerer Mantel, der seinerseits wieder von der Aureole ummantelt wird. Auffällig ist der elektromagnetische Einfluß auf die Richtung des Lichtbogens, wovon man bei selbsttätiger Kohlelichtbogenschweißung erfolgreich Gebrauch macht. So nimmt bei zum Metall schräg gehaltener Kohle der Bogen nicht, wie erwartet werden könnte, den kürzesten Weg (das wäre die Senkrechte zwischen beiden Polen), sondern er stellt sich in der Verlängerung des Kohlestabes, also axial zu diesem, ein. Diese für manche Schweißarbeiten günstige Tatsache, die nur beim Kohlebogen zutrifft, ist darauf zurückzuführen, daß sich in Richtung des Kohlestabes ein Feld magnetischer Wirbelringe bildet, das, unterstützt durch das Bestreben der Kathodenstrahlen, axial aus der Kathodenfläche auszutreten, dem Bogen eine gleichbleibende Richtung gibt. Auch die Flucht des Bogens vor der Eintrittsstelle des Stromes in das Schweißgut und sonstige praktisch unliebsame Ablenkungen sind auf das Vorhandensein magnetischer Kraftlinien zurückzuführen. Diese Wahrnehmung ist in Abb. 79 photographisch festgehalten (Stromeintritt durch den an der Mutter befestigten Kabelschuh). Starkes Zusammendrängen von Stromlinien kann unter Umständen zum magnetischen Ausblasen des Bogens führen. Auf das sog. magnetische Richtfeld wird später eingegangen.

Aus den theoretischen Erörterungen über die Ionisierung ergibt sich für die Praxis der Kohlelichtbogenschweißung die Tatsache, daß die Kohlelektrode an den — Pol anzuklemmen ist, wobei sie gleichmäßig und spitz abbrennt (Abb. 79) und ein ruhiger Lichtbogen erhalten wird. Er läßt sich gut zünden und ohne Abreißen lang halten. Der Lichtbogen der an den + Pol angeschlossenen Kohlen läßt sich schwer zünden, brennt unruhig (Tanzen des Bogens) und reißt schon bei mäßiger Länge ab. Die Kohle brennt stumpf und ungleichförmig ab; die Schweißung nimmt mehr Kohlenstoff auf. Dem Schweißer, dem diese Erscheinungen geläufig sind, kann die Kohlelektrode in Zweifelsfällen als Mittel zur Bestimmung der Polarität dienen.

Belastung der Kohlelektroden. Bei dem Lichtbogen zwischen Kohle und Metall ist eine Spannung von 35...70 V üblich. Aus später hervorzuhebenden Gründen bedingt der zu Schweißzwecken benutzte Lichtbogen Längen bis zu 80 mm. Das erfordert andererseits große Stromleistungen und führt zu einem schnellen Abbrand der Kohle, so daß selbst bei großem Kohlendurchmesser (30 mm) und 400 mm Länge nur eine Brenndauer von 2 Stunden erreichbar ist. Dieser schnelle Abbrand

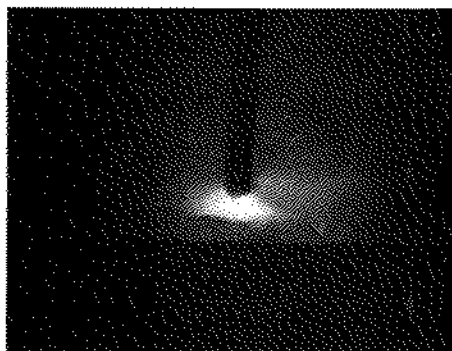


Abb. 80. Metall-Lichtbogen.

Tabelle 11.

Schweißstrom- stärke	Lichtbogen- spannung	Elektrodenndurchmesser	
		Gewöhnliche Kohle mm	Graphitkohle mm
60...140	30...35	10...15	8...10
140...210	35...45	15...22	10...13
210...285	40...50	22...26	14...16
285...400	45...75	26...30	17...20

drückt auch dem Aussehen des Kohlestabes seinen Stempel auf. Wie aus Abb. 79 zu erkennen ist, sind die Kohleelektroden an den Kraterenden auf Längen von 50...150 mm konisch abgebrannt. Der Kohledurchmesser muß der Größe der Belastung angepaßt werden, worüber Tabelle II Aufschluß gibt. Daraus geht hervor, daß man verschiedene Kohleelektrodenarten verwendet, die später besprochen werden. Bei selbsttätiger Schweißung kann bei gleicher Belastung der Kohledurchmesser geringer gewählt werden.

B. Die Einrichtungen für die Lichtbogenschweißung.

1. Die Stromquellen.

a) Allgemeiner Überblick.

Da man mit Gleich- und mit Wechselstrom schweißen kann, ergeben sich grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten der Schweißstrombeschaffung. Neben rein schweißtechnischen Belangen (Elektrodenart, Werkstoffeigenschaften und -abmessungen, Konstruktion u. a.) sind vor allem auch die örtlichen Strom- und Arbeitsverhältnisse für die Wahl der später im einzelnen geschilderten Stromquellen maßgebend. Für einen allgemeinen Überblick ergeben sich folgende Möglichkeiten:

1. Es ist kein elektrisches Stromnetz vorhanden.

Der Schweißstrom muß an Ort und Stelle selbst erzeugt werden, und zwar durch eine motorisch unmittelbar gekuppelte Schweißdynamo (Generator). Als Antriebskraft wird zweckmäßig ein Explosionsmotor (Diesel- oder Gasmotor) benutzt; andere Antriebsmöglichkeiten, z. B. Transmission u. a., kommen in der Praxis kaum in Frage. In diesem Falle wird mit Gleichstrom geschweißt.

2. Es ist ein Gleichstromnetz ausreichender Anschlußleistung vorhanden.

a) Schweißen unmittelbar vom Netz. Ein nur selten vorkommender Fall, bei dem ein beschränktes und unwirtschaftliches Schweißen über Vorschaltwiderstände möglich ist.

b) Schweißstrom im Generator erzeugt. Eine Schweißdynamo wird mit einem an das Netz angeschlossenen Motor gekuppelt (Motor-Generator). Dabei handelt es sich um einen Gleichstrom-Gleichstrom-Umformer, dessen Motorseite vom Netz gespeist wird. Die Gleichstromdynamo ist von dem Motor elektrisch gänzlich unabhängig.

3. Es ist ein Drehstrom- (Wechselstrom-) Netz vorhanden.

a) Gleichstromschweißung.

α) Es kann mit einem Drehstrom-Gleichstrom-Maschinensatz (Umformer) wie unter 2b gearbeitet werden, nur mit dem Unterschied also, daß der Gleichstrommotor durch einen solchen für Drehstrom ersetzt wird.

β) Ein an das Netz angeschlossener Gleichrichter spannt den Wechselstrom um und liefert gleichgerichteten Schweißstrom.

b) Wechselstromschweißung.

α) An das Netz wird ein Schweißumspanner (Transformator) angeschlossen, der einen Wechselstrom geeigneter Spannung und Stromstärke liefert.

β) Es kann ein Wechselstrom-Wechselstrom- oder Periodenumformer verwendet werden.

b) Anforderungen an die Stromquellen.

Allgemeine Anforderungen. Auf Grund der Ausführungen im vorigen Hauptabschnitt III A wissen wir, daß der Schweißlichtbogen nur bei bestimmten Span-

nungen aufrechterhalten werden kann, und daß die Spannung des Lichtbogens mit wachsender Stromstärke sinkt. Der Lichtbogen hat eine fallende statische Kennlinie (Charakteristik), wie wir sagen. Diese Kennlinie ist in Abb. 81 in der Kurve *a* im Vergleich mit den theoretischen Grenzkurven *b* und *d* wiedergegeben. Zunächst muß eine Zündspannung vorhanden sein (für Kurve *a* bei 100 V), damit beim Berühren der Elektrode mit dem Werkstück (Antippen) ein Lichtbogen erzeugt werden kann. Stabiler brennt der Lichtbogen bei niedrigen Spannungen, in der Gegend von 20 V, weshalb man praktisch mit Spannungen schweißen wird, die in dem mit *Δe* bezeichneten Arbeitsbereich gelegen sind. Die Schweißspannung von 20 V ist auf der Kurve *a* mit Arbeitspunkt bezeichnet, der etwa der Verwendung einer 4 mm-Elektrode entspricht. Die statische Kennlinie einer Schweißdynamo ist dem Verlauf der Kurve *a* möglichst anzupassen. Wird im Arbeitspunkt an die Bogenkennlinie *a* eine Tangente *b* gelegt, so schneidet diese die Spannungssenkrechte bei 40 V und die Stromwaagerechte bei etwa 300 A. Diese Maschinenkennlinie *b* würde hinsichtlich der niedrig gelegenen Leerlaufspannung als günstig anzusprechen sein, da der Spannungsabfall bis auf die Schweißspannung nur gering ist. Hinsichtlich der Stromstärke aber wäre dieser Grenzfall ungünstig, weil die Kurzschlußstromstärke etwa das Doppelte der Schweißstromstärke beträgt. Als Idealkurve für die Stromstärke wäre die Senkrechte *d* anzusehen, bei der die Kurzschlußstromstärke den Wert der Schweißstromstärke nicht überschreitet. Es ist aber praktisch unmöglich, eine Dynamo mit solchen elektrischen Eigenschaften zu konstruieren. Da die beiden Grenzfälle *b* und *d* teils ungünstig, teils nicht erreichbar sind, ist man in der Praxis gezwungen, auf Kennlinien hin zu arbeiten, die einmal nicht zu hohe Zündspannungen und andererseits nicht zu hohe Kurzschlußströme aufweisen. Die als Mittelkurve eingezeichnete geradlinige Kennlinie *c* hat zwar einen geringen Kurzschlußstrom (J_k), aber noch eine zu hohe Zündspannung. Betrachtet man die Neigung der Kennlinien im Arbeitsbereich, so ist dort ein möglichst steiler Verlauf wünschenswert, da dann Spannungsschwankungen nur geringe Änderungen in der Stromstärke zur Folge haben. Wie man diese Kennlinien durch besondere Schaltungsarten erzielt, wird später behandelt.

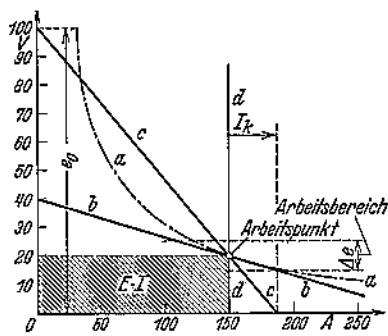


Abb. 81. Statische Kennlinie des Lichtbogens.

Bedingungen für eine gute Schweißstromquelle.

1. Spannung und Stromstärke müssen sich den Veränderungen, die sich durch die schwankende Lichtbogenlänge ergeben, gut anpassen (steile Kennlinie im Schweißbereich).
2. Der Kurzschlußstrom ist bei Berührung von Elektrode und Werkstück oder beim Werkstoffübergang möglichst niedrig zu halten.
3. Spannung und Stromstärke sollen sich je nach den Betriebsverhältnissen weitgehend regeln lassen.
4. Der Lichtbogen soll sich leicht zünden und halten lassen; die erforderliche Schweißspannung soll nach Kurzschluß schnell wieder erreicht werden.
5. Guter Wirkungsgrad bzw. hoher Leistungsfaktor ($\cos \varphi$).
6. Geringe Leerlaufverluste.
7. Allgemeine Forderungen: Geringes Gewicht, funkenfreier Lauf, gedrängte Bauart, gute Lüftung und Kühlung, Schutz gegen Regenwasser und Staub.

Die Begrenzung des Kurzschlußstromes ist nicht allein zum Schutze der Stromquelle erforderlich, sondern auch um ein starkes Spritzen der Elektrode und ihr Festkleben beim Zündvorgang zu verhüten.

Ob eine Maschine die Forderung unter Punkt 4, die Schweißspannung nach Kurzschluß rasch wieder herzustellen, erfüllt, ist aus der dynamischen Kennlinie erkennbar. Bei träger Anpassung der Maschine an die Schweißverhältnisse wird eine Beruhigungs-drosselspule, auch Stabilisator genannt, in den Schweißstromkreis eingeschaltet, die im Augenblick des Stromabfalles eine Spannungserhöhung und bei Stromanstieg eine Spannungserniedrigung bewirkt.

Spannungen und Stromstärken. Die erforderliche Schweißspannung ergibt sich nach dem vorigen Hauptabschnitt zu $15 \cdots 75$ V. Im einzelnen braucht man bei der Stahlschweißung und bei der Gußeisenkaltschweißung mit Metallelektroden nur $15 \cdots 30$ V, bei der Gußeisenwarmschweißung mit Metallelektroden und bei der Schweißung mit Kohleelektroden $30 \cdots 75$ V. Die Zündspannung bzw. Leerlaufspannung der Stromquelle soll einerseits möglichst hoch sein, um ein leichtes Zünden des Lichtbogens zu erzielen, anderseits aber möglichst niedrig, um den Schweißer keiner Gefahr auszusetzen und um zu große Maschinen und damit zu hohe Anschaffungskosten und ungünstige Wirkungsgrade zu vermeiden. Bei Gleichstrom sind mit Rücksicht auf den Schweißer Leerlaufspannungen bis etwa 100 V zulässig, bei Wechselstrom soll man wegen der ungünstigeren Wirkung auf den menschlichen Körper möglichst nicht über 70 V hinausgehen. Wenn nur das Schweißen mit Metallelektroden vorgesehen ist, so ist es zweckmäßig, die Höhe der Leerlaufspannung einzuschränken, damit der Schweißer hierdurch gezwungen wird, den Lichtbogen möglichst kurz zu halten. Die im Schweißstromkreis in Frage kommenden Stromstärken schwanken allgemein betrachtet zwischen etwa 40 und 1000 A. Die meist üblichen Stromstärken sind $60 \cdots 250$ A für die Stahl- und Gußeisenkaltschweißung und $400 \cdots 600$ A für die Gußeisenwarmschweißung.

c) Verwendung von Netzstrom.

Allgemeines. In der Entwicklungszeit der Lichtbogenschweißung nahm man den Strom zum Schweißen zuerst aus Akkumulatorenbatterien, dann aus dem allgemeinen Stromversorgungsnetz selbst oder aus normalen Dynamomaschinen unter Einschaltung von Widerständen, um deren Normalspannung von z. B. 110

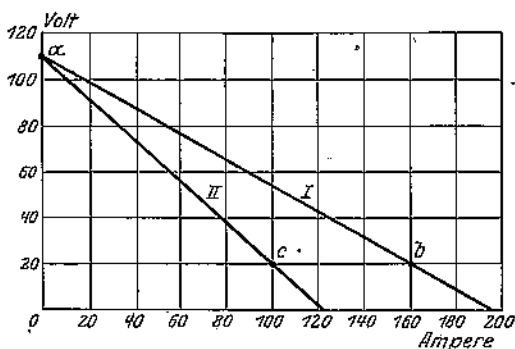


Abb. 82. Statische Kennlinie des Lichtbogens bei Verwendung von Netzstrom.

oder 220 V auf die Schweißspannung herabzudrosseln. Der Vorschaltwiderstand, der zur Erzielung verschiedener Stromstärken regelbar sein muß, ist entweder ein Drahtwiderstand (aus Eisen; Sonderlegierungen, wie z. B. Nickel usw., sind zu teuer) oder ein Wasserviderstand. Im letzten Falle werden zwei Eisenplatten in einen Holzbottich gehängt (Abb. 83). Die Kennlinie der Netzstromschweißung zeigt Abb. 82 für zwei Regelstellungen I und II und für eine Netzspannung von 110 V. Wir sehen zunächst die

erwünschte fallende Kennlinie. Bei der Zündspannung a (110 V) läßt sich der Lichtbogen mit Sicherheit zünden. Regelstellung I gibt sodann bei Punkt b mit

20 V Schweißspannung eine Schweißstromstärke von 160 A und Regelstellung II bei Punkt c mit 20 V Schweißspannung eine Schweißstromstärke von 100 A. Bei beiden Stellungen ist der Kurzschlußstrom (Spannung ~ 0) genügend begrenzt; bei Stellung I beträgt er z. B. annähernd 200 A. Die Größe des Vorschaltwiderstands R_1 bzw. R_2 ist für unser Beispiel:

$$R_1 = \frac{E}{J_1} = \frac{110 - 20}{160} = 0,56 \, \Omega \quad \text{und} \quad R_2 = \frac{E}{J_2} = \frac{110 - 20}{100} = 0,9 \, \Omega.$$

Bei einer Veränderung der Spannung schwankt die Stromstärke, infolge der genügend steil abfallenden statischen Kennlinie, nur in mäßigen Grenzen. Die Änderung von Spannung und Stromstärke findet mit Hilfe des Vorschaltwiderstands fast gleichzeitig statt; anders ausgedrückt: Die dynamische Kennlinie ist ebenfalls günstig. Die wesentlichsten Bedingungen für gute Schweißeigenschaften sind also an und für sich erfüllt.

Stromstoßautomat. Die Schweißung vom Netz hat neben dem nachher zu besprechenden und nicht behebbaren Nachteil geringer Wirtschaftlichkeit noch einen anderen, durch Anwendung eines Stromstoßautomaten aber behebbaren Nachteil. Durch die beim Schweißen unvermeidliche, stoßweise einsetzende Belastung des Netzes werden andere, an das Netz angeschlossene Stromabnehmer geschädigt, da die Spannung im Netz stark schwankt. Der in die Schaltung für Schweißung von Netz eingezeichnete Stromstoßautomat (Abb. 83) wirkt nach dieser Richtung hin ausgleichend. Abb. 83 zeigt zunächst, daß bei Einlegen des Schalters der Strom, unter Messung durch Voltmeter V und Amperemeter A , von der Stromquelle (Betriebsdynamo oder Netz) durch den Stromstoß-

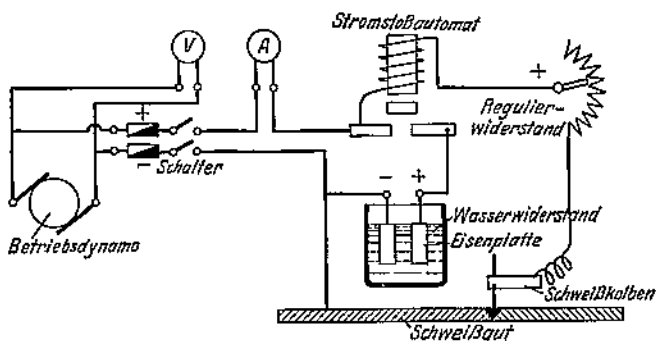


Abb. 83. Schweißen vom Gleichstromnetz mit Stromstoßautomat.

automaten, Regelwiderstand, Schweißkolben; Lichtbogen, Schweißgut zurück zur Dynamo geht. Der Magnet des Stromstoßautomaten wird dabei durch den Schweißstrom geöffnet gehalten, fällt aber bei Unterbrechung des Schweißstroms sofort herab und schaltet den durch den Wasserwiderstand gehenden Stromkreis ein. Der Wasserwiderstand oder an seiner Stelle ein Drahtwiderstand muß natürlich in seiner Größe dem Widerstand entsprechen, den sonst der Schweißstromkreis bietet. Ein Nachteil des Stromstoßautomaten ist der, daß ständig, auch in den Schweißpausen, Strom verbraucht wird. Außerdem besteht die Gefahr, die offene Netzspannung zu berühren, da der Spannungsabfall im Schweißstromkreis erst bei Stromfluß einsetzt. Auch der Umstand, daß die hohe Netzspannung das Halten eines langen Lichtbogens gestattet, ist ungünstig.

Wirtschaftlichkeit. Das Schweißen vom Netz hoher Spannungen über Vorschaltwiderstände ist stets sehr unwirtschaftlich. Wenn man z. B. die Spannung von 110 V durch den Widerstand auf 20 V herabdrosselt, so macht man nur $20/110 \cdot 100 = 18,2\%$ der in den Schweißstromkreis hineingegebenen elektrischen Leistung nutzbar, d. h. man erreicht nur einen Wirkungsgrad von 0,182. Je höher die Netzspannung, desto geringer ist demnach der Wirkungsgrad. Bei 220 V

Netzspannung beträgt er z. B. nur noch 0,091. Demgegenüber erreicht man bei Gleichstromschweißumformern Wirkungsgrade von 0,35...0,6, bei Wechselstromschweißumspannern 0,8...0,96. Das Schweißen vom Netz oder von einer normalen Dynamomaschine aus ist also aus rein wirtschaftlichen Gründen zu vermeiden und wird auch nur selten angewendet.

d) Gleichstromschweißumformer.

Allgemeines. Die im vorigen festgelegten Anforderungen an eine für Schweißzwecke gut brauchbare Stromquelle haben zur weiteren Ausbildung der Gleichstromschweißung und zum Bau besonderer Schweißumformer, bestehend aus Antriebsmotor (für Gleichstrom oder Drehstrom) und Schweißgenerator (Schweißdynamo), geführt.

Um jeden Irrtum auszuschließen, muß ausdrücklich darauf hingewiesen werden, daß zwischen Motor und Dynamo bzw. zwischen Netz und Dynamo keinerlei elektrische Verbindungen bestehen. Der vom Netz dem Motor zugeführte Strom dient nur zum Motorantrieb. Der Schweißstrom wird von den elektrischen Einrichtungen des Motors und vom Netz unabhängig in der vom Motor getriebenen Dynamo erzeugt. Zwischen Motor und Dynamo besteht also nur eine mechanische Kupplung.

Einige der wesentlichsten, insbesondere in Deutschland gebräuchlichen Ausführungsformen von Schweißumformern sollen im folgenden betrachtet werden. Die Schweißgeneratoren sind entweder selbst-, eigen- oder fremderregt. Zuweilen trifft man auch eine Vereinigung der Selbst- mit der Eigen- bzw. Fremderregung

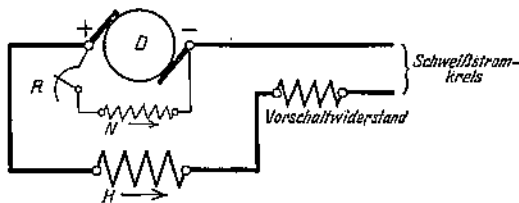


Abb. 84. Schaltung eines Schweißgenerators mit Verbundwicklung und Vorschaltwiderstand.

beispiel, dessen Schaltung Abb. 84 in den Hauptteilen wiedergibt, ist der Schweißgenerator *D* eine Verbund- (Compound-) Maschine, d. h. er hat eine Nebenschlußwicklung *N* und eine Hauptstromwicklung *H*. Die Generatorspannung wird im Nebenschlußkreis bei *R* geregelt. Der Generator zeigt als Verbundmaschine eine leicht abfallende statische Kennlinie (z. B. *I'* in Abb. 85). Durch die

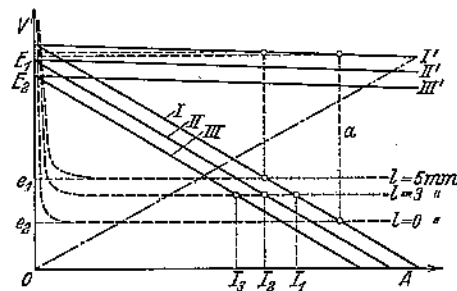


Abb. 85. Statische Kennlinie eines Schweißgenerators mit Verbundwicklung und Vorschaltwiderstand.

Abb. 84 angegeben, ein nicht regelbarer Vorschaltwiderstand, der bei steigender Stromstärke einen der Steigerung entsprechenden Spannungsabfall herbeiführt. Die statischen Kennlinien von Generator und Vorschaltwiderstand zu-

an. Um die fallende Kennlinie zu erzielen, bedient man sich bei normalen Generatoren regelbarer Vorschaltwiderstände, bei Schweißgeneratoren ordnet man eine Gegenverbundwicklung an, oder man verstärkt die Ankerrückwirkung durch Bürstenverschiebung.

Generatoren mit Vorschaltwiderstand. In dem Ausführungsbeispiel, dessen Schaltung Abb. 84 in den Hauptteilen wiedergibt, ist der Schweißgenerator *D* eine Verbund- (Compound-) Maschine, d. h. er hat eine Nebenschlußwicklung *N* und eine Hauptstromwicklung *H*. Die Generatorspannung wird im Nebenschlußkreis bei *R* geregelt. Der Generator zeigt als Verbundmaschine eine leicht abfallende statische Kennlinie (z. B. *I'* in Abb. 85). Durch die Regelung können auch die Kennlinien *II'* und *III'* erhalten werden. Die Leerlaufspannung der Kennlinie *I'* liegt zweckmäßig bei etwa 65 V; diese Leerlaufspannung kann z. B. bis auf 35 V heruntergeregelt werden. Im Hauptstromkreis liegt nun noch, wie in

sammen entsprechen dann den Linien *I*, *II* und *III*. In Abb. 85 sind außerdem noch die Kennlinien des Metall-Lichtbogens für Längen von 0, 3 und 5 mm eingetragen. Wir sehen, daß z. B. bei einer Bogenlänge von 3 mm durch Regelung im Nebenschlußkreis des Generators auf die drei verschiedenen Schweißstromstärken J_1 , J_2 und J_3 eingestellt werden kann. Ferner ist zu erkennen, daß, wenn sich die Lichtbogenlänge von 0...5 mm (entsprechend der Spannungsveränderung von e_2 auf e_1) verändert, die Spannungsänderung am Generator nur geringfügig ist. Die magnetische Trägheit des Generators wird also gar nicht zur Geltung kommen. Vielmehr wird, wie beim Schweißen vom Netz, die Änderung von Stromstärke und Spannung mit Hilfe des Vorschaltwiderstands sehr schnell vor sich gehen; mithin: günstige statische und dynamische Kennlinien. Ein Nachteil der Anlage liegt darin, daß, wie beim Schweißen vom Netz, wenn auch nicht in demselben Maße, durch die Herabdrösselung der Spannung mit Hilfe des Vorschaltwiderstands der Wirkungsgrad der Anlage herabgedrückt wird (heute selten).

Generatoren mit Gegenverbundwicklung und Eigenenerregung. Ein anderes Mittel, um eine fallende statische Kennlinie für den Schweißgenerator selbst zu erhalten, ist die Anordnung einer sog. Gegen-

verbundwicklung auf den Magnetpolen des Generators. Der Generator ist eine Nebenschlußmaschine (s. Abschnitt I C 3). In Abb. 86 wird die Erregerwicklung *N* von einer besonderen kleinen, mit dem Schweiß-

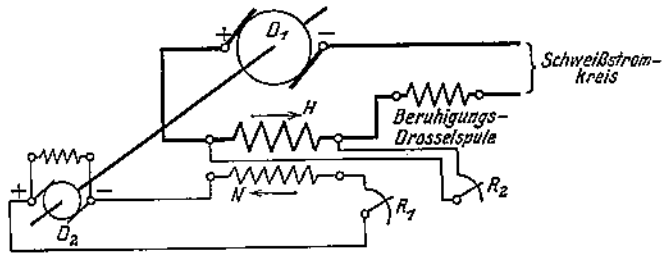


Abb. 86. Schaltung eines Schweißgenerators mit Gegenverbundwicklung und Eigenenerregung.

generator D_1 auf derselben Welle sitzenden Erregerdynamo D_2 gespeist. Die Leerlaufspannung wird durch einen Regler R_1 im Nebenschlußkreis eingestellt. Eine weitere Regelung der Spannung und Stromstärke kann durch einen Regler R_2 erfolgen, der der nachher beschriebenen Hauptstromwicklung *H* parallel gelegt wird. Man bezeichnet diesen Regler R_2 auch als „Shunt“ und spricht von einem Abshunten der Hauptstromwicklung. Legt man nun eine zweite Wicklung *H* mit entgegengesetztem Stromdurchgang über die Erregerwicklung und schaltet man diese Wicklung *H* in den äußeren Stromkreis ein (also Hauptstromwicklung), so wird mit wachsender Stromstärke im äußeren Stromkreis (dem Schweißstromkreis) das Magnetfeld der Wicklung *N* durch das Magnetfeld der Wicklung *H* geschwächt und somit die Spannung herabgedrückt. Man spricht bei dieser Schaltung von einer Gegenhauptstromwicklung oder Gegenverbundwicklung. Die Eigenenerregung der Nebenschlußwicklung hat den Vorteil, daß der Schweißgenerator nach Kurzschluß sehr schnell wieder auf Spannung kommt, während bei Maschinen mit Selbsterregung die Spannung nach Kurzschluß nur langsam wiederkehrt. Die Schweißgeneratoren der beschriebenen Art und auch mehrere der folgenden Schweißgeneratoren haben meistens noch eine Beruhigungsdrosselspule (auch Selbstinduktion oder Stabilisator genannt) im Schweißstromkreis, wie sie auch in Abb. 86 eingezeichnet ist. Diese Drosselspule besteht aus einer Anzahl Drahtwindungen und wirkt einmal beim plötzlichen Anwachsen der Stromstärke (Kurzschluß) in der Weise, daß dann in ihr eine der Spannung des Schweißstromkreises entgegengesetzte Spannung induziert (erregt) wird; daher auch die Bezeichnung „Selbstinduk-

tion“. Durch die entgegengesetzte Spannung und den damit erzeugten Gegenstrom wird aber die Schweißstromstärke erniedrigt. Fällt umgekehrt die Stromstärke im Schweißstromkreis, so erzeugt die Selbstinduktion eine zusätzliche

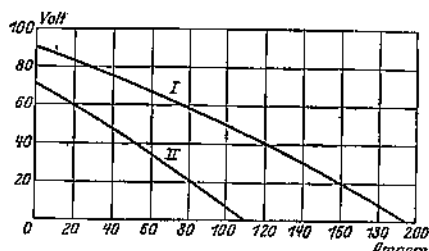


Abb. 87. Statische Kennlinie eines Schweißgenerators mit Gegenverbundwicklung und Eigenerrregung.

Spannung. Sie wirkt also dämpfend auf zu starke Schwankungen von Spannung und Stromstärke und ermöglicht ein leichteres Ziehen und Aufrechterhalten des Lichtbogens; sie hat aber andererseits den Nachteil, daß sie, wie jede Drosselspule, Stromverluste mit sich bringt.

Abb. 87 zeigt die statische Kennlinie des beschriebenen Schweißgenerators bei zwei Regelstellungen. Bei Stellung I hat der Generator 90 V Leerlaufspannung (bei Stellung II: 70 V) und gibt bei 20 V

Schweißspannung eine Stromstärke von 160 A (bei Stellung II: 80 A). Die statische Charakteristik ist also zufriedenstellend, aber die dynamische ist nicht so günstig, weil das Feld der Gegenverbundwicklung keine besonders schnelle

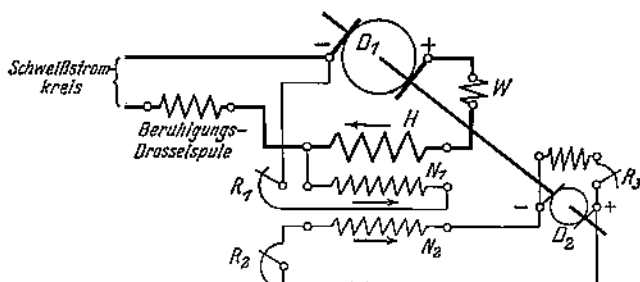


Abb. 88. Schaltung eines Schweißgenerators mit Gegenverbundwicklung, Selbst- und Eigenerrregung.

Änderung von Spannung und Stromstärke zuläßt. Vorteilhaft ist zwar, wie schon erwähnt, die Eigenerrregung. Sie kommt aber infolge der Nachwirkung des Gegenfeldes nicht so schnell zur Auswirkung wie bei den später beschriebenen Maschinen mit Ankerrückwirkung und Eigenerrregung.

Generatoren mit Gegenverbundwicklung, Selbsterregung und Eigenerrregung. Diese Ausführung und Schaltung ist nach dem Namen des Erfinders als Krämer-schaltung bezeichnet worden. Zur Gegenverbundwicklung H und Eigen-

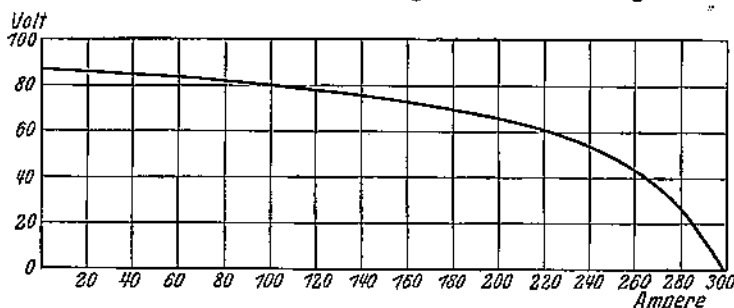


Abb. 89. Statische Kennlinie eines Schweißgenerators mit Gegenverbundwicklung, Selbst- und Eigenerrregung.

errregung N_2 (Abb. 88) tritt noch eine selbsterregte Nebenschlußwicklung N_1 . Hierdurch wird die in Abb. 89 wiedergegebene statische Kennlinie der Maschine insofern verbessert, als die Kurve im Bereich der praktischen Schweißspannungen (15...30 V) steiler abfällt, d. h. bei Veränderung der Spannung in den genannten

Grenzen schwankt die Stromstärke nur sehr wenig. Der Schweißgenerator hat drei Regler, und zwar bei R_1 im selbsterregten Nebenschlußkreis, bei R_2 im eigen-erregten Nebenschlußkreis und bei R_3 , wo die Nebenschlußwicklung der kleinen Erregerdynamo D_2 geregelt werden kann. Die Schaltung sieht ferner, wie in Abb. 86, eine Beruhigungs-drosselspule im Schweißstromkreis vor und schließlich noch eine Wendepol- (oder Hilfspol-) Wicklung W im Hauptstromkreis. Letztere findet bei der Mehrzahl der Schweißgeneratoren Anwendung; sie ist zunächst kein Mittel zur Verbesserung der statischen oder dynamischen Kennlinie der Maschine (anders ausgedrückt: kein Mittel zur Verbesserung der schweißtechnischen Eigenschaften der Maschine); sie dient vielmehr dazu, einen möglichst funkenfreien Lauf des Schweißgenerators zu erzielen. Auf die Ursache der Funkenbildung und die Wirkung der Wendepolwicklung wird kurz bei den Maschinen mit Ankerrückwirkung (s. den nächsten Absatz) eingegangen, weil das dort näher erklärte Ankerfeld bei der Betrachtung von Bedeutung ist.

Nach den früheren Ausführungen ist die statische Kennlinie der Krämermaschine günstig, nicht ganz ebenso die dynamische. Die Maschine wird etwas träge arbeiten, ein Nachteil, der nach Möglichkeit wieder durch die Beruhigungs-drosselspule behoben wird. Maschinen dieser Schaltungsart werden kaum noch gebaut.

Generatoren mit Ankerrückwirkung und Eigenregung. Das Wesen der Ankerrückwirkung, die hier nutzbar gemacht wird, ergibt sich aus folgender Überlegung. Nach Abschnitt I C 3 wird durch Drehung des Ankers zwischen den Polen ein magnetisches Feld, in Abb. 90a als Hauptfeld bezeichnet, zur Stromerzeugung ausgenutzt. Im Anker bildet sich nun, sobald durch seine Drähte Strom hindurchfließt, ein zweites magnetisches Feld, das sog. Ankerfeld (Abb. 90b). Dieses schwächt und verzerrt das Hauptfeld. Die Wirkung dieses zum Hauptfelde quer stehenden Ankerfeldes kann

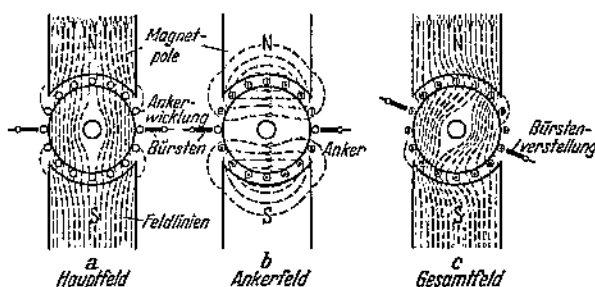


Abb. 90. Feldverteilung im Anker einer Gleichstromdynamo mit Ankerrückwirkung.

durch Verschiebung der Bürsten im Drehsinne des Ankers gesteigert werden, so daß der in Abb. 90c mit Gesamtfeld bezeichnete Zustand eintritt (verstärkte Ankerrückwirkung). Durch entsprechende Bemessung der Ankerwicklung u. a. m. kann man die Ankerrückwirkung bei Schweißgeneratoren so ausnützen, daß beim Überschreiten einer gewissen Stromstärke das Ankerfeld die Spannung schließlich bis auf Null herabsinken läßt.

Der Schweißgenerator (Abb. 91) zeigt weiter eine Wendepolwicklung W , genauer gesagt: Wendepole, deren Wicklung im Hauptstromkreis liegt. Wie schon im vorigen Absatz erwähnt, sollen diese Wendepole zunächst die Funkenbildung am Kollektor der Maschine beheben, die letzten Endes von einem Teile des Ankerfeldes herrührt. Wendepole, die bei einer zweipoligen Maschine senkrecht zu den

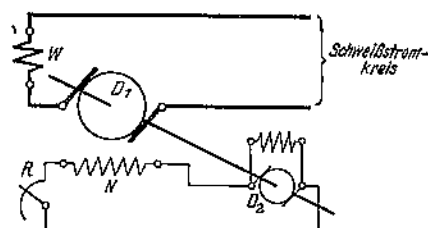


Abb. 91. Schaltung eines Schweißgenerators mit Ankerrückwirkung und Eigenregung.

Hauptpolen angeordnet werden, ergeben nämlich ein dem Ankerfeld entgegengesetzt gerichtetes Feld, wodurch das Ankerfeld geschwächt bzw. aufgehoben wird. Im vorliegenden Falle (Abb. 91) sind die Wendepolwicklungen jedoch so

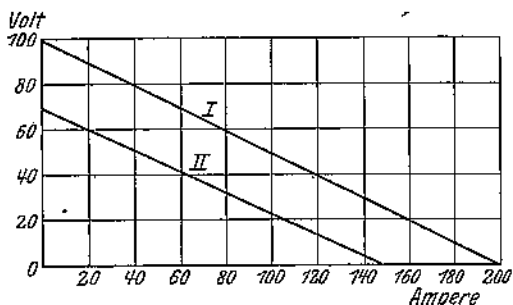


Abb. 92. Statische Kennlinie eines Schweißgenerators mit Ankerrückwirkung und Eigenerregung.

geschaltet, daß sie das Ankerfeld und damit die Ankerrückwirkung verstärken. Die Regelung der Maschine erfolgt im Nebenschlußkreis bei R . Die Nebenschlußwicklung N ist eigenregt durch die besondere, mit dem Schweißgenerator D_1 auf einer Welle sitzende Erregermaschine D_2 . Die statische Kennlinie eines solchen Schweißgenerators sehen wir in Abb. 92 für zwei Reglerstellungen. Bei Stellung I hat der Generator 100 V Leerlaufspannung, 140...170 A Schweißstromstärke bei 15...25 V und eine Kurzschlußstromstärke von 200 A, bei Stellung II ist die Leerlaufspannung 70 V, die Schweißstromstärke etwa 90...120 A bei 15...25 V und die Kurzschlußstromstärke 150 A.

Schweißgeneratoren dieser Art zeigen eine genügend steile statische bei gleichzeitig guter dynamischer Kennlinie; außerdem sind sie einfach in der Bauart und in der Schaltung. Die dynamische Kennlinie ist günstig, da infolge der Eigenerregung nach Kurzschluß die Spannung rasch wiederkehrt.

Eine Abart dieser Generatoren hat Selbst- und Eigenerregung. Sie hat infolge der Selbsterregung eine etwas steilere, also günstigere statische Kennlinie im Schweißbereich, aber eine schlechtere dynamische. Die Maschinen sind also träger und erfordern deshalb eine Beruhigungs-drosselspule im Schweißstromkreis.

Generatoren mit Selbsterregung. Die Schaltung dieser Schweißgeneratoren ist sehr einfach. Abb. 93 zeigt eine Dynamo D mit Selbsterregung im Nebenschlußkreis N , die bei R geregelt wird. Es wurde schon erwähnt, daß die Spannung einer selbsterregten Maschine nach Kurzschluß erst in einer gewissen Zeit wieder hoch kommt. Die selbsterregte Maschine ist also ohne ein besonderes Hilfs-

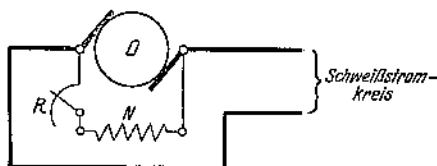


Abb. 93. Schaltung eines Schweißgenerators mit Selbsterregung.

mittel nicht als Schweißgenerator zu gebrauchen. Solche üblichen Hilfsmittel sind z. B. Drosselspulen. Abweichend von den bekannteren Maßnahmen ist eine sog. Dämpferwicklung, welche die Polschuhe der Hauptpole ringartig umgibt. Wird das Hauptmagnetfeld durch Kurzschluß plötzlich stark geschwächt, so wird dadurch auf die Dämpferwicklung eine stark induzierende Wirkung ausgeübt; es entsteht in ihr ein Strom, der das Hauptmagnetfeld stärkt und unterhält. Die statische Kennlinie einer solchen Maschine, wie sie Abb. 94 wiedergibt, zeigt bei höheren Stromstärken eine eigentümliche, etwas rückläufige Form. Die Dauerkurzschlußstromstärke ist niedriger als die eigentliche Schweißstromstärke. Dies kommt daher, daß der Spannungsabfall auch das durch die selbsterregte Nebenschlußwicklung erzeugte Hauptmagnetfeld schwächt und die Schwächung des Hauptmagnetfeldes einen verstärkten Abfall der Spannung bewirkt.

Die selbsterregten Maschinen haben den Vorteil großer Einfachheit; sie sind billiger als die eigenregten Maschinen, da die Erregerdynamo fortfällt. Ihre statische Kennlinie ist gut. Die verhältnismäßig niedrige Leerlaufspannung in Abb. 94 zwingt den Schweißer, einen kurzen Lichtbogen zu halten. Andererseits ist bekanntlich eine höhere Leerlaufspannung günstiger für die Zündung des Lichtbogens. Die dynamische Kennlinie wird durch die Dämpferwicklung günstig beeinflusst.

Generatoren mit Hauptstromerregung. Bei diesen Maschinen handelt es sich ausschließlich um sog. Querfeldschweißgeneratoren mit verstärkter Ankerrückwirkung. Sie besitzen nur zwei Pole, deren Schuhe den Anker der Dynamo fast völlig umfassen. Der remanente Magnetismus induziert zwischen den Hilfsbürsten zwar nur eine geringe Spannung, hat aber, da die Hilfsbürsten kurz geschlossen sind (Abb. 95), einen merklichen Ankerstrom zur Folge, der das Querfeld erzeugt. Dieses wird durch die großen Polschuhe gegenüber dem Primärfeld besonders wirksam, so daß zwischen den Hauptbürsten, die mit dem Schweißstromkreis verbunden sind, eine höhere Spannung (Leerlaufspannung) induziert wird. Wird der Schweißstromkreis kurzgeschlossen, so bewirkt die Leerlaufspannung einen Strom, der die Hauptstromwicklung und den Anker durchfließt,

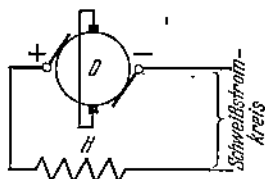


Abb. 95. Schaltung einer Querfelddynamo.

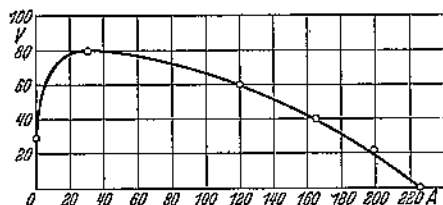


Abb. 96. Statische Kennlinie einer Querfelddynamo.

letzteren jedoch so, daß die Ankerfeldkomponente des Hauptstromes dem Primärfeld entgegengesetzt gerichtet ist und damit die Kurzschlußstromstärke begrenzt. Die Einstellung der Stromstärke geschieht durch Veränderung des magnetischen Hauptfeldes, entweder durch Verstellung von Polkernen oder durch Ab- und Zuschalten von Hauptstromwindungen.

Die statische Kennlinie einer Querfelddynamo zeigt Abb. 96. Die stets niedrige Leerlaufspannung ist für alle Regelstellungen und zugehörigen Kurven die gleiche und nur vom remanenten Magnetismus der Pole abhängig. Die Kennlinie zeigt eine nur dieser Maschinenart eigentümliche Kurve, deren Spannungshöchstwert nur beim Abreißen des Lichtbogens durchlaufen wird. Trotz der besonders niedrigen Leerlaufspannung läßt sich eine z. B. bei der Kohleschweißung erwünschte höhere Schweißspannung (langer Lichtbogen) erreichen. Der einfache Aufbau dieser Maschinenart ergibt einen niedrigen Anschaffungspreis. Während bei den übrigen Maschinen die Regelung durch Einstellen einer bestimmten Leerlaufspannung erfolgt, ist dies bei der Querfeldmaschine nicht möglich. Vielmehr regelt man diese nach der Kurzschlußstromstärke, weshalb meist vom Einbau eines Voltmeters abgesehen wird.

e) Schweißumspanner mit einphasigem Anschluß.

Allgemeines. Die Bedingungen, die an den Wechselstromumspanner zu stellen sind, sind dieselben wie beim Gleichstromumformer. Der normale Umspanner hält, ebenso wie der normale Generator, bei jeder Strombelastung die Spannung möglichst gleichmäßig; er muß also für Schweißzwecke so durchgebildet sein, daß eine fallende Kennlinie erreicht wird. Eine Primärwicklung erzeugt in einem Eisenkern ein Kraftlinienfeld, das eine Sekundärwicklung trifft und in ihr einen Strom hervorruft, dessen Spannung abhängig ist von der Windungszahl der Wicklung. Die erforderliche abfallende Kennlinie wird einmal durch Verwendung von Drosselspulen im Schweißstromkreis erreicht, zum anderen hauptsächlich durch die Ausnutzung absichtlich herbeigeführter Streuung der Kraftlinien. Je größer die Streuung des Umspanners, d. h. je größer derjenige Teil der Kraftlinien ist, der aus dem Eisenkern heraustritt und die Sekundärwicklung nicht schneidet, um so größer wird der Spannungsabfall und um so geeigneter ist der Umspanner zum Schweißen. Allerdings bringt die große Streuung den Nachteil eines schlechten Leistungsfaktors. Der $\cos \varphi$ beträgt $0,25 \cdots 0,45$. Die Streuung und damit die Regelung der Stromstärke erreicht man durch Ab- und Zuschalten von Primär- oder Sekundärwindungen (Anzapfregelung), durch Verschiebung einer der beiden Spulen, durch Verstellung eines Luftspaltes und durch Veränderung der Stellung des Eisenkerns.

In den Fällen, wo bereits eine starke Belastung des Netzes vorliegt, wünscht der Stromlieferer eine Verbesserung des ungünstigen Leistungsfaktors, was praktisch durch primärseitiges Einschalten eines Kondensators erreicht werden kann. Da eine völlige Kompensation ein zu schweres und teures Gerät erfordert, begnügt man sich, den $\cos \varphi$ auf 0,7 zu erhöhen.

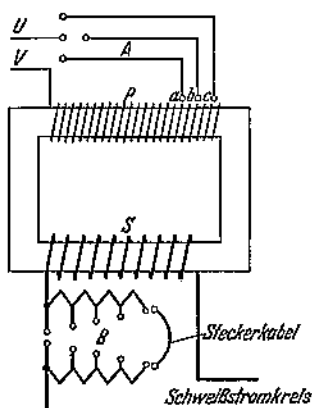


Abb. 97. Schweißumspanner mit Regelung durch Drosselspule.

tisch durch primärseitiges Einschalten eines Kondensators erreicht werden kann. Da eine völlige Kompensation ein zu schweres und teures Gerät erfordert, begnügt man sich, den $\cos \varphi$ auf 0,7 zu erhöhen.

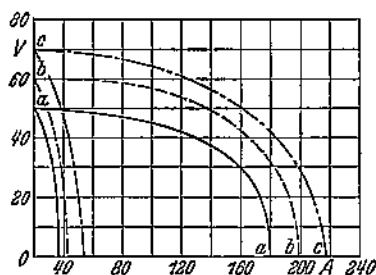


Abb. 98. Statische Kennlinie des Schweißumspanners der Abb. 97.

Schweißumspanner mit Regelung durch Drosselspule. Umspanner dieser Art sind so eingerichtet, daß ihre Regelung durch Zu- und Abschalten von Windungen einer sekundärseits angeordneten Drosselspule *B* in Abb. 97 erfolgt, die sowohl mit der Umspannerwicklung *S* vereinigt oder getrennt eingebaut sein kann. Die Anordnung dieser Drosselspule entspricht dem Vorschaltwiderstande beim Schweißen vom Gleichstromnetz. Zur Erweiterung des durch die Drossel erzielbaren Regelbereichs sind bei dem in Abb. 97 veranschaulichten Umspanner drei Anschlüsse *a*, *b* und *c* an der Primärwicklung vorgesehen, denen drei bestimmte, vom Übersetzungsverhältnis abhängige Zündspannungen *a*, *b*, *c* der Abb. 98 ($50 \cdots 70$ V) entsprechen. Auch einem primären Spannungsabfall kann dadurch Rechnung getragen werden. Die in Abb. 98 dargestellten Kurven entsprechen

der obersten und untersten Schaltstufe der Drossel bei jeweils einer der drei Zündspannungen. Die Zwischenstufen sind nicht eingezeichnet.

Schweißumspanner mit Anzapfregelung. Den einfachsten Fall eines Schweißumspanners stellt Abb. 99 dar. Die Streuung dieses Gerätes ist an und für sich ziemlich groß, da nur ein Teil der Kraftlinien die Sekundärwicklung S trifft. Einzelne Windungen der Sekundärwicklung können mit Hilfe des Reglers R zu- oder abgeschaltet werden, wodurch Spannung und Stromstärke des Schweißstromkreises in gewissen Grenzen regelbar sind. Die Anzapfung kann in gleicher Weise auch auf der Primärseite eingerichtet werden. Ein Nachteil dabei ist der, daß durch Veränderung des Übersetzungsverhältnisses die Leerlaufspannung für jede Regelstufe verändert wird. Die zugehörige statische Kennlinie für die niedrigste und höchste Regelstellung veranschaulicht Abb. 100. Umspanner dieser Art

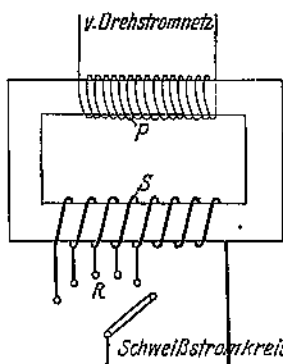


Abb. 99. Schweißumspanner mit Anzapfregelung.

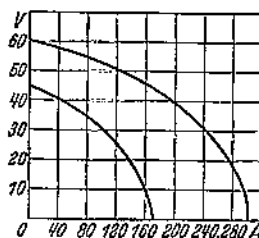


Abb. 100. Statische Kennlinie des Umspanners der Abb. 99.

sind weniger im Gebrauch, da die obere Zündspannung nicht über die Gefahrgrenze hinaus gesteigert werden darf und damit für die unteren Regelstufen nur eine geringe Zündspannung verbleibt.

Schweißumspanner mit verschiebbarer Spule. Der Netzstrom durchfließt die verschiebbare Primärspule P (Abb. 101) und erzeugt in der seitlich neben ihr sitzenden Sekundärspule S den Schweißstrom. Die Spannung wird durch ein Handrad H geregelt, das eine Mutter auf einer Spindel und mit Hilfe der Mutter die Spule P verschiebt. Je weiter P nach rechts geschoben wird, d. h. je näher die Primärspule P an die Sekundärspule S herankommt, desto geringer wird die Streuung, weil dann eine sehr große Anzahl von Kraftlinien, die von P ausgehen, die Spule S

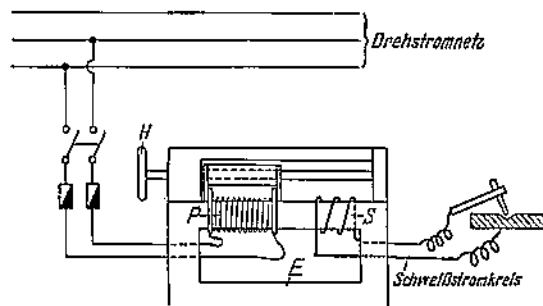


Abb. 101. Schweißumspanner mit verschiebbarer Spule.

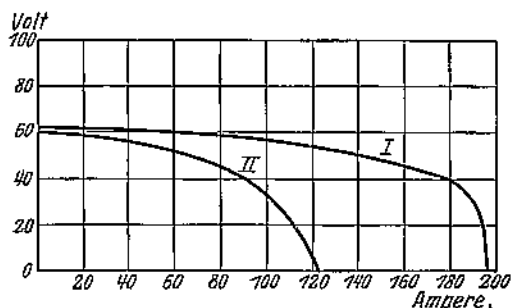


Abb. 102. Statische Kennlinie des Schweißumspanners der Abb. 101.

treffen. Die äußerste Rechtsstellung von P ist also die Stellung der geringsten Streuung, und die äußerste Linksstellung von P bewirkt die größte Streuung. In Abb. 102 finden wir die statische Kennlinie eines solchen Umspanners,

und zwar gibt die Kurve *I* die Kennlinie für die geringste Streuung und die Kurve *II* die Kennlinie für die größte Streuung wieder. Zwischen diesen beiden äußersten Kurven kann man durch kleinere oder größere Verschiebung der Spule *P* stufenlos auf beliebige Zwischenkurven einstellen. Eine Schweißspannung von 15...25 V angenommen, kann man also mit einem Umspanner nach Abb. 101 und 102 auf Stromstärken von etwa 110...195 A fortlaufend einstellen; die Leerlaufspannung beträgt dabei etwa 60 V. Umspanner dieser Art sind einfach und leicht und dementsprechend auch billig.

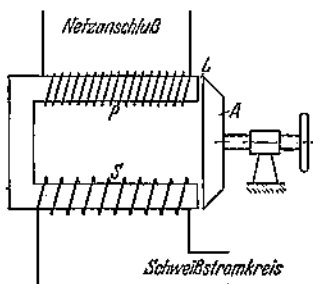


Abb. 103. Schweißumspanner mit Luftspaltregelung.

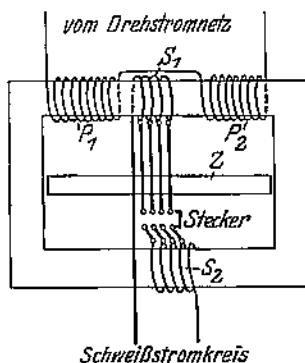


Abb. 104. Schweißumspanner mit Streupaketen.

leicht und dementsprechend auch billig.

Schweißumspanner mit Luftspaltregelung. In Abb. 103 bleiben die Windungszahlen der beiden Spulen *P* und *S* unverändert, so daß die Leerlaufspannung in allen Regelstellungen die gleiche ist. Die Veränderung des Luftspalts *L* und die damit im Zusammenhang stehende Veränderung der Stromstärke erfolgt durch Ver-

stellung des Jochs *A*. Die Kennlinie ähnelt der Abb. 102. Die Einstellung des Umspanners dieser Bauart erfolgt stufenlos.

Schweißumspanner mit Streupaketen. Die Primärspule (Abb. 104) sitzt, in zwei Teile *P*₁ und *P*₂ geteilt, auf dem oberen Kern des Umspanners. Die Sekundär-

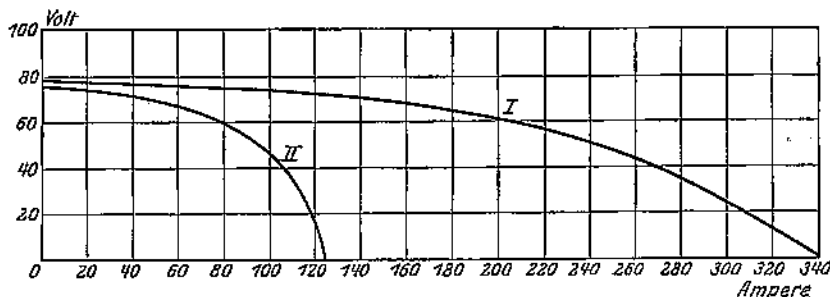


Abb. 105. Statische Kennlinie des Umspanners der Abb. 104.

spule ist ebenfalls in zwei Teile *S*₁ und *S*₂ unterteilt, von denen *S*₁ auf dem oberen und *S*₂ auf dem unteren Kern untergebracht ist. Diese beiden Spulenpakete haben wohl zu der Bezeichnung „Streupakete“ geführt, da sie durch die in ihnen verschiedenen starke Streuung eine besondere Rolle bei der Regelung spielen. Im Inneren des Umspanners ist noch ein Zwischenjoch *Z* angebracht, das eine Anzahl Kraftlinien auf sich ablenken und damit die Streuung vergrößern soll. Die Regelung erfolgt zwar durch Zu- oder Abschalten von Sekundärwindungen, aber in ganz anderem Sinne als bei Abb. 99, indem nämlich mit Hilfe eines Steckers oder einer Steuerwalze eine Windung von *S*₁ (im Bereich des starken Kraftlinienfeldes) abgeschaltet und gleichzeitig eine Windung von *S*₂ (im Bereich des schwächeren Kraftlinienfeldes) zugeschaltet wird oder umgekehrt. Werden stets gleich viel

Windungen zu- und abgeschaltet (was bei dieser Konstruktion leicht durchführbar ist), so bleibt das Verhältnis der Primärwindungszahl zur Sekundärwindungszahl stets dasselbe und damit auch die Leerlaufspannung des Umspanners die gleiche. Die statische Kennlinie dieses Umspanners zeigt Abb. 105 in den äußersten Regelstellungen, und zwar Kurve I für die geringste Streuung (größte Stromstärke) und Kurve II für die größte Streuung (kleinste Stromstärke). Zwischen diesen Grenzkurven kann man mit Hilfe des Steckers oder der Steuerwalze noch auf eine Anzahl Zwischenkurven einstellen. Der Aufbau dieser Umspanner ist etwas schwieriger als der bei Geräten mit verschiebbarer Spule.

Daß die statische Kennlinie der gebräuchlichen Schweißumspanner eine zufriedenstellende ist, geht schon aus den Abbildungen hervor. Die dynamische Kennlinie wird bei allen Schweißumspannern insofern eine günstige sein, als ja das Kraftlinienfeld stets (auch bei Kurzschluß), von der Primärseite her erregt, vorhanden ist und nicht, wie bei einer Anzahl Gleichstromschweißumformer, bei Kurzschluß mehr oder weniger verlorengeht.

Anschluß der Umspanner an das Netz. Die vorbeschriebenen Schweißumspanner arbeiten mit einphasigem Schweißstrom, so daß sie primärseits nur ein Einphasenwechselstromnetz benötigen. Da aber heute fast überall Drehstrom als Kraftstrom zur Verfügung steht, werden die Umspanner entweder zwischen zwei Phasen oder zwischen eine Phase und den Nulleiter des Drehstromnetzes angeschlossen, wie es bereits beim Anschluß von Widerstandsschweißmaschinen (Abschnitt II, A 2) besprochen wurde.

Zum besseren Verständnis sei noch kurz auf die beiden Schaltungsarten des Drehstroms, auf die Dreieck- und die Sternschaltung, eingegangen. Nach Abschnitt I C 3 versteht man unter Drehstrom das Zusammenarbeiten von drei Wechselströmen, die um je eine Drittelperiode gegeneinander verschoben sind. Wollte man jeden dieser drei Wechselströme für sich fortleiten, so hätte man sechs Leitungen nötig. Wenn man aber die Wicklungen z. B. in der Weise miteinander „verkettet“, daß das Ende der ersten mit dem Anfang der zweiten Wicklung, das Ende der zweiten mit dem Anfang der dritten und das Ende der dritten mit dem Anfange der ersten verbunden wird, so sind nur drei Leitungen erforderlich. Diese in Abb. 106 wiedergegebene Schaltung wird als Dreieck-

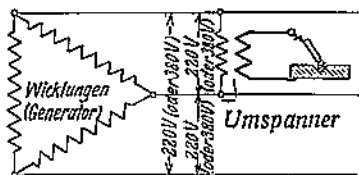


Abb. 106. Drehstromsystem in Dreieckschaltung mit Schweißumspanner zwischen zwei Phasen.

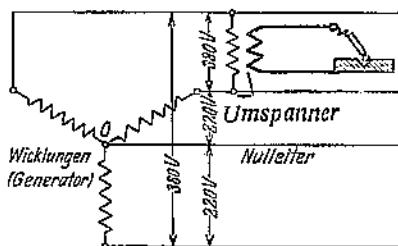


Abb. 107. Drehstromsystem in Sternschaltung mit Schweißumspanner zwischen zwei Phasen.

schaltung bezeichnet. Zwischen zwei Phasen ergibt sich eine bestimmte Spannung, z. B. 220 V; zwischen zwei Phasen ist auch, wie es die Abbildung zeigt, der Schweißumspanner angeschlossen. Man kann nun auch die drei Wicklungen des Generators so miteinander verkettet, daß sie mit je einem Ende untereinander verbunden sind (Sternschaltung). Man kann auch eine vierte Leitung verlegen (Abb. 107). Diese als Nulleiter bezeichnete Leitung hat daher ihren Namen, daß in ihr bei gleicher Belastung der drei Phasen kein Strom fließt (weil die Summe

der drei gegeneinander verschobenen Wechselströme zu jedem beliebigen Zeitpunkt gleich Null ist). Meistens wird daher der Nulleiter auch gar nicht verlegt, und man kommt also auch bei der Sternschaltung mit drei Leitungen aus. Herrscht zwischen zwei Phasen hier eine Spannung von 380 V (verkettete Spannung), so ist die Spannung zwischen einer Phase und dem Nulleiter (die Phasenspannung) stets kleiner und durch Division durch $\sqrt{3}$ aus der verketteten Spannung zu errechnen; die Phasenspannung ist hier also gleich 220 V. Zwischen zwei Phasen ist auch in Abb. 108 der Schweißumspanner angeschlossen.

f) Schweißumspanner mit dreiphasigem Anschluß (Drehstromumspanner).

Der einphasige Anschluß der bisher besprochenen Schweißumspanner bringt eine ungleichmäßige Belastung der drei Phasen eines Drehstromnetzes mit sich. Um diesem Übelstand abzuwehren, strebte man besondere Schaltungen bzw. den Bau von Drehstromumspannern an.

Scottsche Schaltung. Der Umspanner in Abb. 108 zeigt zunächst in seinem Anschluß an das Drehstromnetz, also auf der Primärseite, die Sternschaltung

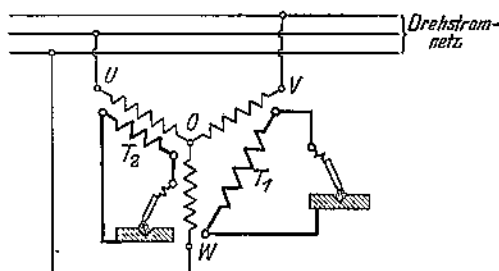


Abb. 108. Scottsche Schaltung für Schweißumspanner.

wie in Abb. 107. Auf der Sekundärseite ist der eine Schweißstromkreis T_1 an die Punkte V und W der Sternschaltung geführt, der andere Schweißstromkreis T_2 aber an die Punkte O und U. Man müßte nach den vorhergehenden Ausführungen über die Sternschaltung bei T_1 eine höhere Spannung als bei T_2 erwarten, erhält aber tatsächlich in beiden Schweißstromkreisen gleich hohe Spannungen dadurch, daß verschiedene

Windungszahlen genommen werden. Das Wesentlichste ist, daß man das Drehstromnetz gleichmäßig belastet, indem man aus dem Drehstrom zwei Einphasenströme macht.

Schweißumspanner für dreiphasigen Anschluß. Primärseitig wird dem Umspanner für eine Leistung von 75 kVA (Abb. 109a) Drehstrom vom Hauptnetz aus zugeführt; sekundärseitig wird verketteter Zweiphasenstrom entnommen, an den die Schweißstellen angeschlossen sind. Das Schaltbild zeigt bei a die Einrichtung für vier Schweißstellen, an denen unabhängig voneinander über Drosselspulen mit je 250 A Höchstleistung geschweißt werden kann. Bei b ist die Einrichtung für zweimal je 500 A Schweißstrom mit einem Schmelzbad einer Gußwärmeschweißung dargestellt. Es ist natürlich auch möglich, mit je 500 A Schweißstrom auf zwei voneinander getrennte Schweißstellen zu arbeiten. Das Drehstromnetz ist bei dieser Ausführung gleichmäßig belastet, wenn das sekundäre Zweiphasennetz gleichmäßig belastet ist. Dies wird stets der Fall sein, wenn an allen Schweißstellen mit gleicher Stromstärke gleichzeitig gearbeitet wird.

Drehstromlichtbogen. Eine gleichmäßige Phasenbelastung versprach man sich von der Anordnung eines Drehstromlichtbogens, bei der das Werkstück mit einem Leiter und die beiden Elektroden mit den beiden anderen Leitern verbunden sind, so zwar, daß jeweils ein Lichtbogen zwischen Werkstück und Elektrode und der dritte Bogen zwischen den beiden Elektroden (Zwillingselektroden) gebildet wird. Diese Anordnung hat sich praktisch nicht bewährt.

Zacksche Schaltung. In Verfolgung der gleichen Idee und unter Beibehaltung des Drehstromumspanners hat Zack eine in Abb. 110 dargestellte Schaltung

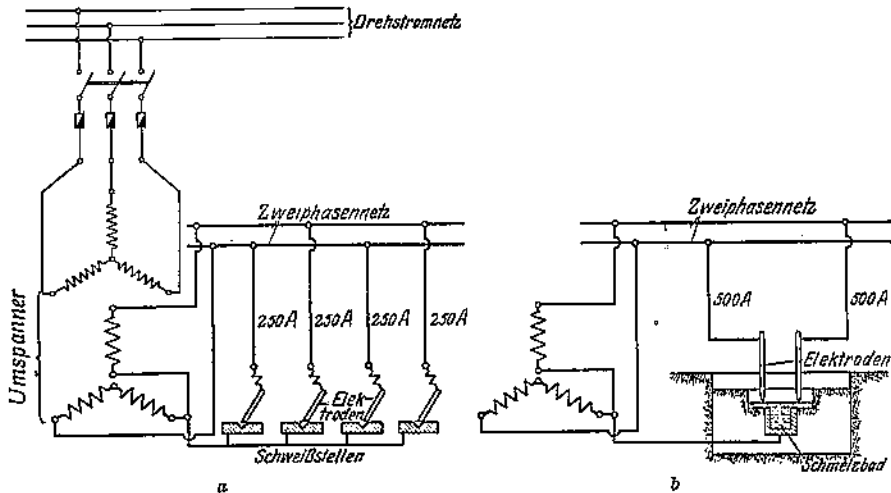


Abb. 109. Schweißumspanner mit dreiphasigem Anschluß.

entwickelt, bei der das Schweißen mit zwei Elektroden an einer Stelle oder auch an zwei Stellen (Abb. 110a) möglich ist. Die dritte Phase liegt hierbei am Werkstück. Eine der beiden Elektroden kann erforderlichenfalls eine Kohleelektrode sein, die besonders beim Schweißen gut wärmeleitender Nichteisenermetalle zur Vorwärmung dient. Wird nur mit einer Elektrode gearbeitet, so muß die unbenutzte Phase, wie Abb. 110b zeigt, kurzgeschlossen werden. Geregelt wird der Umspanner durch unterspannungsseitig angebrachte Drosselspulen mit hoher Selbstinduktion. Der Ohmsche Widerstand des Lichtbogens beeinflußt den gesamten Widerstand des Schweißstromkreises (Impedanz) nur um ein Geringes, so daß die Phasenbelastung auch nur wenig schwankt.

Periodenumformer. Um die bereits geschilderten Schwierigkeiten des Zündens und Aufrechterhaltens des Wechselstromlichtbogens zu verringern, hat man auch den Weg der Anwendung höherer Periodenzahlen beschritten. Dies ist praktisch nicht mit ruhenden Umspannern, sondern nur mit Hilfe von umlaufenden Maschinen, sog. Periodenumformern, möglich. Zur Zeit beträgt die Periodenzahl bis zu 200 Hz. Die erhöhte Periodenzahl hat infolge einer Erniedrigung der Zündspannung eine Steigerung des Leistungsfaktors im Gefolge. Bisher hat diese Maschinenart wenig Eingang gefunden.

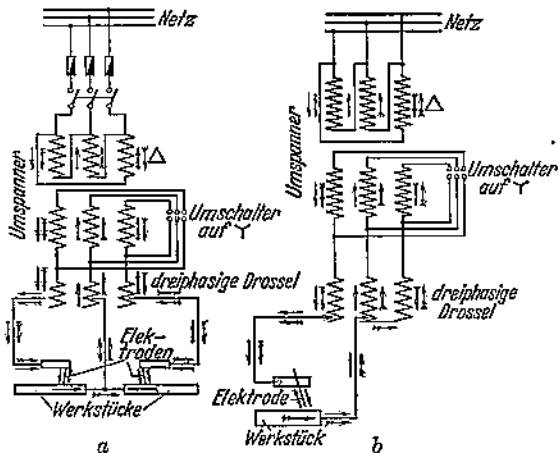


Abb. 110. Schaltung einer Drehstromschweißanlage.

Abb. 114 rechts darstellen. Die Metallgleichrichterplatten gewährleisten eine gute Strom- und Spannungsdynamik, mithin eine günstige elektrische Trägheitslosigkeit. Allerdings tritt im Laufe der Zeit, infolge allmählichen Zunehmens des inneren Widerstandes der Zellen, ein Altern ein, das nach etwa 5000...7000 Arbeits-

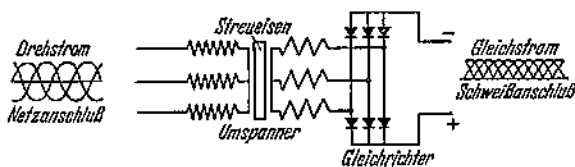


Abb. 114. Schaltbild eines Plattengleichrichters.

Die Gleichrichter finden vor allem für die Schweißung sehr dünner Stahlbleche und die der Nichteisenmetalle Anwendung. Sie gestatten die Verschweißung sämtlicher Elektrodenarten. Ein wesentlicher Unterschied im Leistungsfaktor gegenüber den Umformern besteht nicht.

g) Äußeres und mechanische Ausführung der Umformer.

Gleichstromschweißumformer. Die Gleichstromschweißanlagen können, je nach Größe und Gewicht, ortsfest oder fahrbar sein. Der Antrieb der Schweißumformer ist je nach Kraftquelle verschieden und bestimmend für die Ausführungsform. Als einfachste Maschine ist die Schweißdynamo mit Riemenantrieb anzusehen, die heute kaum noch anzutreffen ist.

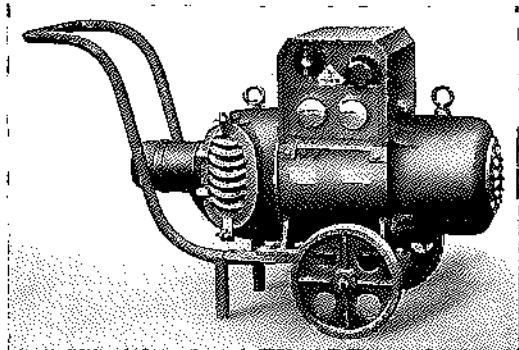


Abb. 115. Fahrbarer Eingehäusenumformer mit Querfelddynamo.

Steht Kraftstrom zur Verfügung, so erfolgt der Antrieb in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle durch einen Elektromotor für Gleich- oder Drehstrom, je nach Anschlußbedingungen. Diese Motoren werden mit der Welle der Dynamo durch eine Kupplung verbunden, wodurch die Möglichkeit gegeben ist, im Bedarfsfall, z. B. für Montagezwecke, die Antriebsform, entsprechend

Stromart und Spannungsverhältnissen, auszuwechseln. Fahrbare Anlagen sind ein- oder zweiachsig und mit 2, 3 oder 4 Rädern ausgestattet.

Um Baulänge und Gewicht des Maschinensatzes auf ein möglichst geringes Maß zu beschränken, werden Eingehäuseschweißumformer gebaut, bei denen Motor und Generator auf einer gemeinsamen Welle sitzen und in einem gemeinsamen Magnetgehäuse untergebracht sind.

Steht kein Kraftstrom zur Verfügung, dann wird der Antriebsmotor durch eine Verbrennungskraftmaschine (Diesel-, Benzol- oder Benzinmotor) ersetzt.

Bei Mehrstellenbetrieb benutzt man auch Mehrmaschinenschweißumformer oder Mehrstellenschweißanlagen mit besonderem Schweißgenerator. Der Mehrmaschinenschweißumformer besteht aus mehreren Generatoren und einem gemeinsamen Motor, die untereinander gekuppelt sind und bei Fremderregung nur eine gemeinsame Erregermaschine besitzen. Von dieser Einrichtung unterscheidet sich die Mehrstellenschweißanlage dadurch, daß nur

ein großer Generator für konstante Spannung aufgestellt wird. Jede Schweißstelle muß dann einen regelbaren Vorschaltwiderstand erhalten.

Beispiele. In den folgenden Abbildungen werden eine Anzahl Vertreter der oben angeführten Umformerarten gezeigt. Alle fahrbaren Schweißumformer sind „ventiliert gekapselt“, d. h. alle Einzelteile sind zum Schutze gegen atmosphärische Einflüsse geschützt. Die Belüftung besorgen ein auf der Maschinenwelle angeordneter Ventilator und in der Einkapselung vorgesehene Jalousien. Eigenerregte Maschinen sind heute sehr selten geworden, sie werden hauptsächlich durch Quersfeldmaschinen abgelöst.

Bei dem Eingehäuseumformer Abb. 115 ist im linken Gehäuseteil der Motor, im rechten der Generator untergebracht. Auf den gleichen Seiten befinden sich die Kabelanschlußkästen und Handräder für den Anlasser und den Schweißstromregler. Die durch eine Blechklappe gegen Beschädigung geschützten Meßinstrumente sitzen unter der Abdeckhaube. Alle Maschinen werden mit Tragösen ausgestattet. Unten am Maschinengehäuse

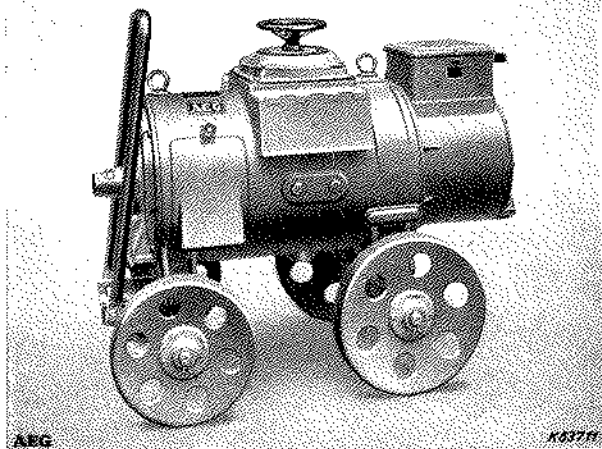


Abb. 115. Fahrbarer Eingehäuseumformer mit Quersfelddynamo.

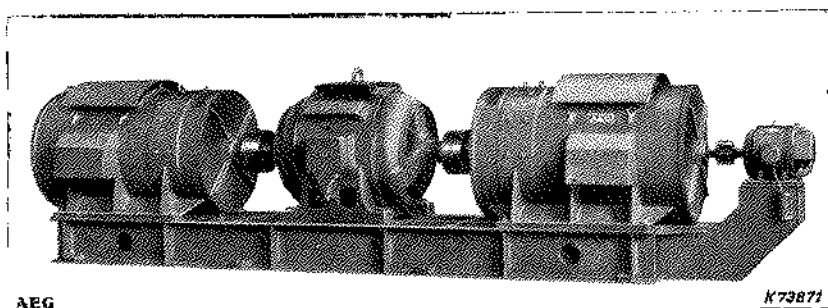


Abb. 117. Mehrfachschweißumformer.

ist zwischen den Rädern eine Erdungsklemme vorgesehen, um bei Gehäuseschluß die Spannung nach der Erde abzuleiten.

Eine Quersfelddynamo anderer Konstruktion, ebenfalls einen Eingehäuseumformer, bringt Abb. 116. In dem Bilde fällt neben kurzer Baulänge auch eine geringe Höhe der Maschine auf, die auf den Verzicht jeglichen Aufbaues zurückzuführen ist. Der Stern-Dreieck-Anlasser sitzt auf der Motorseite, daneben das Regelhandrad und unter diesem der Schweißkabelanschlußkasten, der auch eine Klemme für die Ausgleichsleitung bei Parallelbetrieb verdeckt.

eingesetzt werden, wo Kraftstrom nicht verfügbar ist bzw. schwer beschafft werden kann. Eine solche, meist mit „Schweißwagen“ bezeichnete Einrichtung ist in Abb. 120 veranschaulicht. Neben dieser als Anhänger durchgebildeten Konstruktion sind auch Lastwagen mit aufgebauter Anlage üblich, wobei der Fahrmotor selbst als Antriebsmaschine für die Dynamo Verwendung finden kann. Abb. 121 veranschaulicht noch eine

Schweißmaschine mit Dieselmotorantrieb, die infolge ihrer gedrängten Anordnung auch auf einem Wagen untergebracht werden kann. Die stark wechselnde Belastung des Generators und die Forderung des Aufrechterhaltens der Drehzahl bedingen eine Antriebsmaschine hinreichender Leistung und mit einem schnellwirkenden Drehzahlregler.

Um die durch meist willkürliche Leistungsangaben für die Maschinen entstandenen Unstimmigkeiten abzuwenden, sind durch eine Gemeinschaftsarbeit des Fachausschusses für Schweißtechnik im VDI und des VDE „Regeln für Gleichstrom-Lichtbogen-Schweißgeneratoren und -umformer“ (VDE 0540/XII 40) aufgestellt worden. In diesen Bestimmungen haben nur

Hersteller oder Ursprungszeichen	
Schweißstrom- erzeuger	Gs 1500 Nr 123456
1200 $\frac{U}{\text{min}}$	Leerlaufspannung 50 V
Regelbereich	17 $\frac{V}{25}$ 65 $\frac{A}{240}$
DB	20 V 175 A
HSB	20 V 210 A
Erregerspannung V	
Zusätzliche Vermerke	

Abb. 122.
Leistungsschild für Schweißumformer.

die Abweichungen von den allgemeinen Regeln für die Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen Aufnahme gefunden. Hier kann auszugsweise nur auf die Angaben des Leistungsschildes hingewiesen werden. Neben einigen all-

gemeinen Angaben, wie Modellbezeichnung, Listennummer, Fertigungsnummer, Nenndrehzahl usw., sind nachstehende Punkte als besondere Kennzeichen für die jeweilige Maschinen-

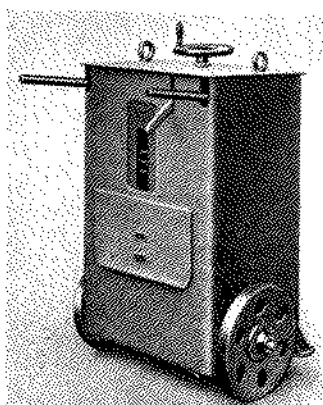


Abb. 123. Fahrbarer Schweißumspanner mit Luftkühlung.

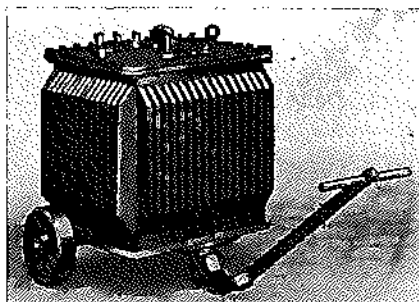


Abb. 124. Fahrbarer Schweißumspanner mit Ölkühlung.

type hervorzuheben: höchste Leerlaufspannung, Betriebsart, Nennspannung und zugehöriger Nennstrom, Nennerregerspannung und Regelbereich. Die Betriebsart wird unterschieden in Dauerbetrieb (DB) und Handschweißbetrieb (HSB). Unter Handschweißbetrieb versteht man eine aussetzende Belastung, bei der die Einschalttdauer 55 vH der zweiminütlichen Spieldauer beträgt. Der Zwang zur Angabe des Regelbereichs ist von seiten des Käufers sehr zu begrüßen. Abb. 122 gibt das vorgeschriebene Leistungsschild wieder.

Schweißumspanner. Nach der Art der Kühlung ist zwischen luft- und ölgekühlten Umspannern zu unterscheiden, von denen je eine Konstruktion in den Abb. 123 und 124 wiedergegeben ist. Die luftgekühlten Umspanner sind entweder in Holzgehäusen oder in Blechkästen mit gelochten Wandungen untergebracht, während die selteneren ölgekühlten im allgemeinen Luftkühlrippen tragen. Auch die Umspanner werden geerdet.

h) Betriebstechnische Erläuterungen.

Bei der Wartung der Schweißanlagen und der Sicherheitseinrichtungen sind selbstverständlich die jeweiligen Anweisungen der Lieferfirmen zu befolgen. Es würde hier zu weit führen, auf alle Einzelheiten einzugehen, die sich auf Betriebsstörungen, sachgemäße Wartung usw. erstrecken. Nur einige wichtige Hinweise seien noch gegeben.

Alle spannungsführenden Teile und Klemmen müssen durch geeignete Vorrichtungen gegen unbeabsichtigte Berührung gesichert sein. Alle Kabel sind gegen Beschädigung zu schützen; beschädigte Leitungen und auch Schweißkabel müssen unverzüglich nachisoliert werden. Elektrodenhalter dürfen weder auf das in den Stromkreis eingeschlossene Werkstück, noch auf den Schweißstisch abgelegt werden.

Beim Ausbleiben der Netzspannung ist der Motor sofort abzuschalten. Ursachen können sein: durchgebrannte Sicherungen, Unterbrechung einer Phase, Störung in der eigenen Schaltanlage oder im Elektrizitätswerk. Ungenügender Kontakt an den Anschlußklemmen, an der Schweißzange oder zwischen Werkstück und Schweißstisch, vor allem, wenn letzterer stark bespritzt ist, verursachen schlechtes Zünden oder ein Abreißen des Lichtbogens. Auch eine verringerte Drehzahl des Motors kann schlechtes Zünden des Lichtbogens zur Folge haben.

2. Selbsttätige Schweißeinrichtungen.

(Schweißautomaten.)

a) Allgemeines.

Entwicklung. Der Konstruktion der seit einigen Jahren auf dem Markte befindlichen selbsttätigen Lichtbogenschweißeinrichtungen lag neben der Erhöhung der Schweißleistung der Gedanke zugrunde, eine gleichmäßige, von der Geschicklichkeit des Handschweißers und seiner persönlichen Unzulänglichkeit unabhängige Schweißnaht herstellen zu können. Da die Sauberkeit der Schweißnaht zunächst in hohem Maße von der gleichbleibenden Lichtbogenlänge abhängt (zumindest bei der Metallelektrodenschweißung), war es naheliegend, einen selbsttätigen, gleichmäßigen Vorschub der Elektroden herbeizuführen. Den heute üblichen Konstruktionen solcher Anlagen ging ein Gerät, der sog. „Tafelschweißer“ voraus, bei dem zwar der Vorschub des Schweißdrahtes mechanisch, die Bewegung des Gerätes in der Schweißrichtung jedoch von Hand erfolgte. Aus dieser nicht recht befriedigenden halbselftätigen Konstruktion ist später der heute recht vielgestaltige und z. T. hochentwickelte Vollautomat hervorgegangen.

Anwendungsgebiete. Die selbsttätige Lichtbogenschweißung wird hauptsächlich bei der Fertigung immer wiederkehrender Massengüter bestimmter Bauart, aber auch für die Herstellung langer Nähte an Werkstücken aller Art angewandt. Zum Beispiel werden Träger, Behälter, Kessel, Eisenfässer u. a. auf solchen Maschinen heute schon in großem Umfange selbsttätig geschweißt. Außerdem ermöglicht die selbsttätige Schweißung auch die einwandfreie Vereinigung dünner Bleche (unter 3 mm), was dem Handschweißer nur bei großer Übung und bei großem Geschick einwandfrei gelingt. Allerdings muß ausdrücklich betont werden,

daß sich alle diese Einrichtungen nur für die waagerechte Schweißung (für Auftrags- und Verbindungsschweißung gleichermaßen) eignen.

Vorzüge. Die Leistungs- und damit Wirtschaftlichkeitssteigerung beim maschinellen Schweißen rührt vor allem daher, daß hierbei die Elektroden höhere Strombelastungen gestatten, wodurch die in der Zeiteinheit abschmelzbaren Werkstoffmengen beträchtlich größer werden können. Außerdem fallen die durch die Auswechslung der Elektroden von Hand entstehenden Arbeitspausen fort. Die maschinell geschweißte Naht ist der Handschweißung an Güte meist überlegen, was dem völlig gleichmäßigen rucklosen Vorschub und der ununterbrochen gleichbleibenden Führung der Elektrode zu verdanken ist.

Bauarten. Damit man sich unter den durch die Vielgestaltigkeit ihrer Konstruktion ausgezeichneten und für die verschiedensten Sonderzwecke auf dem Markte befindlichen selbsttätigen Schweißeinrichtungen besser zurecht findet, ist eine zusammenfassende Übersicht am Platze.

Ausgenommen die Arcatomschweißmaschinen arbeiten zunächst einmal sämtliche Einrichtungen mit Gleichstrom. Man hat zu unterscheiden zwischen:

- a) Einrichtungen für den Kohlelichtbogen
 1. ohne Zusatz von Schweißdraht,
 2. mit Zusatz von Schweißdraht.
- b) Einrichtungen für den Metalllichtbogen,
 1. Schweißen mit nacktem, und zwar meist endlosem Draht (Blankdraht, Seelendraht usw.),
 2. Schweißen mit ummanteltem Draht,
 - α) Verwendung endlosen Drahtes,
 - β) Verwendung stabförmiger Elektroden.

Solche Maschinen, die fast immer auch das Verschweißen nackten Drahtes gestatten, werden oft als Universalmaschinen für Metallelektroden-schweißung bezeichnet.

- c) Einrichtungen, die sich besonderer Hilfsmittel, sog. Schweißmassen, bedienen (Ellira- oder Unionmeltverfahren).

Der wichtigste Bestandteil jeder selbsttätigen Schweißeinrichtung ist der sog. Schweißkopf, der die Kohle- oder Metallelektrode führt und bewegt, den Strom zuführt, den Vorschub regelt und einen Teil der Schalt- und Regelgeräte umfaßt. Je nach Bauart ist entweder der Schweißkopf beweglich, was meistens zutrifft, oder das zu schweißende Werkstück; in Sonderfällen sind beide zueinander beweglich. Der vom Schweißstromerzeuger baulich vollkommen getrennte und mit diesem nur durch Kabel in Verbindung stehende Schweißkopf wird an irgendeinem Fahrgestell, z. B. an einer Laufkatze, über dem Werkstück oder, was seltener ist, auf letztem mechanisch bewegt. Neben dem Schweißkopf ist oft noch eine Schalttafel bzw. ein Schaltschrank erforderlich, der die Mehrzahl der Schalt- und Regelorgane aufnimmt. Grundsätzlich sind demnach folgende Einzelteile vorhanden: die Stromquelle (Schweißmaschine), der Schweißkopf, der Schaltschrank und die übrigen maschinellen und Konstruktionsteile.

Ellin-Hafergut-Verfahren. Diesem vor kurzem wiederum in Aufnahme gekommenen und etwas abgewandelten Verfahren liegt die bereits lange Zeit bekannte Tatsache zugrunde, daß man ummantelte Elektroden selbsttätig ohne mechanische Einrichtungen abschmelzen kann. Das geschieht, wenn die Elektrode ihrer Länge nach auf die den Gegenpol bildende Naht gelegt, an ihrem blanken Ende an die Stromquelle angedemmt und am Gegenende gezündet wird. Dieses überaus einfache selbsttätige Schweißen, das einzige, das mit liegender Elek-

trode arbeitet, besitzt jedoch so viele Nachteile, daß es keine praktische Bedeutung hat. Die Elektrode hebt sich mitunter ab, weil sie sich durch den Ohmschen Widerstand ihres Kernes verbiegt, der Lichtbogen brennt unruhig und reißt häufiger ab, der Einbrand ist zu gering usw.

Hafergut stellt diese Mängel ab, indem er (Abb. 125) über die Elektrode eine mit dem Werkstück gut verspannte, profilierte Kupferschiene 1 legt (andere Metalle eignen sich nicht), die ein Verlagern der Elektrode 2 verhütet. Die Schiene kann, wie im Bilde gezeigt, an allen vier Ecken mit Rillen verschiedenen Durchmessers versehen sein, um sie für verschiedene Elektrodendicken verwenden zu können. Ein zwischen Elektrode und Werkstück eingeklemmter Papierstreifen 3 (z. B. Packpapier) verbessert das Schweißergebnis und die Betriebssicherheit. Durch diese Anordnung wird neben einem besseren Einbrand ein durch den geschlossenen Kanal bedingter gleichmäßiger Schweißdrahtfluß bewirkt. Da außerdem die Lichtbogenlänge durch die Umhüllungsstärke der im übrigen hier bis zu 2 m langen und in einem Zuge verschweißbaren Elektroden (von 2...10 mm Dicke und von normaler Zusammensetzung) konstant gehalten wird, ergeben sich Nähte von einer sonst nur mit Schweißautomaten erreichbaren Gleichmäßigkeit. Abb. 125 I veranschaulicht die Anordnung bei V-Nähten, II die bei ein- oder auch doppelseitig gleichzeitigem Schweißen von Kehlnähten. Zwischen Werkstück, Elektrode und Abdeckschiene soll durch geeignete Rillenbildung in letzter ein Hohlraum 4 belassen werden, der die beim Schmelzen wachsende Schlackemenge aufzunehmen vermag. Polarität und Stromstärke sind etwa die gleichen wie beim Handschweißen. Da sich dieses patentierte Verfahren zur Zeit noch in praktischer Entwicklung befindet, läßt sich ein abschließendes Werturteil nicht fällen, jedoch sind günstige, insbesondere wirtschaftliche Anwendungsmöglichkeiten zu vermuten.

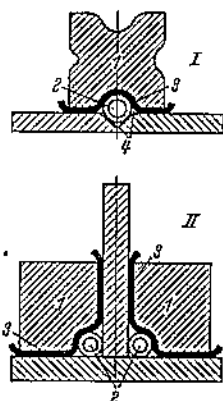


Abb. 125. Grundform des Ein-Hafergutverfahrens.

b) Einrichtungen für den Kohlelichtbogen.

Ohne Zusatz von Schweißdraht. Die Arbeitsweise der Steuerung und der Aufbau einer neuzeitigen selbsttätigen Einrichtung für Kohlebogensschweißung geht aus Abb. 126 hervor, die der Deutlichkeit halber mit der Abb. 127 gemeinsam behandelt wird. Es bestehen drei Stromkreise, von denen I der Stromkreis des Gleichstromnetzes ist, II der Schweißstromkreis und III ein Hilfsstromkreis. In das Netz I sind zwei Nebenschlußmotoren A und B eingeschaltet, die über ein Differential- (Ausgleichs-) Getriebe m auf das Zahntriebrad l arbeiten. Im Innern einer mit d bezeichneten, als Hohlkörper ausgebildeten Spannzange, die durch l bewegt wird, befindet sich die Kohlelektrode n. Es handelt sich demnach um einen Kohleschweißkopf. 1 und 2 sind die Nebenschlußwicklungen der Motoren. Die Umlaufzahl des mit dem Schweißstromkreis verbundenen, den Vor-schub der Elektrode betätigenden Motors A ist von der Lichtbogen-spannung, also von dessen Länge abhängig, während der Motor B unter konstanter Netz-spannung (I) liegt und damit dauernd mit der am Regler 7 eingestellten und gleich-bleibenden Drehzahl läuft. Die Regelung der Lichtbogenlänge geschieht hier selbsttätig, obwohl entsprechend dem geringen Abbrand der Kohle ein Nachstellen über einen Handhebel durchaus möglich ist. Brennt der Lichtbogen, dann arbeiten beide Motoren auf das Ausgleichsgetriebe m und bewegen über l die Kohle n vor-schiebend oder zurückziehend, je nach Bogenlänge. Laufen beide Motoren A + B

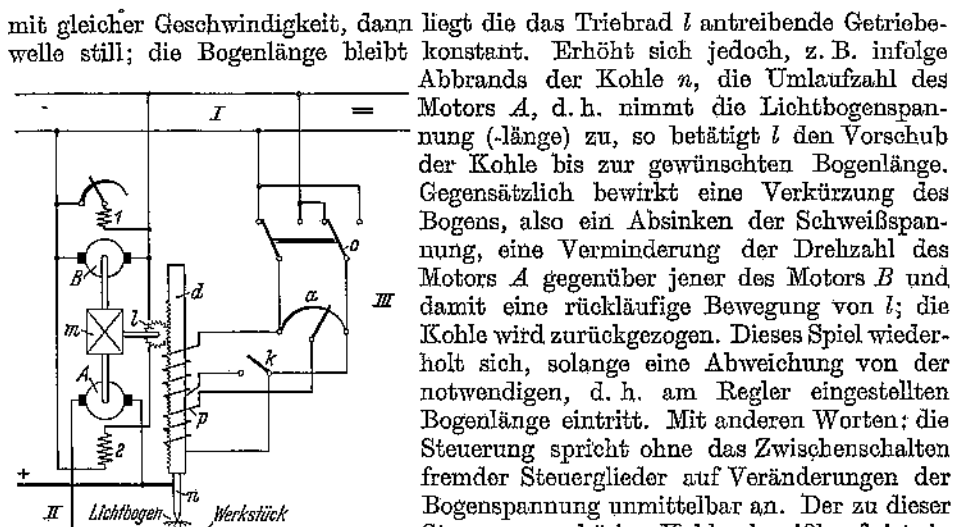


Abb. 126. Steuerung eines Kohlebogens-Schweißautomaten.

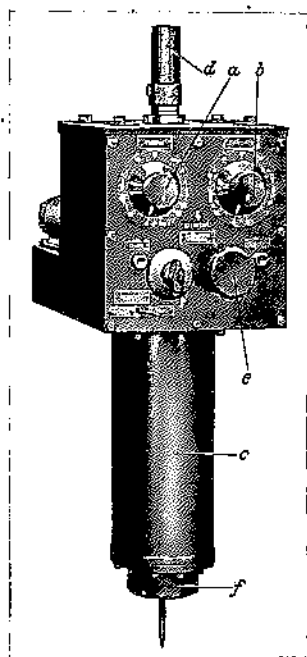


Abb. 127. Kohleschweißkopf einer selbsttätigen Schweißeinrichtung.

mit gleicher Geschwindigkeit, dann liegt die das Triebrad l antreibende Getriebewelle still; die Bogenlänge bleibt konstant. Erhöht sich jedoch, z. B. infolge Abbrands der Kohle n , die Umlaufzahl des Motors A , d. h. nimmt die Lichtbogenspannung (-länge) zu, so betätigt l den Vorschub der Kohle bis zur gewünschten Bogenlänge. Gegensätzlich bewirkt eine Verkürzung des Bogens, also ein Absinken der Schweißspannung, eine Verminderung der Drehzahl des Motors A gegenüber jener des Motors B und damit eine rückläufige Bewegung von l ; die Kohle wird zurückgezogen. Dieses Spiel wiederholt sich, solange eine Abweichung von der notwendigen, d. h. am Regler eingestellten Bogenlänge eintritt. Mit anderen Worten; die Steuerung spricht ohne das Zwischenschalten fremder Steuerglieder auf Veränderungen der Bogenspannung unmittelbar an. Der zu dieser Steuerung gehörige Kohleschweißkopf ist in Abb. 127 mit c bezeichnet. Die einzelnen Regelorgane kennzeichnenden Buchstaben stimmen mit denen des Schaltbildes überein.

Oberhalb der Schweißstromzuführungsdüse f ist eine spiralförmige Rohrschlinge in das Gehäuse c eingebaut, die eine wirksame Kühlung des hocherhitzten Kohlestabes durch Wasserumlauf herbeiführt und den Schweißkopf gegen Beschädigung schützt. Die Kohlestäbe haben einen Durchmesser von 5...18 mm und sind kaum länger als 600 mm.

Während der Lichtbogen, wie später noch näher begründet wird, bei der Metallelektrode möglichst kurz bemessen sein soll, trifft für den Kohlebogen das Gegenteil zu. Abgesehen davon, daß Sauerstoff und Stickstoff der Luft in größerem Umfang zum Schmelzbad gelangen können und die mechanischen Eigenschaften der Schweiße schädlich beeinflussen, sind Maßnahmen notwendig, den langen Kohlelichtbogen zu stabilisieren. Dazu dient ein magnetisches Richtfeld, das durch eine an das Netz I angeschlossene und im Stromkreis III gelegene Blaspule p erzeugt wird. Diese im Gehäuse c angeordnete, fremderregte und nicht vom Schweißstrom durchflossene magnetische Blaspule hat den Vorteil, daß das Verstärken und Schwächen des Magnetfeldes (Blasfeldes) auch während des Schweißens fast stufenlos geregelt und durch den Schalter o in seiner Richtung umgekehrt werden kann. Die Blaspule p besteht aus zwei getrennten Wick-

lungen, wovon die eine über a regelbar ist, während die andere durch den Schalter k zu- oder abgeschaltet und dadurch das Magnetfeld gestärkt oder geschwächt werden kann.

An das Gehäuse des Schweißkopfs (Abb. 127) kann unmittelbar ein Papierzufuhrgerät angebaut werden. Durch ein Metallrohr wird eine Papierkordel, die als Desoxydationsmittel wirken soll, an der glühenden Kohle entlang geführt und abgebrannt, so daß um den Lichtbogen eine sauerstoffarme Atmosphäre hergestellt und damit ein Eindringen von Sauerstoff und Stickstoff in das Schmelzbad verhütet wird. Der Vorschub der Kordel erfolgt über ein besonderes motorisch betätigtes Getriebe.

Mit Zusatz von Schweißdraht. Mit der geschilderten Ausrüstung ist das Gesamtgerät nur für das Niederschmelzen überschüssiger Werkstoffkanten verwendbar, d. h. für die Schweißung von Bördel-, Eck- und Kantennähten. Soll der beim Schweißen durch Verbrennen und Verdampfen immer auftretende Werkstoffverlust sowie der durch den Luftspalt bzw. infolge der Abschrägung der Blechkanten bei der Herstellung von V- und X-Nähten entstehende Werkstoffmangel (eingefallene Nähte) ausgeglichen werden, dann bedarf es zur Ausfüllung der Zufuhr von Schweißdraht. Auch dies muß natürlich selbsttätig geschehen, indem man dem ersten ein weiteres, also zweites Zufuhrgerät beibringt. Es unterscheidet sich vom ersten nur dadurch, daß an die Stelle der Papierkordel ein Schweißdraht wechselbarer Dicke eintritt, dessen Vorschub über einen Motor geregelt werden kann. Der Draht wird im Lichtbogen, also unterhalb der Kordel, unmittelbar im Schmelzbad abgeschmolzen. Solche Kohleschweißeinrichtungen werden heute für Kohlestäbe bis zu etwa 18 mm Dicke und für Schweißstromstärken bis zu 1000 A gebaut. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, daß die Vorbereitung der Blechkanten von der sonst üblichen mehr oder weniger abweicht, denn es ist möglich, noch 10 mm-Bleche unabgeschrägt gut durchzuschweißen. Ferner ist die oft zusätzliche Verwendung von Schweißpasten zu erwähnen.

Das Beispiel einer Kohlebogenmaschine für einen Sonderzweck stellt Abb. 128 dar. Sie arbeitet nach dem Steuerungsbild 126. Es handelt sich um eine selbsttätige Schweißmaschine für Hinterachsbrücken, die aus zweiteilig gepreßten Blechgehäusen längsnahtgeschweißt werden.

Im unteren Teile, zwischen den Maschinenständern, ist eine schwenkbare hydraulische Einspannvorrichtung eingebaut, deren Preßzylinder im Bilde deutlich sichtbar sind. Den einzelnen Spannbackenpaaren wird der Schweißstrom zugeführt, um an allen Punkten der Stumpfnahut genügend Kontakt zu haben. Links unten sind die für die Betätigung der Einspannvorrichtung dienenden Fußhebel angebracht. Die an der Brücke des Maschinengestells aufgehängten Schweißköpfe werden durch zwei, auf dem Bilde nicht sichtbare Motoren fortbewegt. Die zugehörigen Schalt- und Meßeinrichtungen sind in den beiden Maschinenständern untergebracht. Die beiden Schweißstellen sind von Schutzhauben überdeckt, die

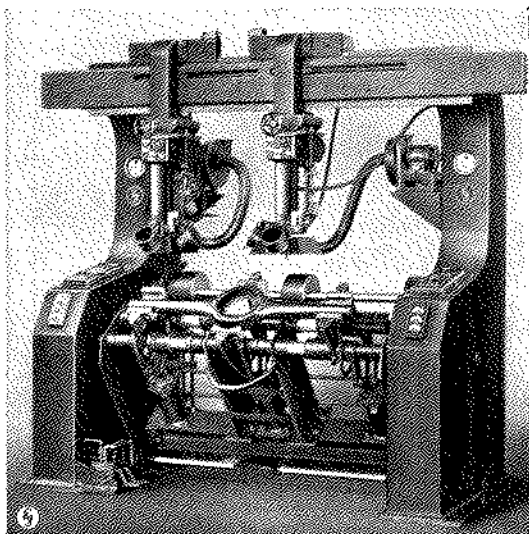


Abb. 128. Selbsttätige Schweißmaschine für Hinterachsbrücken.

mit je einem Exhaustor durch biegsame Stahlschläuche in Verbindung stehen. Gerade dieses Beispiel läßt erkennen, welch weitgehende Entwicklung der mechanische Aufbau solcher selbsttätigen Schweißeinrichtungen schon erfahren hat.

c) Einrichtungen für den Metalllichtbogen.

Schweißen mit endlosem Nahtdraht. Der Schweißkopf dieser Anlagen unterscheidet sich vom Kohleschweißkopf hauptsächlich durch den Fortfall der Wasserkühlung und des Blasmagneten. Wesentliche Unterschiede in der Arbeits- und

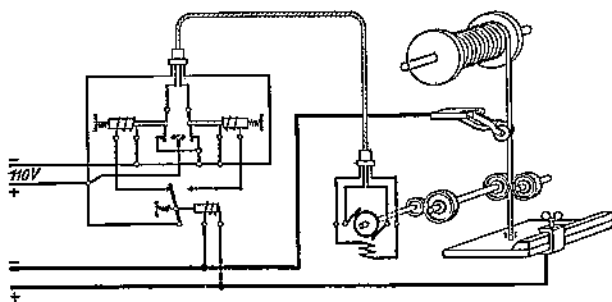


Abb. 129.

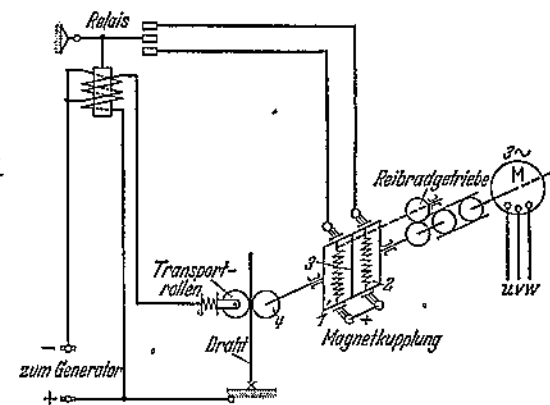
Bauweise der Steuerung bestehen nicht, weshalb sie mit geringen Abweichungen meist für beide Schweißarten verwendbar sind. Die Steuerung kann nach grundsätzlich verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen. In Abb. 129 wird die Drahtbewegung durch Vor- und Rücklauf des Drahtvorschubmotors gesteuert, dessen Regelung über eine in

einem besonderen Gehäuse untergebrachte Steuereinrichtung (linke Bildhälfte) bewerkstelligt wird. Der + Pol des Schweißstromkreises liegt in der Regel unmittelbar am Werkstück, während das Kabel des - Poles mit der Kontaktrolle

am Schweißdraht verbunden ist. Der Antrieb des Motors erfolgt gesondert von einem Gleichstromnetz. Vor- und Rücklauf werden durch ein in der Abb. 129 links oben dargestelltes Schaltrelais mit je einer Spule für Vor- und Rücklauf geschaltet. Dieses Schaltrelais wird wiederum durch das darunter gezeichnete Steuerrelais gesteuert, das vom Schweißstromkreis in Abhängigkeit von der Lichtbogenlänge beeinflusst wird.

Abb. 130. Weitere Steuerungen von selbsttätigen Lichtbogenschweißeinrichtungen.

Eine dritte Art der Steuerung bringt Abb. 130, bei der nicht der Motor, sondern das Getriebe auf Vor- bzw. Rücklauf gesteuert wird. Der Drehstrommotor treibt mit konstanter Drehzahl ein Reibradgetriebe, das in der Übersetzung veränderlich ist und zwei Magnetschalen 1 und 2 antreibt. Die eine dieser Magnetschalen läuft vorwärts, die andere rückwärts. Zwischen beiden liegt eine Ankerscheibe 3, die die Transportrolle 4 über ein Übersetzungsvorgelege antreibt. Die Ankerscheibe wird je nach dem augenblicklichen Betriebsverhältnis am Lichtbogen von einer der beiden Magnetschalen mitgenommen und damit vor- oder rückwärts bewegt. Auch bei dieser Konstruktion wird die Steuerung der Magnetschale durch ein Spannungsrelais im Schweißstromkreis beeinflusst.



Man baut auch Vorschubmotoren, die an Stelle der geschilderten Relaissteuerung eine Steuerdynamo erhalten, deren Erregermaschine durch die Lichtbogenspannung beeinflusst wird. Der Vorschub des Drahtes muß stets um ein geringes größer sein als sein Abbrand, damit kein zu langer Bogen und kein Abreißen eintreten kann. Eine unter ein gewisses Maß gehende Verkürzung des Lichtbogens wird zwangsläufig durch Steuerung mit Rücklauf aufgehalten, bis gleichzeitig durch den Abbrand des Drahtes die normale Schweißspannung wieder hergestellt ist. Um eine größtmögliche Gleichmäßigkeit der Schweißung zu erzielen, dürfen große Schwankungen im Drahtvorschub nicht eintreten, was praktisch nur durch eine feinfühlige, gut abgestimmte und leicht ansprechende Steuerung erreicht werden kann.

Einen nach Abb. 130 gesteuerten Schweißkopf für Nacktdraht zeigt Abb. 131. An das Fahrwerk und Steuergehäuse *a*, das auf einem Fahrgestell abläuft, ist der Schweißkopf *b* angebaut. Von der Trommel *h* wird der Draht *i* der Drahtdüse *f* zugeführt. Der Antriebsmotor für die Pendelbewegung ist mit *c* bezeichnet. *g* ist die Stromzuführungskontaktrolle für das Werkstück und *e* ein mit dem Lüfter in Verbindung stehender Saugtrichter.

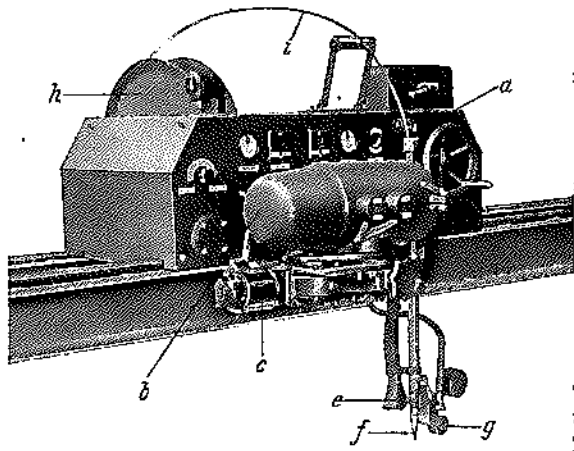


Abb. 131. Drahtschweißautomat.

Ummantelter endloser Draht. Bisher wurde stillschweigend angenommen, daß es sich nur um das Verschweißen nackten, also an jeder Stelle auch äußerlich stromführenden Drahtes handelt. Wenn auch die Verwendung ummantelten endlosen Drahtes keine Um-

gestaltung der Steuerung verlangt, so sind doch andere Maßnahmen für die Stromzuführung zum Draht erforderlich. Der Draht wird stets durch eine oft recht lang gehaltene Düse geführt, vor deren Austrittsöffnung unmittelbar der Lichtbogen unterhalten wird. Oberhalb der Düse sind mehrere z. T. geriffelte Vorschub- und Richtrollen angeordnet. Der Strom wird über eine besondere, durch Federdruck am Draht anliegende Kontaktrolle zugeführt. Beim Arbeiten mit Manteldraht, der mit Kerndurchmessern von 3...7 mm von der Trommel abgewickelt werden muß, sind Drahttrommeln von großen Wickeldurchmessern (etwa 700...800 mm) notwendig. Dabei ist natürlich eine ausreichende Biegsamkeit des Drahtes Bedingung. Je nach Drahtdicke sind 200...800 m Draht aufgewickelt. Mit verschiedenen Drahtdicken auszuführende Schweißungen, z. B. Mehrlagenschweißungen, erfordern mehrere Drahttrommeln, die über dem Schweißkopf zweckmäßig aufgehängt sind und einen raschen Wechsel gestatten. Drahtvorschub und Stromzufuhr erfolgen bei der ersten und bekanntesten Bauart dieser selbsttätigen Maschinen, wie nachstehend beschrieben: In einem Schweißkopfkasten läuft über Kettenrüsse eine Art Gallsche Transportkette, die man mit einem Paternosteraufzug vergleichen kann. In bestimmten

Entfernungen sind an ihr Greifzangen paarweise befestigt, die entsprechend dem Vorschub des Drahtes diesen einspannen und mitnehmen. Kurz bevor der Draht von diesen Zangen gefaßt wird, wird er an seinen Kontaktstellen einseitig selbsttätig von seiner Ummantlung auf etwa je 8 mm Länge befreit und metallisch blank geschliffen. Die übrige Umhüllung zwischen den greifenden und folgenden Zangenpaaren bleibt unbeschädigt erhalten. Ein Vorzug des endlosen Drahtes gegenüber der Stabelektrode ist der Fortfall des Elektrodenwechsels und der sich hierdurch ergebenden Übergangsstellen in der Naht. Außerdem wird der Elektrodenabfall vermieden.

Bei allen Drahtschweißköpfen ist noch einer Forderung zu genügen, nämlich der Pendelbewegung. Um eine für jedes Erfordernis ausreichende Schweiß-

nahttraubenbreite besonders bei Decklagen zu erzielen, ist es notwendig, den Schweißkopf mit einer Pendelvorrichtung auszustatten, wobei der Ausschlag des Pendels und dessen Schwingungszahl auch während des Schweißens in möglichst weiten Grenzen regelbar sein muß.

Ummantelte Stabelektroden.
In diesem Sinne halbselbsttätig arbeitet die in Abb. 132 dargestellte Einrichtung. Die Auswechslung und das Einspannen der Elektroden geschieht von Hand. Der eigentliche Schweißkopf *b* ist an den Schalt- und Regelschrank *a* angebaut. Das ganze Fahrwerk läuft auf Leit- und Transportrollen 1 und 2 auf einem Fahrgestell beliebiger Bauart. Der Schaltschrank enthält alle Bedienungsteile, wie Stromschalter, Geschwindig-

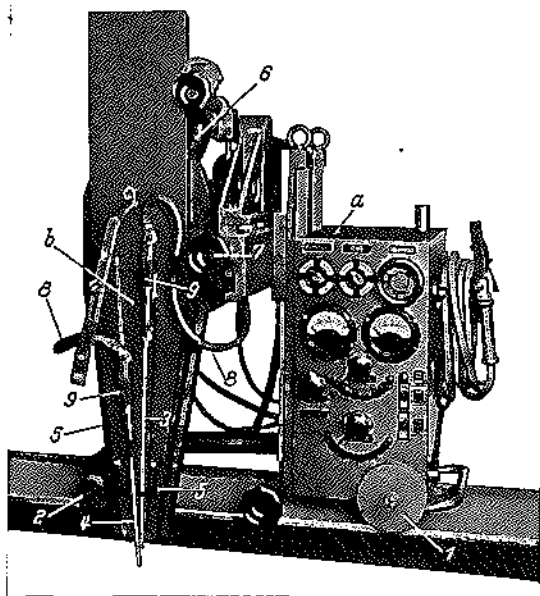


Abb. 132. Halbselbsttätige Schweißeinrichtung für Stabelektroden.

keitsregler, Schalter für Vorwärts- und Rücklauf des Fahrwerks, Schweißstromregler, Pendelreglung usw. Dem im Schweißkopf eingespannten, spitzwinklig zueinander angeordneten Elektrodenpaar 3 und 4 wird der Schweißstrom durch die Kabel 8 zugeleitet. 5 sind Absaugrohre, die mit einem oben am Kopf untergebracht, durch einen Motor angetriebenen Entlüfter (Exhaustor) 6 in Verbindung stehen. Die Arbeitsweise ist kurz folgende: Von den mit Hebeln 9 angeklemmten Elektroden ist jeweils nur eine im Betrieb, im Bild die mit 4 bezeichnete. Ist diese Elektrode abgeschmolzen, dann wird der neue Lichtbogen der Elektrode 3 am alten gezündet und setzt sofort ein, während der den Elektrodenrest (-stummel) führende Halter in der Schlitzführung des Kopfes selbsttätig nach oben wandert. Für das Einlegen der neuen Elektrode verbleibt demnach genügend Zeit, nämlich so viel, als etwa dem Abbrand der nun im geschlossenen Stromkreis liegenden Elektrode 3 entspricht. Dadurch wird ein ununterbrochenes Schweißen möglich; dem Bedienungsmanne fällt auch die Auswechslung der Elektroden zu. Auch diese Einrichtung arbeitet ohne Relais mit Steuermotoren, die neben allen anderen

Hilfseinrichtungen auf einem Gestell oberhalb des Schweißstromerzeugers angeordnet sind (Abb. 133).

Eine andere Bauweise beruht darauf, in einem karussellartigen Magazin eine bestimmte Anzahl ummantelter Stabelektroden unterzubringen, die dem Halter einzeln selbsttätig zugeführt werden. Beim Nachrutschen der jeweils folgenden Elektrode wird deren unteres Ende mit der im Betriebe befindlichen stromführenden Elektrode zentrisch zum Kontakt und durch Lichtbogenbildung zum Verschweißen gebracht, so daß sich in gewissem Sinne ein endloser Draht ergibt. Ohne Zweifel sind aber auch hier Lade- und Bewegungshemmungen kaum zu verhüten, so daß der von einer Wickeltrommel entnommene endlose Draht in jedem Falle den Vorzug verdient.

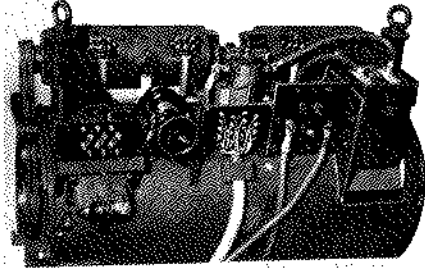


Abb. 133. Schweißdynamo mit Steuermotoren für Automaten.

d) Das Ellira-Verfahren.

Ganz abseits aller bisher geschilderten Möglichkeiten für selbsttätige Schweißungen steht das „Ellira-Verfahren“¹, das mit außerordentlich hohen Stromstärken und einer bisher ungewöhnlich großen Elektrodenvorschubgeschwindigkeit arbeitet. Dieses zur Zeit noch im Ausbau befindliche Verfahren wurde hauptsächlich für die Schweißung dicker Bleche entwickelt und erfordert erhebliche Anschaffungskosten, die seiner praktischen Anwendung gewisse Grenzen ziehen. Durch die hohe Energieaufnahme und die Wirkung eines Sonderschweißpulvers wird eine Schweißleistung von ungeahnter Größe erzielt.

Arbeitsweise. Grundsätzlich beruht das Ellira-Verfahren darauf, vor dem Schweißdraht, also vor dem Lichtbogen, reichliche Mengen eines Schweißpulvers aufzubringen, das außer wesentlichen metallurgischen Aufgaben die eines hohen elektrischen Widerstandes zu erfüllen hat. Nach Abb. 134 werden die zu schweißenden Bleche *a* und *b* an der Nahtkante mit einem kleineren als sonst üblichen Auswärtigungswinkel α versehen. Die Abschrägung beträgt z. B.

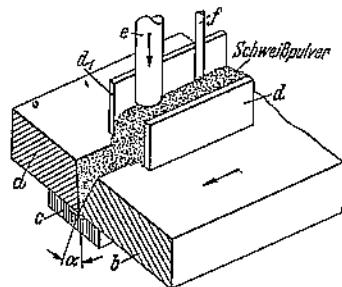


Abb. 134. Grundsätzliche Arbeitsweise des Elliraverfahrens.

bei 5 mm Blechdicke etwa 60°,
 „ 50 „ „ „ 30°.

Entsprechend dem großen Umfang des Schmelzbades und der Gefahr des Durchschmelzens der Schweißnaht muß diese ihrer Länge nach mit einer genuteten Kupferschiene *c* unterlegt werden. Zwei beiderseits der V-Fuge parallel angeordnete Grenzbleche *d* und *d*₁ von genügender Höhe fangen das durch ein Zuführungsrohr *e* in gleichbleibenden und vom Elektrodenvorschub abhängigen Mengen aufgebrauchte Pulver ab. Das Schweißpulver wird demnach im geringen Abstand vor dem Draht *f* aufgebracht, und zwar in so reichlichen Übermengen, daß diese später nach Fertigstellung eines bestimmten Nahtabschnitts zurück-

¹ Deutsche Bezeichnung, entstanden als Abkürzung von Elektro-Linde-Rapidschweißung. Dieses Verfahren wurde in Amerika entwickelt und als „Unionmeltverfahren“ bezeichnet.

gesaugt und neuerlich dem Schweißvorgang wieder zugeführt werden. Es wird mit Wechselstrom und nacktem, der besseren Stromleitung wegen schwach verkupferten Draht gearbeitet, dessen Vorschub etwa in der bereits geschilderten Weise erfolgt. Der im Schweißpulver brennende Lichtbogen ist äußerlich kaum wahrnehmbar und wird, da das Pulver im kalten Zustand einen Nichtleiter darstellt, erstmalig durch eine Zündpille gezündet, die aus einer kleinen Eisenwolkugel besteht. Beim Einschalten des Schweißstromes schmilzt diese einen hohen elektrischen Widerstand bildende Kugel augenblicklich und bringt auch das in unmittelbarer Nähe vorhandene Schweißpulver zum Schmelzen, das seinerseits bei hohen Temperaturen einen geringen spezifischen Widerstand besitzt und den

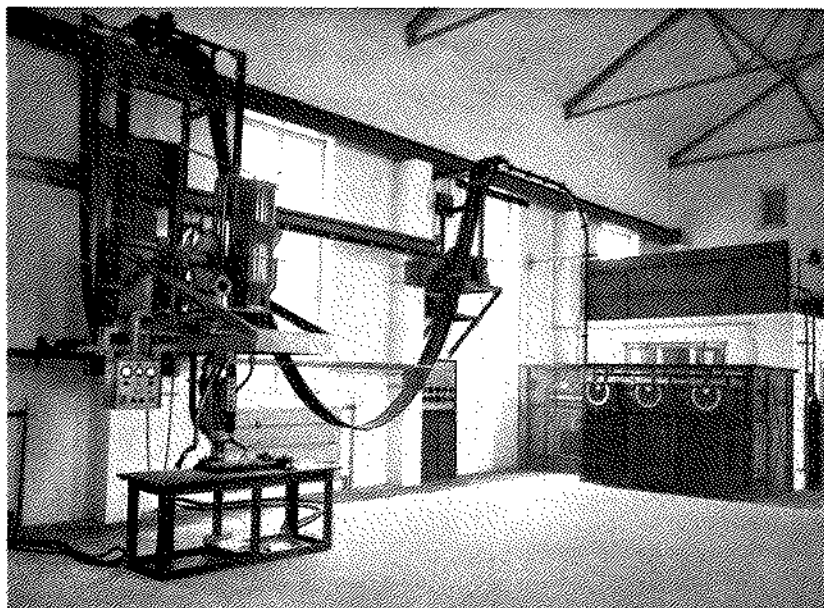


Abb. 135. Selbsttätige Schweißeinrichtung nach dem Ellitrverfahren.

Strom leitet. Damit ist der eigentliche Schweißvorgang eingeleitet. Das erhitzte, stromleitende Schlackenbad gibt seine Wärme an die angrenzenden Pulverteile, an das Blech und an den Draht ab, so daß im gewissen Sinne von einer mittelbaren Widerstandserhitzung gesprochen werden kann. Die hinter dem Schmelzbad noch flüssige Schlacke erstarrt, nachdem sie ihre Wärme an die Schweiße abgegeben hat und bildet über der Schweißbraupe einen glasartigen dichten Überzug, der beim Erkalten leicht und meist von selbst abplatzt. Da das Schweißpulver die Ummantelung des Drahtes im hohen Maße ersetzt, entstehen Schweißnähte von sehr gleichmäßiger und glatter Oberfläche.

Schlacke. Neben Kalziumsilikat sind die Silikate des Magnesiums und Aluminiums sowie Kalziumfluorid die wesentlichen Bestandteile der Schlacke. Die chemische Analyse des als Ionenleiter aufzufassenden Pulvers wird geheimgehalten. Der größte Teil des aufgebrauchten Pulvers nimmt am Schweißvorgang, wie schon erwähnt, nicht teil, sondern wird wieder abgesaugt. Der am Vorgang metallurgisch aktiv beteiligte Pulveranteil, der nicht mehr weiter verwendet werden kann, beträgt nur etwa 80...90 vH des niedergeschmolzenen Drahtge-

wichtiges. Der außerordentlich hohe Einbrand ergibt ein sonst unbekanntes Verhältnis zwischen niedergeschmolzenem Draht und umgeschmolzenem Werkstoff von 35 : 65 vH.

Leistung. Um einen Begriff von der Energieaufnahme und den Leistungen zu geben, sei nur angeführt, daß für die Schweißung

von 5 mm-Blech etwa	550 A und 36 V,
für 16 mm- „ „	1250 A „ 38 V,
„ 35 mm- „ „	1800 A „ 40 V,
„ 60 mm- „ „	3000 A „ 42 V

erforderlich sind. Die Schweißgeschwindigkeiten betragen für die genannten Blechdicken 840, 480, 220 und 130 mm/min.

Beispiele. Einen Gesamtüberblick über die Ellira-Anlage bieten die Abb. 135 u. 136, und zwar zeigt Abb. 135 eine Versuchseinrichtung für normale Außennahtschweißungen (Längs- und Rundnähte) und Abb. 136 die Einrichtung für das Schweißen im Inneren von Behältern. Die Drehstromumspanner stehen mit dem Schweißkopf (Abb. 135) durch ein schweres Kabelgehänge in Verbindung. Die Schweißeinrichtung ist in einem sperrigen, alle Einzelteile enthaltenden und motorisch getriebenen Fahrgestell untergebracht, dessen Schaltkasten links unten zu erkennen ist. Die Knöpfe für die Schweißkopfsteuerung sind an einer Schaltleiste angebracht. Auf dem Fahrgestell rechts ist der Schweißpulverbehälter und links davon der Exhauster für das Zurrücksaugen des Pulvers angeordnet. Die Ausführungsform Abb. 136 ist wesentlich gedrängter gebaut und ähnelt den bereits besprochenen Einrichtungen anderer Bauarten.

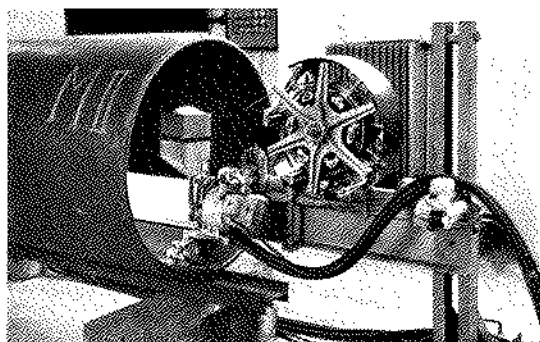


Abb. 136. Ellira-Schweißeinrichtung für das Schweißen im Inneren von Behältern.

e) Das Kael-Verfahren.

Ein eben im Ausbau begriffenes weiteres Sonderverfahren der maschinellen Lichtbogenschweißung ist das sog. Kael-Verfahren, das vor etwa 12 Jahren einen über Anfangsentwicklungen nicht hinausgekommenen Vorläufer (Hemaf) hatte. Dabei handelte es sich um einen Drehstromlichtbogen und um Handschweißung. Demgegenüber arbeitet das Kael-Verfahren maschinell, wodurch hohe Stromstärken zur Anwendung kommen können. Die Anordnung der Lichtbogen und die Ausbildung der durch die Ummantelung 3 isolierten beiden Elektroden 1 und 2 ist in Abb. 137 skizziert.

Um ohne übermäßige Erwärmung des Werkstücks hohe Abschmelzleistungen zu erzielen, werden, was neuartig ist, die beiden Lichtbogen zum Werkstück normal, dagegen der zwischen den Zwillingselektroden wesentlich höher belastet, in einem regelbaren Verhältnis von 1 : 1 bis 1 : 4. Der Automat gleicht der Abb. 132, ist jedoch, entsprechend den höheren Stromstärken, schwerer gebaut.

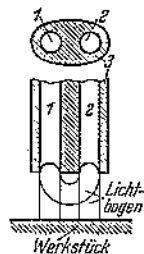


Abb. 137. Grundform der Drehstromlichtbogenschweißung.

3. Das Schweißzubehör.

a) Meß- und Regeleinrichtungen.

Meßeinrichtungen. Erforderlich sind für den praktischen Betrieb Meßeinrichtungen für die Spannung und die Stromstärke (im Schweißstromkreis) und für den verbrauchten elektrischen Strom. Die Spannung mißt man mit dem Voltmeter, die Stromstärke mit dem Amperemeter, den Stromverbrauch mit dem Kilowattstundenzähler. Die Ablesung dieser Meßeinrichtungen ist sehr einfach. Weitere Meßinstrumente kommen nur für besondere Versuche in Betracht, wenn man z. B. den Wirkungsgrad des Schweißumformers u. a. m. feststellen will. Bei Versuchs- und Kontrollmessungen verwendet man mitunter auch selbstaufzeichnende Meßinstrumente, die meist Strom- und Spannungsvorlauf auf einen Papierstreifen kurvenmäßig aufzeichnen (Abb. 138). Das Voltmeter und das Amperemeter sind in den Schweißstromkreis einzuschalten, der

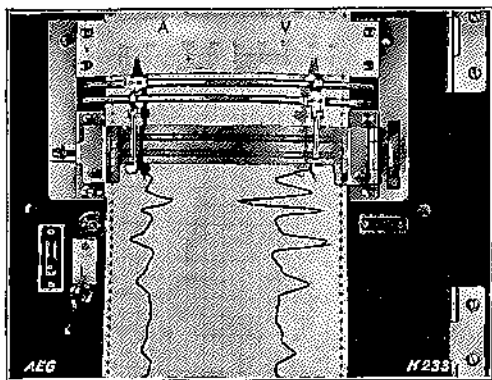


Abb. 138. Registrierendes Volt- und Amperemeter.

Kilowattstundenzähler dagegen in die Zuleitung vom Netz her; denn im praktischen Betriebe kommt es nur darauf an, den Gesamtstromverbrauch der Schweißanlage zu messen, nicht den meist wesentlich niedrigeren Stromverbrauch im Schweißstromkreis, während uns andererseits für den Schweißvorgang nur Spannung und Stromstärke im Schweißstromkreis interessieren. Es wurde schon darauf hingewiesen, daß bei fahrbaren Schweißumformern und Umspannern zweckmäßig Voltmeter und Amperemeter (beim Umspanner begnügt man sich oft mit dem Amperemeter) am Umformer

selbst angebracht werden. Bei Großanlagen baut man im allgemeinen die Meßinstrumente zusammen mit den Anlassern und Regeleinrichtungen in eine Schalttafel ein.

Regeleinrichtungen. Der Antriebsmotor erfordert einen Anlasser, während die Schweißdynamo in der Weise geregelt wird, wie es bei den Schaltungsformen besprochen wurde. Es handelt sich bei Gleichstrom im allgemeinen darum, die Erregerströme der Magnetfelder zu regeln, was durch einfache regelbare Vor-schaltwiderstände im Nebenschlußkreis der Schweißdynamo erfolgt. Die Gegenverbundwicklung kann entweder durch einen parallel gelegten Widerstand oder durch Abschalten von Windungen geregelt werden. Über die Anzapf- und Streuungsregelung der Schweißumspanner wurde schon im Abschnitt 1 d dieses Kapitels gesprochen. In allen Fällen handelt es sich darum, die Spannung im Schweißstromkreis zu beeinflussen, zu regeln. Damit regelt man dann auch von selbst (nach dem Ohmschen Gesetz) die Stromstärke. Ob man also hier von einer Regelung der Spannung oder der Stromstärke spricht, ist letzten Endes gleichgültig.

Den elektrotechnischen und mechanischen Aufbau der Regeleinrichtungen zu beschreiben, liegt nicht im Rahmen dieses Buches. Bei kleinen fahrbaren Schweißumformern werden die Regeleinrichtungen zweckmäßig am Umformer selbst untergebracht. Bei Montagearbeiten, wo der Schweißer nicht selten ge-

zwungen ist, mit langen Schweißkabeln weit entfernt vom Standort des Umformers zu arbeiten, z. B. im Stahlbau, Schiffsbau usw., ist der Fernregler (Abb. 139) ein willkommenes Hilfsgerät. Zu den Regeleinrichtungen zählen schließlich auch die bereits erwähnten, z. T. recht verwickelten Steuereinrichtungen selbsttätiger Schweißanlagen.

b) Schweißkabel.

Kabelauführung und -querschnitt. Die Klemmen des Schweißumformers werden zur Stromleitung einerseits mit dem Elektrodenhalter, andererseits mit dem Werkstück durch Kupferleitungen verbunden. Diese müssen möglichst beweglich sein und überall verwendet werden können; sie sind daher gut zu isolieren und zu schützen, was durch ihre Ausbildung als Kabel geschieht. Ein Schweißkabel besteht aus vielen einzelnen, als Seil gewickelten Kupferdrähten, die mit Hilfe von Gummi-, Leinenband- und Kordelumwicklungen, oft auch durch Einnähen in Leder isoliert und geschützt sind. Um die Beweglichkeit des Elektrodenhalters möglichst wenig zu behindern, wird häufig das letzte Stück in etwa 1 m Länge, das man auch als Handkabel bezeichnet, besonders biegsam gewählt.

Wenn die Kabel nicht zu lang sind, also kein größerer Spannungsverlust zu erwarten ist, bemißt man sie auf Grund der zulässigen Erwärmung, die wiederum von der Stromstärke abhängt. Die Vorschriften und Normen des Verbands Deutscher Elektrotechniker sehen für bestimmte Querschnitte der Kabel die in Tabelle 12 angeführten höchsten, dauernd zulässigen Stromstärken vor. Da aber die Stromstärke im Schweißstromkreis längst nicht dauernd ihren Höchstwert hat, vielmehr der Strom zeitweise sogar ganz unterbrochen wird, kann man mit der Belastung der Schweißkabel über die in Tabelle 12 angegebenen Werte hinausgehen, sofern dadurch keine größere Erwärmung der Kabel als bei der Dauerbelastung eintritt. Praktisch darf man die Stromstärkewerte der Tabelle 12 um etwa 25 vH überschreiten. Ein Kabel von z. B. 50 mm² Querschnitt kann also anstatt mit 160 A noch mit 200 A, ein Kabel von 240 mm² anstatt mit 450 A noch mit 560 A belastet werden.

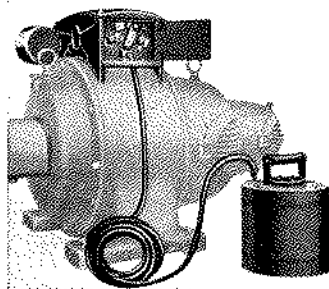


Abb. 139. Tragbarer Fernregler, angeschlossen.

Tabelle 12.

Kabelquer- schnitt	Höchste dauernd zulässige Stromstärke	Kabelquer- schnitt	Höchste dauernd zulässige Stromstärke	Kabelquer- schnitt	Höchste dauernd zulässige Stromstärke	Kabelquer- schnitt	Höchste dauernd zulässige Stromstärke
mm ²	A	mm ²	A	mm ²	A	mm ²	A
10	43	50	160	150	325	400	640
16	75	70	200	185	380	500	760
25	100	95	240	240	450	625	880
35	125	120	280	300	525	800	1050

Berücksichtigung des Spannungsverlustes. Nach Abschnitt I C 1 und I C 2 gilt (und zwar für Gleichstrom und einphasigen Wechselstrom):

$$R = \frac{E}{J} \quad \text{und} \quad R = \rho \cdot \frac{2l}{F} \quad \left(\text{oder} \quad R = \frac{2l}{k \cdot F} \right),$$

worin R den Leitungswiderstand, E den Spannungsverlust in der Leitung in Volt, J die Stromstärke in Ampere, ρ den spezifischen Leitungswiderstand, k die

elektrische Leitfähigkeit, l die einfache Länge des Kabels in Metern ($2l$ folglich Hin- und Rückleitung) und F den Kabelquerschnitt in Quadratmillimetern bedeuten. Aus beiden Gleichungen folgt:

$$\frac{E}{J} = \frac{2l}{k \cdot F} \quad \text{und} \quad E = \frac{J \cdot 2l}{k \cdot F}.$$

Nach dem vorigen Absatz können wir uns z. B. bei der am häufigsten vorkommenden höchsten Stromstärke von 200 A noch mit einem Kabel von 50 mm² Querschnitt begnügen. Nehmen wir nun erstens eine einfache Kabellänge von 20 m und zweitens eine solche von 100 m an und setzen wir in der letztgenannten Gleichung die elektrische Leitfähigkeit des Kupferdrahtes unseres Kabels nach Tabelle 2 mit 56,1 ein, so erhalten wir:

$$\text{Spannungsverlust } E = \frac{J \cdot 2l}{k \cdot F} = \frac{200 \cdot 2 \cdot 20}{56,1 \cdot 50} = 2,84 \text{ V (Fall 1),}$$

$$\text{bzw. } = \frac{200 \cdot 2 \cdot 100}{56,1 \cdot 50} = 14,2 \text{ V (Fall 2).}$$

Wir sehen, daß der Spannungsverlust genau entsprechend (proportional) der Länge des Kabel zunimmt. Bei einer Klemmenspannung des Schweißumspanners von z. B. 25 V haben wir also bei 20 m einfacher Kabellänge einen Spannungsverlust von $2,84/25 \cdot 100 = 11,3$ vH; dagegen beträgt der Spannungsverlust bei 100 m einfacher Kabellänge 56,5 vH oder anders ausgedrückt: Die Spannung an der Schweißstelle sinke auf $25 - 14,2 = 8,8$ V. Nur bei kürzeren Kabeln (bis etwa 30 m einfacher Länge) genügt demnach die Festlegung des Kabelquerschnitts nach Tabelle 12; bei langen Kabeln müssen größere Querschnitte gewählt werden, als sie sich nach der Tabelle ergeben. Zum Beispiel muß unser vorhin angeführtes Kabel von 100 m Länge mit Rücksicht auf einen Spannungsverlust von weniger als 20 vH den sehr hohen Querschnitt von 150 mm² erhalten; dann erst ergibt sich nämlich der zulässige Spannungsverlust:

$$E = \frac{200 \cdot 2 \cdot 100}{56,1 \cdot 150} = 4,73 \text{ V (= 18,9 vH von 25 V)}$$

c) Elektrodenhalter und Klemmen.

Elektrodenhalter (Schweißzange, -kolben). Der Elektrodenhalter muß betriebssicher und möglichst leicht sein, sowie ein schnelles Auswechseln der Elektroden (Schweißstäbe) gestatten. Man unterscheidet zwischen Elektrodenhaltern für Kaltschweißung, die nur dünne Elektroden zu halten haben und deshalb besonders handlich ausgeführt werden können, und solchen für Warmschweißung, die wegen der hohen Stromstärken und dickeren und längeren Elektroden schwerer

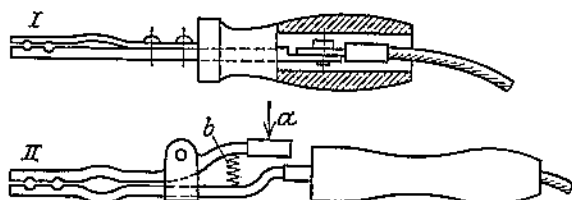


Abb. 140. Schweißzangen für Kaltschweißungen.

gebaut sein müssen. Den einfachsten Elektrodenhalter für Kaltschweißung zeigt Abb. 140 I in einer einfachen Klemmvorrichtung, die aus zwei Eisenschienen hergestellt ist. Die neue Elektrode wird von links vorn eingeklemmt; der Rest der alten Elektrode fällt dabei von selbst heraus.

Der Anschluß an das Schweißkabel, durch eine Schraube bewirkt, liegt geschützt rechts im Holzgriff. Ein Nachteil der Vorrichtung ist das Nachlassen

der Spannkraft nach längerem Gebrauch. Nach dieser Richtung besser und dabei doch auch leicht genug ist die Schweißzange in Abb. 140 II. Durch einen Druck mit dem Daumen auf den Zangenhebel bei a wird die Feder b zusammengedrückt und das Maul der Schweißzange geöffnet. Der Rest des verbrauchten Schweißstabes fällt heraus; der neue Stab wird eingelegt und durch Nachlassen des Daumendrucks eingeklemmt. Derartige Elektrodenhalter können sehr wohl leicht und handlich ausgeführt werden, wie es auch Abb. 142 zeigt. Ein kleines Schild soll die Hand des Schweißers gegen Metallspritzer und Wärme schützen. Diese Schweißzangen werden allerdings manchmal unnötig schwer gemacht und sind dann mit Recht beim Schweißer unbeliebt. Eine andere in Deutschland wenig

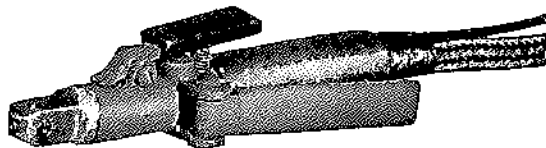


Abb. 141. Elektrodenhalter mit Zündkontakt.

übliche Ausführungsform ist noch in Abb. 141 wiedergegeben. Der seitliche Hebel dient zum Festklemmen des Schweißstabs; die Auswechslung dürfte hier aber nicht so schnell vor sich gehen wie bei den in Abb. 140 II und 142 dargestellten Elektrodenhaltern. Den oberen Hebel in Abb. 141 benutzt der Schweißer zur Betätigung eines Zündkontakts, wodurch die Spannung des Schweißgenerators augenblicklich auf den zum Zünden des Lichtbogens günstigsten Wert gesteigert wird (s. Abschnitt „Gleichstromumformer“, Generatoren mit besonderem Vorschaltwiderstand). Der Kopf dieser Schweißzange ist abschraubbar und kann leicht durch einen neuen ersetzt werden.

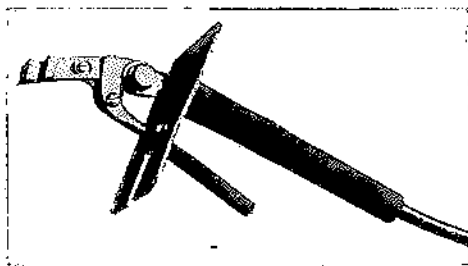


Abb. 142. Elektrodenhalter.

Der Schweißkolben für Warmschweißung (größere Gußschweißungen und für dicke Kohlen), wie ihn Abb. 143 veranschaulicht, hat gewöhnlich links eine Flügelschraube zum sichereren Festklemmen der schweren Gußeisenelektroden. Auch der Griff ist länger und schwerer gehalten, da er oft mit beiden Händen angefaßt wird.



Abb. 143. Schweißkolben für Warmschweißungen.

Das an den Elektrodenhalter angeschlossene Kabel ist meistens nur etwa 5 m lang. Bei

größeren Entfernungen des Schweißstücks vom Umformer wird ein Zusatzkabel in Gebrauch genommen (meist etwa 20 m lang), das an den Umformer angeschlossen wird und dessen anderes Ende mit dem Handkabel durch eine Schraube verbunden ist. Die Verbindungsstelle wird durch einen aufklappbaren Holzkasten gegen Kurzschluß geschützt.

Leider muß festgestellt werden, daß der Schweißbetrieb einen großen Verschleiß an Elektrodenhaltern mit sich bringt und alle bisher auf dem Markte befindlichen Ausführungsformen den praktischen Betriebsbedürfnissen nur wenig genügen.

Anschlußklemmen. Im allgemeinen endigt das Schweißkabel, das mit dem Werkstück verbunden wird, in einer Klemme (Schraubzwinde), die an das Werk-

stück angeschraubt wird (Abb. 144). Bei kleineren Arbeiten, die auf einem Schweiß-tisch ausgeführt werden, genügt es auch in den meisten Fällen, daß die Klemme am Schweißbisch befestigt wird. Um ein rasches Verlegen des Werkstückanschlusses zu ermöglichen, wird die Klemme oftmals durch ein nur aufliegendes schweres Eisenstück ersetzt.

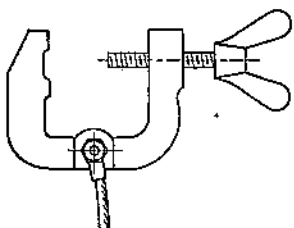


Abb. 144. Anschlußklemme für das Werkstück.

d) Strahlungsschutz und Bekleidung.

Lichtstrahlen. Die Strahlen, die vom Lichtbogen ausgehen, kann man einteilen: in sichtbare Lichtstrahlen, unsichtbare infrarote Strahlen und unsichtbare ultraviolette Strahlen. Gegen die sichtbaren Lichtstrahlen kann man sich — ähnlich wie beim Gas-schweißen, nur daß hier die Lichtwirkung stärker ist — durch dunkelfarbige Gläser schützen. Besser als rote und blauviolette sind die graugrünen Gläser, weil sie den Schweißgegenstand und den Lichtbogen besser sichtbar machen. Die unsichtbaren infraroten (d. h. im Spektrum außerhalb des Rot liegenden) Strahlen werden auch Wärmestrahlen genannt, weil sie beim Auftreffen auf für sie undurchlässige Stoffe in Wärme verwandelt werden. Sie werden am wenigsten von dunklem Glimmer, dann auch noch verhältnismäßig wenig von grünem und blauem Glas durchgelassen. Am gefährlichsten sind die unsichtbaren ultravioletten (d. h. jenseits des Violett liegenden) Strahlen weil sie stets sehr schnell eine starke Schädigung der Augen (Bindehaut-entzündung) und außerdem noch eine Verbrennung der Haut (gegen die aller-dings manche Menschen unempfindlich sind) herbeiführen. Undurchlässig für ultraviolette Strahlen sind gewöhnliches Glas von größerer Dicke, klarer oder bernsteinfarbiger Glimmer und weißes oder farbiges Zelluloid. Dabei ist aller-dings zu beachten, daß bei einer gewöhnlichen Glasbrille seitliche Lichtreflexe (Lichtstrückstrahlungen) das Auge hinter den Brillengläsern treffen, eine einfache Brille also nicht verwendbar ist. Man sucht sich im allgemeinen gegen alle drei Strahlenarten durch ein farbiges (am besten wohl graugrünes) Spezialglas zu schützen, das inmitten eines größeren Schirmes oder einer Haube sitzt. Nach neueren Erkenntnissen sind zwei verschiedenfarbige Gläser (z. B. rot und blau) nicht erforderlich. Die Farbtönung des Glases muß der Schweißer in gewissen Grenzen selbst bestimmen, da der eine durch ein gefärbtes Glas bestimmter Tönung noch gut sehen kann, das für einen andern zu dunkel ist. Selbstverständlich darf unter der Wahl eines helleren Glases der wirksame Augenschutz nicht leiden. Unter allen Umständen ist jeder Schweißer streng anzuhalten, ein Schutzschild zu benutzen. In DIN 4647 sind die Richtlinien für den Strahlungsschutz zu-sammengefaßt, deren Einhaltung von den Berufsgenossenschaften verlangt wird. Nach diesen ist das üblichste Glas mit der Kennziffer 788 versehen.

Tritt durch Unachtsamkeit dennoch ein sog. „Verblitzen“ der Augen ein, dann ist das Einträufeln eines Schmerzmittel anzuraten, das in jeder Schweißerei zur Hand sein sollte. Eines der bekanntesten Mittel sind die Novo-cainpräparate, die gegen ein ärztliches Rezept in Apotheken erhältlich sind. Sie enthalten neben 0,05 vH Novocain noch einige andere Bestandteile, z. B. Bor und Aqua dest. Weniger wirksam ist z. B. Borwasser; Sauberkeit ist selbstver-ständlich.

Da die farbigen Gläser verhältnismäßig teuer sind und durch Metallspritzer bald undurchsichtig und unbrauchbar werden, schützt man sie durch Vorsetzen des billigeren gewöhnlichen Klarglases (Fensterglas).

Farbige Filter und Glimmer an Stelle der Gläser zu verwenden, hat sich insofern nicht als vorteilhaft erwiesen, als sie sich unter dem Einfluß der Wärme nach kurzer Zeit z. T. werfen oder durch Gefügeveränderungen trüb und undurchsichtig werden.

Strahlungsschutzeinrichtungen. Man unterscheidet zwischen Handschutzschilden und Schutzhauben. Andere Bezeichnungen wie Schweißspiegel, Kopfmaste, Schweißerkappe usw. sind zwar gebräuchlich, aber weniger treffend. Ist die linke Hand während des Schweißens frei, so bedient sich der Schweißer mit Vorliebe des Handschutzschildes, weil es die Bewegungsfreiheit des Kopfes nicht behindert und bei kurzen Arbeitsunterbrechungen beiseitegelegt werden kann. Werden beide Hände durch den Schweißvorgang in Anspruch genommen, z. B. beim Warmschweißen, bei den gaselektrischen Schweißverfahren, beim

Arbeiten auf Leitern u. dgl., so ist das Tragen einer Schutzhaube unerlässlich. Sie hat den Nachteil weniger guter Ventilation, hemmt die Bewegungsfreiheit des Kopfes und erfordert bei den meisten Konstruktionen zur Öffnung des Fensters oder zum Hochklappen der Haube das Freimachen einer Hand. Ein Ablegen kommt nur bei größeren Arbeitsunterbrechungen in Frage.

Die Schutzgeräte sollen unverbrennbar, nicht stromleitend, von geringem Gewicht, handlich und bequem sein. Übliche Bau-

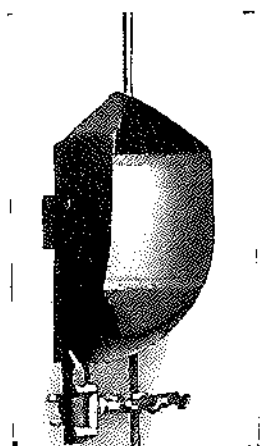


Abb. 145. Handschutzschild gegen Lichtstrahlen.

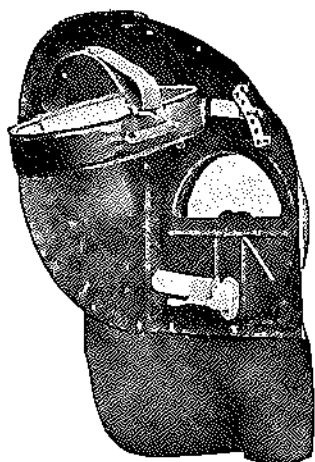


Abb. 146. Schutzhaube für Elektro-schweißer.

stoffe für ihre Herstellung sind Sperrholz, Vulkanfiber, Preßspan, Leder, Kunststoffmassen usw. Die Abmessungen der Schutzgeräte müssen so gehalten sein, daß das Gesicht allseitig geschützt ist und die Fensteröffnungen ein genügendes Blickfeld offen lassen. Die das Schild haltende Hand soll möglichst durch einen Ledervorhang oder andere einfache Maßnahmen gegen Strahlenwirkung geschützt sein, sonst müssen Handschuhe getragen werden. Damit die Hauben dem Schweißer möglichst wenig lästig fallen, ist auf geeignete Befestigungseinrichtungen besonders Wert zu legen. Ledersegmentkappen, Stirnbänder, Kopfbügel und ähnliches dürfen nicht drücken.

Abb. 145 zeigt ein vielgebräuchliches Handschutzschild aus Vulkanfiber, das den allgemeinen Anforderungen gut entspricht. Abb. 146 veranschaulicht die Innenansicht einer Schutzhaube aus Kunststoffmasse mit drehbarem Schutzfilter, das nicht von Hand, sondern durch einen Kinnhebelmechanismus betätigt werden kann.

Nicht nur der Schweißer selbst, sondern auch die in der Nähe eines Schweißplatzes Beschäftigten oder Vorübergehende müssen gegen die Strahlenwirkung geschützt werden. Deshalb verlegt man feste Schweißplätze in allseitig abgeschlossene Kojen. Wechselnde Montageplätze werden durch Schutzwände, Vorhänge oder bei Schienenschweißungen durch Schweißerzelte gegen Sicht

geschützt. Auf Ausstellungen und Versuchsständen begegnet man auch abgeschlossenen Ständen, die nach der Besucherseite hin mit großen Schutzglasfenstern versehen sind.

Bekleidung. Außer den Augen muß auch der Körper gegen die ultravioletten und Wärmestrahlen geschützt werden. Eine Arbeitserleichterung durch Ent-

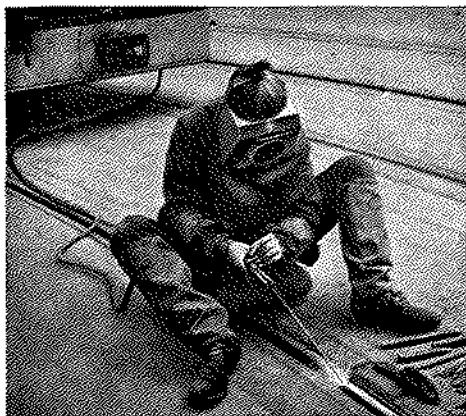


Abb. 147. Schweißer mit Schweißgerät (beim Schienen-aufschweißen).

blößen des Oberkörpers ist also nicht angängig. Dazu kommen noch die glühenden Eisenspritzer. Der Anzug soll deshalb derb, glatt und festanliegend sein. Insbesondere trage man eine einfache Kappe, binde die Rock-ärmel am Handgelenk zu, oder trage Handschuhe mit langen Stulpen. Diese werden aus Asbest, besser aus Leder gewählt. Gegen die besonders unangenehmen Verbrennungen der Füße durch die glühenden Spritzer beim Tragen von Halb- und Schnürschuhen sind übergreifende Gamaschen immer empfehlenswert.

Abb. 147 zeigt einen Schweißer in solcher Bekleidung und mit allem Zubehör für einfache Schweißarbeiten.

Zu erwähnen sind hierbei die wenigen Handwerkzeuge, wie Spitzhammer, Hammer, Meißel, Drahtbürste usw., die zur Reinigung der Schweißflächen und zum Entfernen der Schlacken erforderlich sind.

e) Unfallverhütung.

Im Abschnitt d sind bereits einige wichtige Punkte für Unfallverhütung erwähnt worden, besonders soweit es die Lichtbogenstrahlen angeht. Außerdem sind noch jene Schädigungsmöglichkeiten herauszustellen, die von den beim Abbrennen der Elektroden sich bildenden Gasen und Metaldämpfen und von Werkstücken, die giftige Gase entwickeln, herrühren können, sowie die Gefahren, die mit dem elektrischen Strom selbst verknüpft sind¹.

Gase, Schwebestoffe. Während Schädigungen der Schweißer durch Dämpfe und Gase nur in seltenen Fällen, z. B. bei giftigen Gasen (Bleimennigeanstrich, verzinkte Bleche, Messing) nachweisbar sind, können die Schwebestoffe den Atmungsorganen auf die Dauer lästig werden. Zwar wird der größere Teil dieser Stoffe durch das Schutzschild nach oben abgelenkt, jedoch ist in allen Fällen ein gründliches Absaugen der mit diesen Stoffen geschwängerten Luft durch einen ausreichend bemessenen Entlüfter dringend anzuraten. Der Luftwechsel wird durch eine möglichst in unmittelbarer Nähe der Schweißstelle angesetzte Absaugvorrichtung wesentlich gefördert. Eine neuere Bauart von Schweiß-tischen sieht dies besonders zweckmäßig dadurch vor, daß sie einen eingebauten Lüfter mit einer ins Freie führenden Absaugeleitung verbindet. Im übrigen sind sowohl hier als auch hinsichtlich aller übrigen sicherheitstechnischen Maßnahmen die Vorschriften der Berufsgenossenschaften zu beachten.

Spannungsgefahren. Hierfür gelten die sonst ganz allgemein in der Elektrotechnik bekannten Vorkehrungen. Alle spannungsführenden Klemmen und

¹ Siehe Liedloff: Unfallverhütung beim Elektroschweißen. Elektroschweißer 1930 Heft 1 u. 2.

Maschinenteile überhaupt und alle Kabel sind gut isoliert zu halten oder so abzudecken, daß man gegen zufällige Berührung geschützt ist. Schadhafte Stellen sind sofort zu beheben. Jede Berührung stromführender und nicht isolierter Teile ist zu vermeiden. Dabei ist vor einer Unsitte mancher Schweißer, den unter Spannung stehenden Elektrodenhalter unter den Arm zu klemmen, dringend zu warnen, da besonders nackte oder erhitzte menschliche Körper hierdurch ernstlich gefährdet sind. Besondere Vorsicht ist beim Schweißen in Kesseln und Behältern geboten, in denen der Schweißer leicht schwitzt. Es empfiehlt sich, als Isolation trockene Bretter zu verwenden und mit trockenen Handschuhen zu arbeiten. Auch darf nur ein Schweißumformer mit niedriger Leerlaufspannung Verwendung finden, kein Umspanner, da Wechselstrom gefährlicher ist als Gleichstrom.

Dieses Kapitel soll nicht abgeschlossen werden, ohne einer Meinung mancher Schweißer zu widersprechen, die in den Lichtbogenstrahlen eine Gefahr für ihre Zeugungsfähigkeit erblicken. Auf Grund umfangreicher statistischer Erhebungen und ärztlicher Untersuchungsbefunde kann heute gesagt werden, daß alle mit dieser Anschauung in Verbindung stehenden Beschwerden eine ganz andere Ursache hatten und deshalb völlig unhaltbar sind.

4. Die Schweißwerkstatt.

Die Werkstatteinrichtung. Die Werkstatt selbst soll ein hoher, luftiger und heller Raum sein und zur Schonung der Augen nach Möglichkeit sonnenfrei gehalten werden. Angenehm empfunden werden braun oder grau gestrichene Wände,

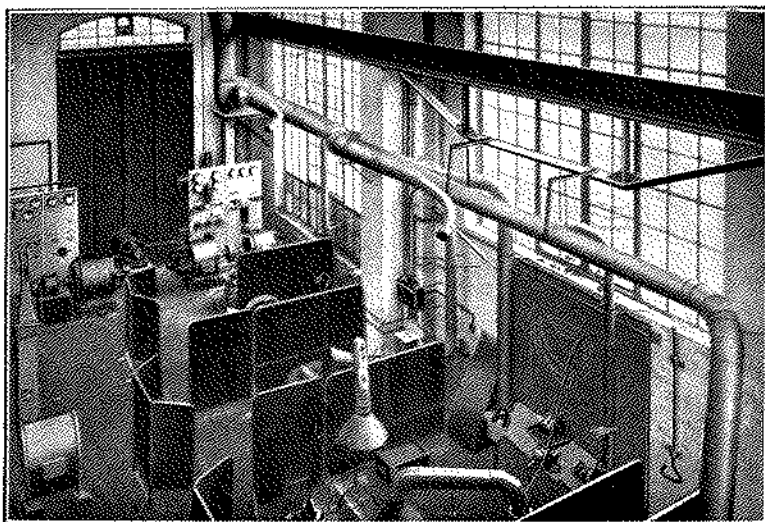


Abb. 148. Schweißwerkstatt.

die nicht glänzend, sondern matt sein sollen. Abb. 148 gestattet den Einblick in eine zweckmäßig eingerichtete Elektroschweißerei. Im Hintergrund haben die Schweißmaschinen — in diesem Fall Gleichstromschweißumformer — Aufstellung gefunden mit den zugehörigen Schalttafeln. Im Vordergrund sieht man die einzelnen Schweißstände (Schweißzellen oder Schweißkojen), die zum Schutz der Schweißer durch Blechwände voneinander getrennt und durch bewegliche Blech-

schirme gegen die übrige Werkstätte abgeschlossen sind. Über den Schweißischen sind Saugtrichter und an den Fenstern entlang ist die Absaugeleitung für Gase und Dämpfe zu erkennen, die an einem im Hintergrund in der Ecke der Werkstatt rechts oben befindlichen Entlüfter (Exhaustor) angeschlossen ist. Nur bei großen Mehrstellen-Schweißumformern und Warmschweißeinrichtungen ist deren Aufstellung in einem besonderen Raum vorzuziehen. Sofern es sich um eine Ausbesserungsschweißerei handelt, wie im Bilde, ist ein Laufkran zur Beförderung schwererer Stücke empfehlenswert. Der Fußboden sollte zum Teil aus Sand bestehen, um vor allem Gußausbesserungsstücke einformen zu können. Für Gußwarmschweißungen sind auch Wärmeöfen, Wärmegruben u. a. m. erforderlich, worauf im Abschnitt „Warmschweißung des Gußeisens“ genauer eingegangen wird. Je nach Umfang der Schweißerei sind zu Vor- und Nacharbeiten notwendig: einige der wichtigsten spanabhebenden Werkzeugmaschinen, eine oder mehrere Handbohrmaschinen (zum Abbohren von Rissen und für das Einsetzen von Stahlstiften bei Gußeisenkaltschweißungen) und eine elektrische Handschleifmaschine, am besten mit biegsamer Welle. Selbstverständlich muß das übliche Schlosser- und Schmiedehandwerkzeug vorhanden sein, insbesondere Hämmer, Meißel, Feilen und Drahtbürsten.

Die Größe der Maschinenanlage. Zur Schweißung von Stahl und für die Gußeisenkaltschweißung genügen nach früherem Schweißumformer für 200...300 A und bis zu 30 V Schweißspannung. Ein Gleichstromschweißumformer hat dementsprechend bis zu etwa 15 kW Leistung am Antriebsmotor nötig. Ein Wechselstromumspanner muß auf etwa 15 kVA bemessen werden, weil trotz des günstigen Wirkungsgrads des Umspanners ihm infolge des niedrigen Leistungsfaktors ($\cos \varphi$) von 0,25...0,45 vom Netz her etwa das Anderthalbfache der bei Gleichstromumformung erforderlichen Stromstärke zugeführt werden muß. Sind mehrere Maschinen der genannten Größe vorhanden, so können sie, wenn sie die gleiche Kennlinie haben, parallel geschaltet, also zusammen zur Gußeisenwarmschweißung benutzt werden. Für die letztere braucht man im Schweißstromkreis 400 bis 1000 A (seltener 1500 A) bei im Mittel 55 V. Nimmt man einen Gleichstromschweißumformer von 500 A Schweißstromstärke, so erfordert dieser eine Leistung des Antriebsmotors von etwa 50 kW. Der entsprechende Wechselstromschweißumspanner braucht 60...70 kVA. Für ganz schwere Warmschweißungen kann man zwei der oben erwähnten Maschinen oder zwei Maschinen für Kaltschweißung und die größere Warmschweißmaschine parallel schalten. Die Kaltschweißmaschinen müssen dann allerdings eine höhere Spannung hergeben können, da sie bei Warmschweißung mit 50...60 V Schweißspannung arbeiten. Hinsichtlich verschiedener Maschineneinzelheiten sei auf die früheren Abschnitte „Schweißumformer“ und „Schweißumspanner“ verwiesen.

5. Die Schweißelektroden.

a) Kohleelektroden.

Werkstoff. Die älteste Art der Elektroden ist die Kohleelektrode. Ähnlich der Bogenlampenkohle wird sie in Form von runden Stäben verwendet. Als Werkstoff dient in der Hauptsache Retortenkohle (Destillationsrückstand in den Retorten der Gasanstalten), neben dieser auch Graphit, Koks, Anthrazit und Ruß. Diese Stoffe werden fein pulverisiert, mit heißem Teer versetzt, innig gemengt, darauf in Pressen unter hohem Druck zu Stäben gepreßt und schließlich in Tiegeln gebrannt. Die vollen amorphen Kohlenstäbe bezeichnet man als Homogenkohlen, zum Unterschied von sog. Dochtkohlen, deren Kern aus einem

Fremdstoff (Wasserglas, Kohle und Borsäure) besteht und ein gleichmäßiges und ruhiges Brennen des Lichtbogens bewirken soll ohne die Inanspruchnahme eines magnetischen Blasfeldes. Werden die Kohleelektroden ausschließlich aus Graphit hergestellt und unter Luftabschluß in elektrischen Öfen geglüht, so erhält man eine viel dichtere, sog. Graphitkohle. Sie vermag höhere Stromdichten aufzunehmen und hat den Vorteil geringeren Abbrandes.

Abmessungen. Beim Benardos-Verfahren, nach dem nur ein Kohlestab zur Anwendung gelangt, da die Gegenelektrode durch das metallische Schweißgut selbst gebildet wird, haben die Elektroden eine Länge von 200...800 mm bei einem Durchmesser von 3...30 mm.

Anwendung. Während das Zerener-Verfahren keine praktische Anwendung mehr findet, kommt das Benardos-Verfahren neuerdings wieder mehr in Aufnahme, insbesondere bei selbsttätigen Schweißeinrichtungen mit und ohne Drahtzusatz. Es wird angewandt bei der Schweißung von Stahl, hauptsächlich zum Niederschmelzen von Stirn- und Bördelnähten (Eisenfässer u. dgl.), zur Ausbesserung von Lunkern in Stahlgußstücken und vereinzelt für die Schweißung von Nichteisenmetallen. Auf die Anwendung der Kohlelektrode neben einer Metallelektrode beim Schweißen mit Drehstrom wurde bereits hingewiesen.

b) Metallelektroden.

Allgemeines. Dem auf dem Gebiete der Elektrodenfrage weniger Bewanderten wird eine Auswahl aus der Unzahl der auf dem Markt befindlichen, beliebig bezeichneten Elektroden immer schwer fallen, da nur die wichtigsten Sorten genormt sind. Außerdem glauben manche Elektrodenfirmen die Verarbeitung ihrer Schweißstäbe als ein besonderes „Verfahren“ hinstellen zu müssen, was einerseits fast ausnahmslos unberechtigt ist, da durch die Art der Elektrode als solche keine Änderung des Lichtbogenschweißverfahrens begründet ist, und andererseits den Verbraucher noch mehr verwirrt. Aus diesem Grunde erscheint es notwendig, vorerst eine nach sachlichen Gesichtspunkten aufgestellte Einteilung zu bringen, die sich auf die äußere Beschaffenheit der Elektroden bezieht.

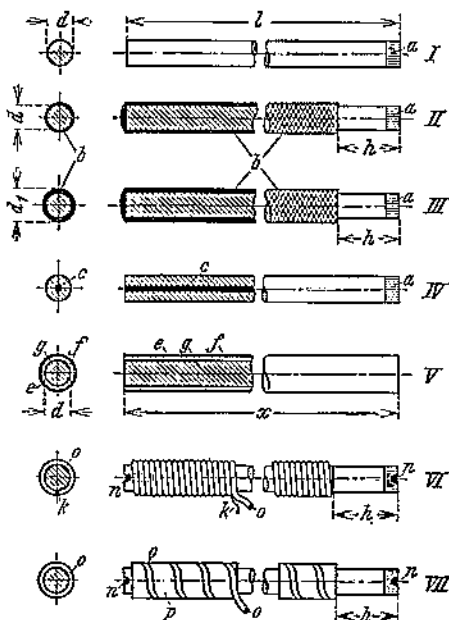


Abb. 149. Bildliche Darstellung der verschiedenen Elektrodenarten (Metallelektroden).

Einteilung. Grundsätzlich unterscheidet man zwei Hauptgruppen:

- A. nackte Elektroden (Abb. 149 I, IV und V),
- B. umhüllte Elektroden (Abb. 149 II, III, VI und VII).

Die nackten Elektroden (Gruppe A) werden unterteilt in:

1. gegossene Stäbe für Gußeisen, unter Umständen auch für Metallguß,
2. gewalzte Drähte für harte Werkstoffe,

3. gezogene Drähte:

- a) Drähte, die entweder „blank“ bleiben oder schwarz oder braun „geglüht“ werden,
- b) oberflächenbehandelte Drähte, verkupferte, vernickelte usw.,
- c) Seelendrähte mit nichtmetallischem Kern (IV),
- d) Seelendrähte mit metallischem Kern (V).

4. Röhrenelektroden, Blechröhrchen mit Legierungsfüllung, z. B. Stellit.

Die umhüllten (ummantelten) Elektroden (Gruppe B) werden unterteilt in:

1. getauchte oder umpreßte Elektroden:

- a) einmal getaucht, mit dünner Umhüllung (II),
- b) mehrmals getaucht, mit dicker Umhüllung oder umpreßt (III), bisweilen auch Schmelzmantel- oder Preßmantel-Elektroden genannt,

2. umwickelte Elektroden:

- a) asbestumwickelte (VI und VII),
- b) papierumwickelte (ähnlich V).

Einige Bezeichnungen bedürfen noch erläuternder Angaben. In Abb. 149 IV ist ein Seelendraht mit nichtmetallischem Kern skizziert, der nicht etwa ein mit Schweißpulver gefülltes Röhrchen darstellt, sondern dessen Kern *c* beim Auswalzen des Stahlblocks bereits vorhanden ist. Der Kern soll die Drahtlegierung beeinflussen und teilweise die Umhüllung ersetzen. Der bei V skizzierte Seelendraht mit metallischem Kern unterscheidet sich von IV dadurch, daß der eigentliche Draht *g* von einem Blechmantel *e* umschlossen und der Zwischenraum *f* mit einem Schweißmittel ausgefüllt ist. Dieser in Deutschland weniger eingeführte Draht dient ausschließlich der selbsttätigen Schweißung. Der Blechmantel *e* hat die Aufgabe, die Umhüllung *f* beim Einrollen des endlosen Drahtes und beim Ablaufen zwischen den Kontakt- und Vorschubrollen des Schweißkopfes gegen Beschädigung zu schützen. Auch der Draht IV eignet sich wie jeder nackte Draht zur Verarbeitung in selbsttätigen Schweißeinrichtungen. Hartmetalle, die sich nur sehr schwer gießen und gar nicht ziehen lassen, werden in granulierter Form, mit Schweißpulver gemischt, in dünnen Blechröhrchen geliefert (etwa wie bei V); Röhrenelektroden.

Bei den umwickelten Elektroden kann die Schnur aus blauem oder weißem Asbest in engen (VI) oder in weiten (VII) Windungen gelegt werden, wobei im letzten Falle zwischen den Asbestwindungen *o* eine Schweißpaste *p* eingebracht wird. Diese Elektroden werden nach ihrer ursprünglichen Herkunft als Alloywelding- (A.W.P.-) Elektroden bezeichnet und heute unter dem Namen Murexelektroden in den Handel gebracht. Bei der enggewickelten Elektrode VI legt die Quasi Arc Comp. einen 0,2 mm dicken Aluminiumdraht *k* unter die Wicklung, deren Enden, wie in den meisten anderen ähnlichen Fällen, in kleinen an den Stabköpfen angebrachten Nuten befestigt sind (Hersteller Deutsche Asbestwerke). Getauchte und umwickelte Elektroden (II, III, VI und VII) sind am Einspannende (für die Zange) auf die Strecke *h* (etwa 25 mm) ohne Überzug hergestellt, um an der Einspannstelle einen guten elektrischen Kontakt zu erzielen. Die papierumwickelten Elektroden sind der Skizze V ähnlich mit dem Unterschiede, daß die Blechmanschette *e* durch einen besonders behandelten, spiralförmig um die Pastenmasse gewickelten Papierstreifen ersetzt ist. Allerdings ist dann die Dicke der Tauchmasse *f* meist größer als bei V.

Unterscheidet man nur nach dem Verwendungszweck der Elektroden, so hat man zu unterteilen zwischen Elektroden

1. für Verbindungsschweißungen,
2. für Auftragsschweißungen,
3. zum Schneiden.

Eine weitere gegliederte Unterteilung der Gruppen 1 und 2 erfolgt nach der Art des Metalls und nach den von der Schweißung verlangten Gütewerten, die von der Legierung der Elektroden, gegebenenfalls im Zusammenwirken mit geeignet zusammengesetzten Umhüllungen abhängen.

Elektrodenauswahl. Von der Wahl der richtigen Elektrodenart ist das Ergebnis der Schweißung in hohem Maße abhängig. Sie muß den Eigenschaften des Werkstückes und den an dieses gestellten betrieblichen Anforderungen angepaßt sein. Daraus ergibt sich von selbst die Folgerung, daß es eine Universalelektrode nicht geben kann, wenn auch einige Marken für verschiedene Stahlsorten bedingungsgemäß anerkannt werden. Was die technologischen Gütewerte anbelangt, sind für die gebräuchlichsten Stahlsorten Mindestforderungen nach DIN Vornorm 1913 festgelegt, worauf unter „Normung“ eingegangen wird. Entsprechend der Einteilung nach der äußeren Beschaffenheit der Elektroden kann bezüglich der technologischen Eigenschaften der Schweißung folgendes allgemein Gültige vorweggenommen werden:

Die nur mit Gleichstrom verschweißbare nackte Elektrode gewährleistet bei Stählen bis zu etwa 60 kg/mm² zwar völlig ausreichende Festigkeiten, weist aber eine ausgesprochene Sprödigkeit auf, so daß die Verformbarkeit der Schweißung sehr gering ist. Ihr gegenüber steht die mit jeder Stromart verschweißbare dickummantelte Elektrode, die, neben einer auch erhöhten Festigkeit, die höchst erreichbaren Zähigkeitswerte bei größter Dichte gewährleistet. Durch Normalglühen der Schweißung können außerdem die Gütewerte dieser Elektroden auf ihren Höchstwert gebracht werden, während die mit nackten Elektroden geschweißten Werkstücke nicht vergütbar sind.

Dünnumhüllte Elektroden unterscheiden sich von den nackten nicht durch gesteigerte Gütewerte, sondern nur dadurch, daß sie infolge ihrer ionisierenden Wirkung leichter und auch mit Wechselstrom verschweißbar sind. Erfahrungsgemäß sind solche Schweißungen vielfach mit Schlackeneinschlüssen durchsetzt.

Die auch mit Wechselstrom verschweißbare Seelenelektrode liefert eine Schweißverbindung, deren Eigenschaften zwischen den mit nackten und den mit dickummantelten Elektroden hergestellten liegen. Von ihrer guten Eignung für die Senkrecht-, Überkopf- und Automaten-schweißung wird gern Gebrauch gemacht.

Innerhalb der einzelnen Elektrodenarten bestehen allerdings z. T. nicht unerhebliche Schwankungen, die durch die Legierung des Kernwerkstoffes oder die mehr oder weniger gute Zusammensetzung der Umhüllungsmasse verursacht sind; ihre Entwicklung kann wohl noch nicht als abgeschlossen angesehen werden.

Normung: Die Lieferbedingungen für die meisten handelsüblichen Stahlelektroden sind in DIN Vornorm 1913 zusammengefaßt. Sie beziehen sich auf die Sorten und Gütewerte für die Stähle St 34, St 37/42, St 52; die Elektroden werden für Verbindungsschweißung mit E und der Festigkeitszahl bezeichnet, z. B. E 37/42. Wird neben einer bestimmten Festigkeit auch eine bestimmte, und zwar größere Zähigkeit verlangt, so tritt der Buchstabe Z hinzu. Diese Drähte sind naturgemäß auch für die Auftragsschweißung verwendbar, sofern die Kugeldruckhärte unter 150 Brinelleinheiten bleiben soll. Drähte für größere Härte werden mit dem Kurzzeichen Ea und den Werten für die mittlere Brinellhärte 150, 250, 350 und 500 versehen. Außerdem sind Kennfarben festgelegt.

Die genormten Drahtsorten müssen bei der geschweißten Probe (Abnahme) folgende Mindestwerte ergeben: Zugfestigkeit 34...52 kg/mm², entsprechend den

Markennennwerten, Biegewinkel an 10 mm-Blechen zwischen 180 und 50° und Kerbschlagzähigkeit bei den mit Z bezeichneten Drähten zwischen 8 und 5 mkg/cm². Schmiedbarkeit der Schweiße ist bei allen Drahtsorten gefordert.

Die Deutsche Reichsbahn¹, Heer und Marine haben in Anbetracht ihrer z. T. weitergehenden Ansprüche darüber hinaus Sonderbedingungen aufgestellt.

In nachstehenden Absätzen wird über die Forderungen bezüglich der äußeren Beschaffenheit der Drähte und ihres Verhaltens beim Schweißen Ergänzendes ausgeführt.

Abmessungen. Die üblichen Abmessungen für Elektroden, ob Stahl- oder Nichteisenmetallelektroden, ob nackt oder umhüllt, betragen 250, 350, 450 und 550 mm Länge bei 1,5 bis etwa 8 mm Dicke. Die Länge l der Elektroden wird zwischen beiden Kopfen, also einschließlich h (Abb. 149), gemessen. Die Dicke bezieht sich auf den reinen Drahtdurchmesser d ohne Berücksichtigung der Hüllendicke d_1 . Nach den Lieferbedingungen für Schweißdraht der Deutschen Reichsbahn sind Elektroden mit einer Umhüllendicke von bis zu 0,2 mm als umhüllte, darüber hinaus als Manteldrähte zu bezeichnen. Die 4 mm-Elektrode wird am meisten benutzt. Die für selbsttätige Schweißung bestimmten Drähte (auch I, IV und V) werden in Ringen von verschiedener Länge geliefert. Gußeisenstäbe, mit und ohne Überzug, haben Längen von 500...1000 mm bei 6...15 mm Durchmesser.

Kennzeichnung. Die Stäbe werden durch bestimmte Färbung des einen Kopfendes a (nicht länger als 5 mm) oder auch nur der Stirnfläche mit Ölfarbe gekennzeichnet. Bei den umhüllten und ummantelten Elektroden genügt meist schon die natürliche oder auch künstliche Färbung — die Farbe soll dann aber griffest sein — der Tauchmasse bzw. der Umwicklung, um die verschiedenen Sorten des gleichen Herstellers unterscheiden zu können. Da die Elektroden-Farbkennzeichen der einzelnen Firmen sehr verschieden sind, muß man sich bei den Erzeugnissen an die vom Lieferanten beigegebenen Anwendungstabellen halten, die außerdem die Art der Polarität, die Stromstärke usw. für die einzelnen Elektroden-sorten angeben.

Allgemeines über den Elektrodenwerkstoff. Die Stahlelektroden sollen möglichst frei sein von Rost, Schlacken, Oxyden und Lunkern, von Glasblasen, Öl und sonstigen Verunreinigungen; sie dürfen, wie der Fachmann sagt, sich nicht aufrollen und nur wenig spritzen. Im Lichtbogen müssen die Elektroden gleichmäßig abschmelzen und eine gewisse „Kletterfähigkeit“ besitzen, um bei Schweißungen an senkrechter Wand verwendet werden zu können.

Die chemische Zusammensetzung des Elektrodenwerkstoffs richtet sich nach dem Schweißverfahren und dem Verwendungszweck. Bindungen bestehen nur für bestimmte Drahtsorten (z. B. für St 52). Der Schwefel- und Phosphorgehalt darf bei allen Drähten nicht über 0,03 bzw. 0,04 vH betragen.

Stähle von höherer Festigkeit und die bei Auftragsschweißungen oft verlangte hohe Verschleißfestigkeit bedingen besondere Legierungen. Elektroden für verschleißfeste Auftragsschweißung erhalten z. B. Zusätze von Mangan bis zu 14 vH (Schienenauftragsschweißung) oder Zusätze von Wolfram, Uran, auch Titan usw. Letztes scheint sich insofern günstig auszuwirken, als sich beim Schweißen Titansäure (TiO₂) bildet, womit eine Desoxydation des Schmelzbades verbunden ist und eine blasenfreie Schweiße entsteht. Durch die große Ver-

¹ Deutsche Reichsbahn: Vorläufige technische Lieferbedingungen für Schweißdraht für Verbindungs- und Auftragsschweißung an genormten Stahlsorten nach dem Gas- und Lichtbogenschmelzschweißverfahren mit Anhang für Brückenschweißdrähte.

wandtschaft des Titans zu Stickstoff bilden sich Nitride (Ti_3N , TiN), die eine Härtung der Auftragsschweiße im Gefolge haben.

Eine andere Sondergruppe umfaßt Elektroden für die Schweißung von nicht-rostenden Stählen (z. B. Nirosta, VA- und VM-Stähle, Remanit, Ferroplatin, Sas) und hochhitzebeständigen Stählen (z. B. Nichrotherm, Ferrotherm, Nialit, Thermax), die teilweise recht schwierig schweißbar und meist auf der Chrom- oder Chrom-Nickel-Basis legiert sind. Solche Stäbe enthalten zwischen 0,08 bis 0,22 vH Kohlenstoff; 10...27 vH Chrom und 7...20 vH Nickel. Häufig werden diesen Stäben die Stoffe in höheren prozentualen Anteilen beilegiert, die unter dem Einflusse des Lichtbogens leicht herausbrennen. Die Schwierigkeit bei der Schweißung dieser Stähle ist auf die Gegenwart von Stoffen zurückzuführen, die schwer schmelzbare Oxyde bilden (Silizium, Chrom, Wolfram, Aluminium usw.). Um diese Oxydation möglichst zu unterbinden, werden legierte Elektroden meist mit Umhüllungen versehen, die in einem der nächsten Abschnitte behandelt werden.

Einfluß des Kohlenstoffs. Mit der Zunahme an Kohlenstoff nimmt die gute Verschweißbarkeit der Elektrode ab. Starkes Sprühen und Spritzen des Drahtes während des Schmelzens ist meist auf hohen Kohlenstoffgehalt zurückzuführen, wobei allerdings nicht selten Gaseinschlüsse im Drahte mitwirken. Jedenfalls gibt kohlenstoffreicher Draht leicht zu Blasenbildung Anlaß, weil sich der Kohlenstoff mit dem Luftsauerstoff zu Kohlenoxyd oder Kohlendioxyd verbindet und diese gasförmigen Stoffe in der Schweiße eingeschlossen bleiben können. Deshalb wurde früher Holzkohlenschweißdraht vorgeschlagen, ohne dabei zu berücksichtigen, daß es sich, wenn nicht schwedisches Holzkohleneisen genommen wurde, hierbei um einen in Holzkohle nur geglühten Draht durchschnittlicher Güte handelte. Ob der Draht geglüht ist oder nicht, ist für die chemische Zusammensetzung und die Struktur der Schweiße im allgemeinen belanglos, wenn die Legierung des Drahtes dieselbe bleibt. Immerhin zeigt sich in der Praxis, daß geglühte Drähte beim Abschmelzen meist weniger spritzen, weshalb man diese bevorzugt. Diese niedriggekohlten Drahtsorten ergeben, da die mechanische Festigkeit wesentlich von der Höhe des Kohlenstoffgehaltes abhängt, Schweißen von niederer bis mittlerer Festigkeit. Zur Erzielung höherer Festigkeit der Schweiße ist ein kohlenstoffreicherer Draht nötig, und man muß die schwierigere Verschweißbarkeit, die durch geeignete Umhüllungen des Drahtes zum Teil behoben werden kann, mit in Kauf nehmen.

Einfluß des Mangans. Mit steigendem Mangangehalt wird eine Verringerung der Aufnahme von Sauerstoff und Stickstoff in der Schweiße festgestellt. Außerdem verhindert die Bildung von Mangandämpfen das zu starke Verbrennen von Kohlenstoff und Silizium. Ferner verleiht Mangan der geglühten Schweiße höhere Dehnung und hebt die schädliche Wirkung des Siliziums auf, so daß bei Anwesenheit von 0,5 vH Mangan noch bis zu 0,15 vH Silizium zulässig sind.

Gußeisenelektroden. Als gute Zusammensetzung, die nur für die Gußeisenwärmeschweißung gebraucht wird, gilt: 3...3,5 vH Kohlenstoff, 3...3,5 vH Silizium, 0,5...0,7 vH Mangan, bis 0,8 vH Phosphor, bis 0,06 vH Schwefel, also ein siliziumreicher Werkstoff, da Silizium die Ausscheidung von Graphit fördert und damit die Schweiße weich erhält. Bei dem hohen Anteil an Silizium ist berücksichtigt, daß ein Teil beim Schweißen verbrennt.

Nichteisenmetall-Elektroden. Hier sind hervorzuheben: Monelmetall, Nickel, Kupfer, Bronze, Aluminium und seine Legierungen. Monelmetall, mit 67 vH Nickel, 28 vH Kupfer und 5 vH Mangan und Eisen, wird als natürliche und künstliche Legierung sowohl für die Schweißung von Monelmetall selbst als für die Gußeisenkaltschweißung verwandt, wenn diese im Gegensatz zur Verwendung

von Stahlelektroden bearbeitbar bleiben soll. Kupfer-Elektroden enthalten neben 1,2...1,8 vH Mangan 2,5 vH Silizium. Des weiteren hat sich der für die Gasschweißung gut eingeführte Canzler-Kupferdraht, eine Legierung mit Phosphor (bis zu 0,5 vH) und etwa 1,5 vH Silber, auch für elektrische Schweißung als brauchbar erwiesen. Neuerdings ist die Lesselsche Schlauchelektrode stark in Aufnahme gekommen. Bei der Vielfältigkeit der Bronzelegierungen können Analysenangaben nur schwer gemacht werden, um so weniger, als die Lichtbogenschweißung von Bronze selten ausgeübt wird. Dagegen wurden die Leichtmetallelektroden im Laufe der letzten Jahre erfolgreich weiter entwickelt. Während die meisten Nichteisenmetallelektroden, vor allem auch die Leichtmetalldrähte, eine oft recht dicke Umhüllung erfordern, kann man bei einigen Bronzen infolge geeigneter Legierung darauf verzichten.

Elektrodenumhüllungen. Die an die Umhüllung gestellten Anforderungen sind sowohl physikalischer als chemischer Natur und außerordentlich vielseitig. Die Erfahrung hat gelehrt, daß theoretische Überlegungen für die Herstellung von Umhüllungsmassen allein nicht ausreichen, vielmehr langwieriges praktisches Ausprobieren unumgänglich ist, weshalb die Zusammensetzungen der Massen von fast allen Erzeugern als Herstellungsgeheimnis betrachtet werden. Richtanalysen anzugeben ist um so weniger möglich, als sie sich mit dem jeweiligen Verwendungszweck und der Zusammensetzung des metallischen Kernwerkstoffs in weiten Grenzen ändern. Erfahrungsgemäß ist von einem „Selbsttauchen“ schon aus diesem Grunde abzuraten. Die Nachahmung bewährter Massen ist übrigens insofern nicht leicht, als chemische Analysen zwar die Metalloxyde und Säurereste, nicht aber die eigentlichen Ausgangsstoffe erfassen, es sei denn, daß es sich um Massen ganz einfacher Zusammensetzung handelt.

Um einen Überblick über die verschiedenen Wirkungen der zahlreichen Umhüllungsstoffe, deren man sich heute bedient, zu ermöglichen, erscheint es zweckmäßig, diese in 5 Gruppen zu unterteilen, und zwar in: 1. Ionisierende Stoffe, 2. Schutzgasbildner, 3. Schlackenbildner, 4. Auflegierungsstoffe und 5. Bindemittel.

Ionisierende Stoffe. Die beim Zünden des Lichtbogens schnell einsetzende Verdampfung einiger in der Umhüllung enthaltenen Stoffe (Ionisierungsbestandteile) erleichtert dem Schweißer zunächst das Zünden und im weiteren Fortgang durch gesteigerte Leitfähigkeit der Lichtbogenstrecke auch das „Halten“ des Bogens, nicht nur in waagerechter, sondern auch in senkrechter und Überkopflage. Daher sind besonders Anfängern und noch ungeübten Schweißern umhüllte Elektroden willkommen; bei Wechselstrom sind sie auch für den Geübten unerlässlich. Außerdem soll die Umhüllung ein ruhiges Brennen des Lichtbogens und einen leichten und gleichmäßigen Fluß des Elektrodenwerkstoffs bewirken, hauptsächlich dann, wenn er als nackte Elektrode zu stark spritzt, ungleichmäßig abschmilzt und ungenügend einbrennt, was bei höher gekohlten Stäben infolge niederen Schmelzpunkts eintreten kann. Als ionisierende Stoffe werden Verbindungen der Alkalimetalle und Erdalkalien angesehen, z. B. Kalium-, Natrium-, Lithium- und Kalziumverbindungen.

Schutzgasbildner. Zum Schutze des im Lichtbogen überwandernden Elektrodenwerkstoffs erfolgt die Abwehr der eindringenden Luft durch einen Gas- oder Dampfmantel, der sich einerseits durch mechanischen Abschluß, andererseits durch Bindung von Sauerstoff und Stickstoff auswirkt. Solche Schutzgasbildner sind beispielsweise: Graphit, Holzkohlenpulver, Papierfaser und sonstige Zellulosestoffe; Kohlehydrate, Amylacetat, Eisen- und Mangankarbone, Metallhydride, Metallkarbide, Carbonate.

Schlackenbildner. Der Schmelzpunkt soll weder zu niedrig liegen, da sonst das Elektrodenende vorzeitig freigelegt wird, noch zu hoch, weil sich sonst ein so tiefer Krater bildet, daß eine sachgemäße Schweißung nicht mehr möglich ist. Er muß so abgestimmt sein, daß die im Lichtbogen umgeschmolzenen Stoffe den Schweißvorgang nicht stören. Die aus der Umhüllung entstehende Schlacke muß spezifisch leicht sein, damit sie immer rasch aus dem Schweißbad an die Oberfläche steigen kann. Sie soll sich zusammenhängend über die Schweiße ausbreiten, ohne sich aufzublähen oder aufzurollen, da ihr ja die wichtige Aufgabe zukommt, den niedergeschmolzenen Werkstoff gegen den Zutritt von Sauerstoff und Stickstoff aus der Luft zu schützen. Dies geschieht einerseits durch eine mechanische Abdeckung des Schmelzbades, anderseits durch Auflösen der ausgeschiedenen Oxyde und Nitride, was die Gegenwart größerer Schlackenmengen, demnach die Verwendung dickummantelter Elektroden bedingt. Durch eine dicke Schlackendecke tritt gleichzeitig eine Verzögerung der Erstarrung und damit ein glatter Fluß sowie ein besseres Ausgasen der Schweiße ein. Die Bildung harter Gefügeanteile wird erschwert. Als Schlackenbildner dienen sowohl chemische Verbindungen, wie Karbonate, Borate, Fluoride, Silikate, Azetate und Nitrate der Alkalimetalle und Erden, als auch Mineralien natürlichen Vorkommens, wie Feldspat, Sand, Schiefermehl, Kalkstein, Dolomit, Magnesit, Flußspat, Tone, Mangan- und Titanerze sowie natürliche Silikatverbindungen, unter denen blauer und weißer Asbest hervorzuheben ist, der meist, zu Schnur gesponnen, zur Umwicklung der Elektroden dient, seltener faserförmig den Umhüllungsmassen zugegeben wird.

Legierungsstoffe. Diese Stoffe sind in zweierlei Richtung wirksam; sie gehen entweder mehr oder weniger in die Schweiße als Legierungsbestandteile über oder sie werden als desoxydierende und denitrierende Stoffe verbraucht. Zur Reduktion vorhandener Eisenoxyde verwendet man hauptsächlich Ferrolegierungen des Mangans, Siliziums, Aluminiums, Titans und Vanadins, da deren in der Schweiße verbleibenden Restoxyde weniger schädlich sind. Auch der Gasgehalt einer Schweiße an Sauerstoff und Stickstoff beeinflusst die statischen und dynamischen Eigenschaften so stark, daß er möglichst entfernt werden muß. Zur Behebung der Gasblasenbildung (Beruhigung des Schmelzflusses) eignen sich außer Kohlenstoff nur Mangan, Silizium, Aluminium, Titan und Nickel. Am wirksamsten sind Ferro- oder Ferrotitan-Aluminium. Wesentlich schwächer wirken Ferrosilizium, Silicospiegel und Karborundum, am geringsten Siliziummangan, Ferromangan und Mangansuperoxyd. Nach amerikanischen Untersuchungen soll Silizium die Stickstoffaufnahme mehr als Mangan, Kupfer und Nickel vermindern, und Chrom soll sie vergrößern.

In welchem Umfang und mit welcher Gleichmäßigkeit eine Auflegierung eintritt, ist von den verschiedensten Faktoren abhängig. Während nur verhältnismäßig geringe Anteile der für die Reduktionswirkung in Betracht kommenden, bereits angeführten Ferrolegierungen in die Schweiße übergehen, sind Nickel- und Ferrochrompulver leichter einzulegieren. So begrüßenswert es wäre, auf einem so einfachen Wege alle gewünschten Legierungen zu erreichen und die Güte der Schweiße mehr durch Umhüllungsstoffe als durch einen metallurgisch gut ausgewählten Kernwerkstoff zu bestimmen, so dürfen doch die Erwartungen in dieser Hinsicht nicht zu weit gehen. Im übrigen wird im Abschnitt „Die Technik der Lichtbogenschweißung“ auf diese Vorgänge noch näher eingegangen. Dagegen sind jedenfalls einer günstigen Vereinigung der geschilderten physikalischen und chemischen Wirkungen von hochwertigen Umhüllungen mit einem metallurgisch richtig gewählten Elektrodenkernwerkstoff hohe Gütewerte der Schweiße zu ver-

danken, die auch weitgesteckten Anforderungen genügen. Während bei sachgemäßer Schweißung auch nackte Elektroden eine hinreichende Festigkeit der Schweißverbindung ergeben, konnten die Ansprüche an Zähigkeit und Dehnung der Schweiße erst nach mühsamer Entwicklungsarbeit an Umhüllungen befriedigt werden. Es muß hier klar ausgesprochen werden, daß diese Erfolge keineswegs die übertriebenen Forderungen rechtfertigen, die Güte des Grundwerkstoffs durch die der Schweiße zu übertreffen. Niemandem würde es ja auch jemals einfallen, von anderen metallischen Verbindungen ähnliches zu verlangen.

Bindemittel. Die Umhüllung muß haltbar sein, also nicht hygroskopisch (Feuchtigkeit anziehend), darf auch bei geringer Biegung des Schweißstabs und bei dessen Verschmelzung nicht abplatzen oder bröcklig werden. Zur Bindung des Stoffgemisches unter sich und auf dem Draht benutzt man organische Klebmittel, wie Dextrin, Schellack, Phenolharze und anorganische Stoffe, wie Wasserglas.

C. Die Technik der Lichtbogenschweißung.

1. Einwirkung des Lichtbogens auf die Schweiße.

a) Kohlelichtbogen.

Kohlenstoffaufnahme der Schweiße. Während der Kohlelichtbogen längere Zeit nur eine untergeordnete Rolle spielte, kommt er neuerdings wieder stärker in Aufnahme, und zwar hauptsächlich bei der selbsttätigen Schweißung. Nach neueren Erkenntnissen scheint die Gefahr der Kohlenstoffaufnahme der Schweiße aus dem Kohlebogen nicht so groß zu sein, als ursprünglich angenommen wurde, wenn die Elektrode an den Minuspol angeschlossen wird. Versuche haben gezeigt, daß mit dem $+$ -Pol ausgeführte Schweißen eine ganz erhebliche Kohlenstoffaufnahme bis zu 2,5 vH, vereinzelt auch bis 3 vH, zeigten, während die Kohlung des mit dem $-$ -Pol geschweißten Stahls nur bis zu etwa 0,6 vH betrug. Im übrigen ist einwandfrei festgestellt, daß alle mit Wechselstrom ausgeführten Kohleschweißungen durch größere Kohlenstoffaufnahme spröde werden, da durch den ständigen Wechsel der Polarität die Vorteile der Minusschweißung fortfallen.

Ein hinreichend wirksames Mittel gegen zu hohe Anreicherung des Kohlenstoffs in der Schweiße ist außerdem die Verlängerung der Gassäulenstrecke des Lichtbogens. Die chemische Vereinigung des Luftsauerstoffs mit dem von der Elektrode ausgestoßenen Kohledampf erfolgt im Mantel des Lichtbogens unter Bildung der bereits bekannten Aureole. Deshalb soll der Kohlelichtbogen lang gehalten werden, um dem Sauerstoff Gelegenheit zu geben, auf einer längeren Strecke sich mit dem Kohledampf zu Kohlenoxyd bzw. Kohlensäure zu verbinden. Allerdings darf auch hier ein von der Stromdichte abhängiges Höchstmaß nicht überschritten werden, wenn ein Verbrennen des Stahls verhütet werden soll. Der längere Lichtbogen ist der Blaswirkung stärker ausgesetzt, so daß, wie unter Schweißautomaten erwähnt, auch bei Handbetrieb der Elektrodenhalter meist mit einer magnetischen Richtspule (Blasspule) ausgerüstet sein muß. Hinsichtlich der praktisch angewandten Stromstärken und Schweißspannungen sei auf Tabelle 11 (Abschnitt III A 3) verwiesen.

b) Metalllichtbogen.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich, soweit keine besonderen Angaben gemacht werden, vorerst auf den Eisenlichtbogen ganz allgemein ohne Unterschied der Stromart.

Schmelzvorgang. Sobald der Lichtbogen hergestellt ist, beginnt ein rasches örtliches Erhitzen des Werkstücks und ein Erweichen des Elektrodenendes. Der Werkstoffübergang im Lichtbogen ist bereits im Abschnitt III A 2 besprochen worden. In der Hauptsache bilden sich faden- und pilzförmige Tropfen. Gleichzeitig dehnen sich die das Eisen begleitenden Gase in diesen flüssigen Tropfen bei der hohen Temperatur rasch aus und schleudern, unterstützt durch die Schwerkraft des Metalltropfens, die von Gasen durchsetzten flüssigen Werkstoffteilchen geschloßartig gegen das nach kurzer Zeit örtlich fließende Schweißgut. Diese Wirkung wird verstärkt durch alle diejenigen in der Elektrode vorhandenen Legierungsbestandteile, die in den flüssigen und gasförmigen Zustand übergehen, vor allem durch den Kohlenstoff. Das zum Werkstück übergehende Eisen zusammenzuhalten und vor dem Einflusse der atmosphärischen Luft zu schützen, ist eine der Aufgaben der Elektrodenumhüllung. Das gilt auch für die in mehr oder weniger großer Anzahl am Umfang übergehenden kleinen Metallkügelchen. Die Zeitdehnerfilmaufnahmen bestätigen die Ansicht, daß der weitaus größere Teil des Werkstoffs in flüssiger Form übergeht, aber nur sehr geringe Mengen der vergasten Werkstoffteile auf der Gegenseite wieder feste Form annehmen.

Polanschluß bei Gleichstrom. Da das an Masse immer größere Werkstück die zugeleitete Wärme in höherem Maße ableitet als die viel kleinere Elektrode, legt man auch aus diesem Grunde bei Gleichstrom den um 600° heißeren Pluspol (positiven Pol) an das Werkstück. Abweichend von dieser sonst allgemein gültigen Regel erfordern hoch gekohlte und sonderlegierte, auch stark umhüllte Elektroden oftmals das Verschweißen am Pluspol, wogegen dünne, leicht überhitzbare Bleche (unter 3 mm) an den negativen Pol anzuschließen sind. Beim Wechselstrom ist diese vorteilhafte Verteilung infolge des schnellen Polwechsels und des Fortfalls des Temperaturunterschiedes nicht möglich.

Zündung. Nachdem die Schweißmaschine entsprechend der Betriebsanweisung auf die erforderliche Leerlaufspannung bzw. Kurzschlußstromstärke eingestellt worden ist, wird das Zünden des Lichtbogens durch Tupfen oder Streichen herbeigeführt. Das Zünden durch „Tupfen“, das bei Gleichstrom am üblichsten ist, beruht darauf, die Elektrode einen kurzen Augenblick senkrecht gegen das Werkstück zu stoßen und sofort wieder um einige Millimeter zurückzuziehen, wobei sich der Lichtbogen bildet. Als Faustregel gilt: Lichtbogenlänge $\leq$ Elektrodendurchmesser. Beim Bogenzünden durch das mitunter bei Wechselstrom angewandte „Streichen“ wird die Elektrode rasch auf einen kurzen Weg über das Werkstück gestreift, ähnlich so, wie man ein Zündholz an einer Reibfläche entzündet. Bei zu langer Dauer der Berührung kann die Elektrode an das Werkstück angeschweißt werden, was vom Schweißer mit „Festkleben“ bezeichnet wird. In diesem Falle kann die Elektrode nicht durch Hochziehen, sondern nur durch seitliches, ruckweises Hin- und Herbewegen des Halters wieder gelöst werden. Ist ein Lösen auf diese Weise nicht möglich, so muß der Elektrodenhalter abgezogen und ein Hammer oder eine Zange zu Hilfe genommen werden. Erhält man bei wiederholtem Antupfen keinen Lichtbogen, so können folgende Ursachen vorliegen: Schlechte Kontakte im Schweißstromkreis, hauptsächlich an den Anschlußklemmen und am Elektrodenhalter oder zwischen Werkstück und Schweißbisch; ferner nicht ausreichende Zündspannung oder die Elektroden spitze ist nicht von der Tauchmasse befreit. Ist bei häufigen Zündversuchen das Elektrodenende auf eine größere Strecke glühend geworden, so wird dadurch die Zündung erschwert. Abhilfe: Elektrode erkalten lassen, in Wasser abkühlen (wenn nicht umhüllt) oder auswechseln.

Haltung der Elektrode. Der Winkel, unter dem die Elektrode zum Werkstück gehalten wird (fernerhin kurz Anstellwinkel genannt), schwankt mit der Art der Elektrode, mit der Lage und Art der Schweißnaht, und ist außerdem von der Blaswirkung (Ablenkung des Lichtbogens), auf die noch eingegangen wird, abhängig. Während die Elektrode zum Werkstück tatsächlich nur in einem Winkel gehalten werden kann, ist ihre Stellung zur Schweißnaht durch zwei Winkel bestimmt. Wir unterscheiden zwischen einem Winkel α (Abb. 150), um den die Elektrode in Richtung der Naht von der Senkrechten abweicht, und einem Winkel β (Abb. 151), der die Neigung der Elektrode gegenüber der Senkrechten, und zwar quer zur Schweißrichtung, angibt. Den einfachsten Fall, das Auftragen einer Raupe auf eine waagerechte Ebene, zeigt die Abb. 150. Der Anstellwinkel α beträgt bei nackten und leichtumhüllten Elektroden normal 15° ; bei dickumhüllten Elektroden erheblich mehr, je nach Sorte zwischen 30° und 60° , was auszuprobieren ist (Abweichungen s. Abschnitt Blaswirkung). Die Schweißrichtung ist durch einen Pfeil gekennzeichnet. Dieser Winkel α bleibt bis auf einige Ausnahmen für alle Stellungen, für Waagrecht-, Senkrecht- und Überkopfschweißung der gleiche. Das gilt nicht für den Winkel β , der sich für die verschiedenen Stellungen ändert. Aus Abb. 150 b geht hervor, daß der Winkel β bei einer Raupe 0° ist, während nach Abb. 151 bei mehreren Raupenlagen nebeneinander die Elektrode so weit geneigt werden muß, daß der theoretische Winkel α , den man sich zwischen Blechoberfläche und Raupenflanke denken kann, etwa halbiert wird, um an dessen Scheitel bei a einen guten Einbrand zu erzielen. Demnach wächst der Winkel β mit der Höhe der vorgelegten Raupe, wie aus Skizze II der Abb. 151 zu sehen ist.

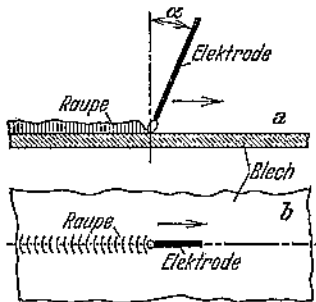


Abb. 150. Elektrodenhaltung in Schweißrichtung.

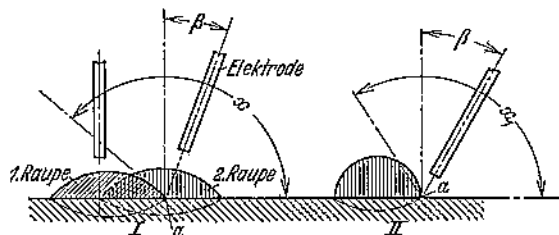


Abb. 151. Elektrodenhaltung quer zur Schweißrichtung.

Beim Schweißen von V- oder X-Nähten in der Waagerechten wird die Elektrode im Sinne der Abb. 152 Ia gehalten, mithin genau so wie beim Auftragen einer Raupe, nur kommt hinzu, daß, je nach der Breite der eingeschmolzenen Lage, seitliche Pendelbewegungen quer zur Nahtichtung auszuführen sind. Die Stellung b der Elektrode ist falsch, da hierbei nur ein einseitiges Einbrennen eintritt. Beim Schweißen überlappter Nähte, Skizze II, wie überhaupt beim Schweißen von Kehlnähten, also auch beim T-Stoß III, wird die Elektrode in Richtung der Winkelhalbierenden gehalten, damit in beiden Schenkeln ein gleichmäßiger Einbrand erreicht wird. Die Haltung der Elektrode beim Senkrechtschweißen ist aus Skizze IV zu ersehen; sie richtet sich nach der Schweißrichtung, mit der sie wechselt, und danach, ob es sich um ein Auftragen oder um eine Verbindungsschweißung handelt. Wird von unten nach oben geschweißt (d), so wird $\alpha = 0$ und $\beta = 0$, mit anderen Worten: die Elektrode steht zum Blech allseitig rechtwinklig. Zieht man eine Raupe von oben nach unten, wie bei IV b skizziert, dann ist der übliche Anstellwinkel $\alpha = 15^\circ$. Das eben Gesagte gilt auch

für senkrechte Verbindungsschweißungen an dünneren Blechen. Dicke Bleche machen dann eine Ausnahme, IV c, wenn die Schweißfuge in einer oder mit der zweiten Lage völlig ausgefüllt werden soll. Der Winkel α beträgt etwa 30° und die Elektrodenspitze wird in der mit dem Pfeil a (Skizze V, Draufsicht) gekennzeichneten Richtung bewegt, wobei sie zu den Fugenrändern jeweils etwa rechtwinklig stehen soll, wie dies durch kleinere Pfeile angedeutet ist. Die Haltung der Elektrode bei waagerechtem Schweißen an stehender Wand geht aus Skizze VI hervor. Bei a beträgt der Anstellwinkel $\alpha = 15^\circ$, ebenso der Winkel β , der in der Seitenansicht b erkennbar ist. Schließlich ist noch die Überkopfschweißung zu erwähnen, für die sinngemäß die Abb. 150, 151 und 152 I–III um 180° verdreht gelten.

Die über Anstellwinkel gemachten Ausführungen sind nur als Richtlinien aufzufassen. Dem Schweißer muß eine gewisse Freiheit gelassen werden, da der Grad

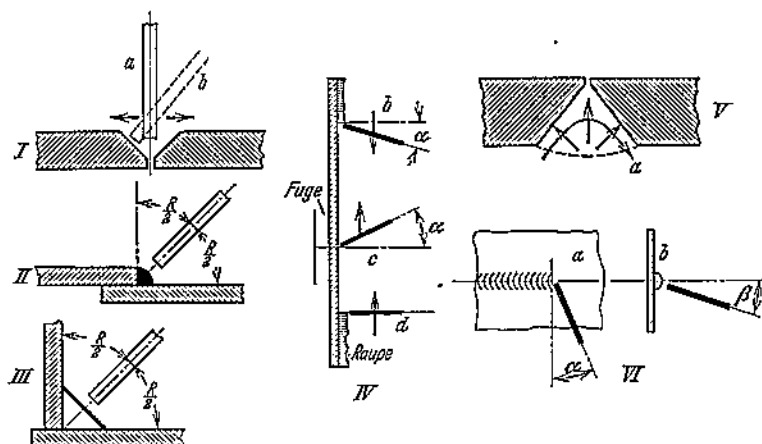


Abb. 152. Elektrodenhaltung beim Schweißen in verschiedenen Stellungen.

der Verflüssigung des Elektrodenwerkstoffs, die Beeinflussung des Lichtbogens durch magnetische Blaswirkungen sowie die Handfertigkeit des Schweißers mehr oder weniger große Abweichungen bedingen können.

Blaswirkungen. Zuweilen nimmt der Lichtbogen, der als beweglicher Leiter aufzufassen ist, zwischen Elektrode und Werkstück nicht den kürzesten Weg, sondern wird unter mehr oder weniger heftigem Flattern seitlich abgelenkt, eine Erscheinung, die die Schweißung merklich stört, mitunter fast unmöglich macht und auf magnetische Blaswirkungen zurückzuführen ist, die übrigens auch die Ursache schlechten Zündens glühender Elektroden sein dürften. Untersuchungen über die Entstehung und den Verlauf dieser Erscheinung sind bisher nur vereinzelt angestellt worden, und es bestehen nur gewisse Vorstellungen. Bekanntlich sind alle stromdurchflossenen Leiter von magnetischen Feldern umgeben, so auch die Schweißkabel, die Elektrode und das Werkstück. In unmittelbarer Nähe der Anschlußklemme wird der Bogen von dieser weg abgelenkt. Für die Größe der Blaswirkung sind Form und Masse des für die magnetische Leitfähigkeit maßgebenden Werkstücks sowie die Verdichtung der magnetischen Kraftlinien vor dem Lichtbogen ausschlaggebend. Ähnliche Verhältnisse treten im Bereiche von Werkstückkanten auf, infolge elektrischer Aufladungen.

Zwei praktische Beispiele bringt Abb. 153. In der Skizze a ist die Ablenkung des Lichtbogens, verursacht durch Kantenaufladung, dargestellt. Während der

Lichtbogen bei der mittleren Stellung der Elektrode fast unbeeinflusst ist, wird er an beiden Blechkanten trotz richtigen Haltens der Elektrode zur Blechmitte hin abgelenkt. Die Blaswirkung kann verringert werden, wenn man den Anstell-

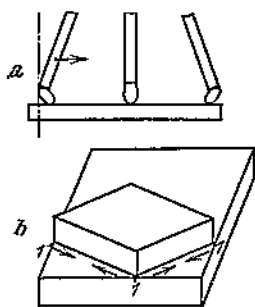


Abb. 153. Darstellung der magnetischen Blaswirkung.

winkel vergrößert und gegen Ende der Naht entgegen der üblichen Haltung die Elektrode in umgekehrter Richtung zur fertigen Raupe neigt. Besondere Schwierigkeiten verursacht die Schweißung der Kehlnähte zweier aufeinandergelegter dicker Bleche, wie dies bei *b* skizziert ist, wo bei den Punkten 1 vier Kanten zusammentreffen. Die Pfeile deuten die Schweißrichtung an, die jeweils von den Punkten 1 ausgeht.

In diesem Zusammenhange ist darauf hinzuweisen, daß die Blaswirkung beim Wechselstromlichtbogen wesentlich geringer ist als beim Gleichstromlichtbogen, da sich das magnetische Feld ständig und rasch umkehrt und sich deshalb nicht so stark auswirken kann. Dies ist ein wichtiger Grund dafür, weshalb man bei verwinkelten Konstruktionen mit vielen Überschneidungen und bei verhältnismäßig kurzen Nähten Wechselstrom bevorzugt. Außerdem wirkt auch eine dicke Umhüllung der Elektrode günstig. Bei nackten Elektroden ist die Blaswirkung am stärksten.

Wenn auch die stärkere Neigung der Elektrode meist schon zum Erfolge führt, können doch noch andere Maßnahmen getroffen werden, z. B. die Verlegung der Werkstück-Anschlußklemme an einen vom Lichtbogen entfernteren Punkt oder die Verwendung eines „Folge- oder Wanderpols“, der von Hand bewegt, mit fortschreitendem Lichtbogen seine Kontaktstelle ständig wechselt. Diese Maßnahme wird besonders in den Fällen erfolgreich sein, bei denen mehrere Schweißer an einem Werkstück oder an einer gemeinsamen Richtplatte arbeiten. Die Verwendung einer Magnetrichtspule (wie beim Kohlebogen) verbietet sich angesichts des raschen Abschmelzens des Metallstabes von selbst. Der Blaswirkung kann auch entgegengewirkt werden, wenn man die Elektrode an verschiedenen Stellen ansetzt und beispielsweise nach dem Pilgerschrittverfahren abschnittsweise schweißt.

Führung der Elektrode. Neben der Haltung ist auch die Führung der Elektrode für das Ergebnis der Schweißung von ausschlaggebender Bedeutung. In der Praxis haben sich die verschiedensten Führungsarten eingebürgert; sie richten sich nicht allein nach der Beschaffenheit der Elektrode, sondern auch nach der Lage der Schweißnaht, nach der Form der Vorbereitung und nicht zuletzt nach der Handfertigkeit des Schweißers. Gerade der zuletzt erwähnte Umstand verbietet es, dem Schweißer bindende Vorschriften zu machen, wie er die Elektrode zu führen hat, doch können die in Abb. 154 und 155 gegebenen Hinweise als die meist üblichen Führungsarten angesehen werden.

Die einfachste Art der Führung bei waagerechter Schweißung entspricht Abb. 154a, d. h. sie verläuft geradlinig und läßt eine schmale Schweißraupe entstehen. Auch die erste Lage in einer V- oder X-Fuge sowie in einer Hohlkehle wird in dieser Weise geschweißt. *b* zeigt die sog. Pilgerschrittführung, die von *a* insofern abweicht, als die Elektrodenspitze in Richtung der Naht zunächst um einen kurzen Schritt voran und dann um etwa den halben Schritt wieder zurückbewegt wird. Die Skizze *b* ist (die Bewegung geschieht nur in einer Ebene, in einer Linie) gewissermaßen als Seitenansicht zu betrachten, während alle anderen Führungslinien in Draufsicht zu lesen sind, wobei die strichpunktlierten Linien die Mitte der Raupe bzw. der Schweißfuge andeuten. Die häufigste Führungs-

form *c* entspricht einer quer zur Naht zickzackförmig pendelnden Bewegung. Sie kann sowohl bei Auftrags- als auch bei Verbindungsschweißungen angewandt werden. Die kreisende Bewegung der Skizze *d* ist für die erste Lage bei Verbindungsschweißungen, jedoch nicht bei Auftragschweißungen und Decklagen, anwendbar. Die Führung der Elektrode im Sinne von *e* verbürgt einen guten Einbrand an den Abschrägungen der Schweißfugen. Sie weicht von *c* insofern ab, als die Elektrode an den Rändern eine kurze Strecke entlang geführt und darauf bogenförmig zurückbewegt wird. Beim Auftragen breiter Raupen und bei der Herstellung breiter Lagen, vor allem bei Decklagen, kann auch die schleifenförmige Bewegung *f* gewählt werden.

Für Senkrechtschweißungen, die in der ersten Lage gern von oben nach unten ausgeführt werden, kommt die Führung *c*, sinngemäß um 90° gedreht, in Frage. Bei aufsteigender Schweißung (von unten nach oben) wird nach *g* vorgegangen, d. h. das Führungsbild *c* gilt mit umgekehrter Bewegungsrichtung. Wird die stehende Schweißung dickerer Bleche in einem Zuge aufsteigend ausgeführt, so wird nach *h* und nach Abb. 152 ∇ verfahren.

Waagerechte Schweißungen an stehender Wand sind schwieriger durchzuführen. Für Auftragschweißungen kann die Führungsform Abb. 154 *g*, für Verbindungsschweißungen die Führungsform *e* empfohlen werden. Um den aufgeschmolzenen Werkstoff gleichmäßig zu verteilen und ein Absacken nach unten zu verhüten, ist es ratsam, den Lichtbogen am oberen Rande der Raupe langsamer, am unteren Rande schneller zu führen, worunter allerdings der Einbrand nicht leiden darf.

Am schwierigsten sind Überkopfschweißungen, d. h. Schweißungen, bei denen der Lichtbogen nach oben gerichtet ist. Außer den Bewegungen *c* und *e* sind die Führungen *i* und *k* gebräuchlich. Dabei müssen die kleinen Schleifen schneller als die übrigen Kurvenzüge durchlaufen werden.

Insbesondere bei Kehlnähten sind gleichmäßige Anordnung der Raupen und guter Einbrand von einer richtigen Elektrodenführung abhängig. Um im Scheitel einen guten Einbrand zu erreichen, wird bei rißunempfindlichen Stählen zweckmäßig die erste Lage mit einer dünneren Elektrode nach Abb. 154 *a* ausgeführt, wie dies in Abb. 155 für die Lage *a* gelten soll. Für die nachfolgende Lage ist die Führungsart *b* zu empfehlen, wobei es darauf ankommt, nach Ausführung der Schleife den Lichtbogen nicht gerade nach unten, sondern stark schräg voran zu führen, um das Absacken des Schweißgutes zu vermeiden und guten Einbrand zu erzielen.

Wichtig ist ferner, durch die Führung Schlackeneinschlüsse zu verhindern, die vor allem von der Umhüllung der Elektrode, von Zunderschichten des Schweißgutes und von im Lichtbogen oxydierten Legierungsbestandteilen der Elektrode herrühren.

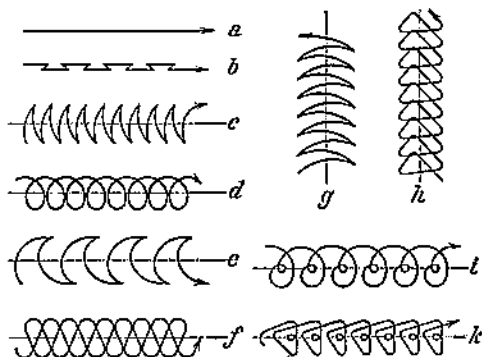


Abb. 154. Arten der Elektrodenführung.

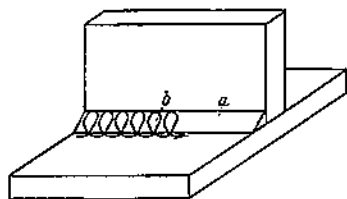


Abb. 155. Elektrodenführung bei Kehlschweißung.

Überkopfschweißung. Die Überkopfschweißung gelingt nur sehr geübten Schweißern, die hierauf besonders geschult sind. Deshalb muß geraten werden, solche Schweißungen möglichst zu vermeiden oder in größeren Kolonnen wenigstens einen geschulten Schweißer für nicht zu vermeidende Überkopfschweißungen bereitzuhalten. An Hand der Abb. 156 läßt sich der Vorgang des Überkopfschweißens verständlich machen, wobei es belanglos ist, ob mit Wechselstrom oder Gleichstrom geschweißt wird, da der Werkstoffübergang von der Stromrichtung unabhängig ist. Bei Gleichstromschweißung bleibt der Minuspol an der Elektrode,

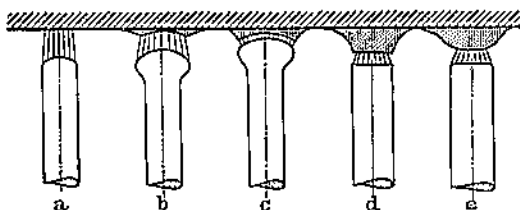


Abb. 156. Überkopfschweißung.

wenn nicht die Elektrode von sich aus auch beim waagerechten Schweißen ein Umpolen verlangt. Im allgemeinen wird man mit 3 mm-Elektroden auszukommen versuchen; über 4 mm dicke Drähte sind überkopf nicht verschweißbar. Zunächst erkennt man bei Abb. 156a den soeben gezündeten Lichtbogen, darauf das Erweichen und Fließen der Elektrode und des Werkstücks bei b, das bei c weiter fortgeschritten ist, so daß anschließend die gegenseitige Berührung unter Verlöschen des Lichtbogens erfolgt. Der flüssige halbkugelförmige Tropfen wandert an das Werkstück ab (d), unterstützt durch die Schleuderwirkung der explodierenden Gase im flüssigen Elektrodenwerkstoff, worauf der Lichtbogen wieder auftritt. Gesteigert durch die Anhaftekraft (Adhäsion) und die Wirkung der Oberflächenspannung breitet sich die Schweiße (bei e) am Blech aus, und der übergelassene Tropfen wird vom Schmelzbad aufgesaugt. Daneben wird die von Amerika übernommene Auffassung vertreten, daß der bei beweglichen Leitern auftretende „Pincheffekt“ hier auch die Abschnürung des Tropfens und durch gesteigerte Stromdichte dessen Übergang unterstützt. Öffnen und Schließen des Lichtbogens geschieht etwa 10...15mal sekundlich; ebensoviel Tropfen wandern ab, mithin weniger als beim Schweißen nach unten, wo sekundlich 20...30 kleinere Tropfen an das Werkstück übergehen.

Man kann sich leicht vorstellen, daß der flüssige Metalltropfen in der Zeit zwischen Bildung am oberen Elektrodenende und seinem Überwandern an das Werkstück das Bestreben hat, gemäß dem Gesetz der Schwere abzufließen und

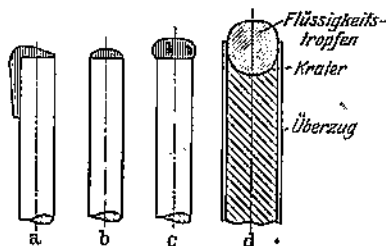


Abb. 157. Einfluß der Umhüllung beim Überkopfschweißen.

an der Stabelektrode herunterzulaufen, wie dies in Abb. 157a dargestellt ist. Denkt man sich einen sauberen Glasstab, auf dessen obere Fläche Wasser aufgebracht wird, so wird nur ein kleiner Tropfen gehalten werden können (b), das Zuviel wird seitlich, wie bei a, ablaufen. Fettet man aber das obere Ende des Stabmantels etwas ein, so können, ruhiges Halten des Stabes vorausgesetzt, viel größere Flüssigkeitstropfen ohne Abfließen auf der oberen Stabendfläche gehalten werden (c), weil Fett und Wasser nicht ineinander überfließen. Der gleiche Gedanke liegt der Wirkung der Umhüllung einer Elektrode zugrunde, weshalb für Überkopfschweißungen umhüllte Elektroden empfohlen werden. Abb. 157d zeigt, wie durch die Umhüllung rings um den Krater eine manschettenartige Hülse gebildet wird, die bis zur Überführung des Flüssigkeitstropfens zum Werkstück

sein Abfließen verhindert. Die Umhüllung muß deshalb hinsichtlich Schmelzbarkeit und Dicke so zusammengesetzt sein, daß sie zunächst noch kurze Zeit standhält, um die genannte Hülse bilden zu können, und dann erst schmilzt. Zum Schluß soll nicht unerwähnt bleiben, daß die Überkopfschweißung mit dickgetauchten Elektroden wegen des reichlichen Schlackenansfalls trotzdem erhebliche Schwierigkeiten verursacht, besonders auch dann, wenn die Umhüllung ungleichmäßig dick ist, was oft ein Schweißen überkopf vollkommen ausschließt.

Metallurgische Vorgänge in der Schweißung. Die metallurgischen Vorgänge im Schmelzbade sind außerordentlich verwickelt, weil sie durch viele Faktoren beeinflusst werden und sich in sehr kurzen Zeiten abspielen. Den stärksten Einfluß auf die Veränderungen, die sowohl anteilige Zonen des Mutterwerkstoffs (besonders innerhalb des Einbrandes), als auch der Elektrodenwerkstoff erfahren, sind hauptsächlich dem Einfluß des Luftsauerstoffs zuzuschreiben. Der größte Teil der Legierungselemente oxydiert leichter als das Eisen selbst und verschlackt. Diese mit Abbrand bezeichnete Oxydationserscheinung bedingt eine höhere Legierung des Elektrodenkerns oder der Umhüllungsmasse, hauptsächlich sind es Kohlenstoff, Silizium, Mangan, Chrom, Nickel und andere Begleiter, also Stoffe, die leicht ausbrennen und dadurch das Eisen selbst schützen. So beträgt beispielsweise der Verlust an Kohlenstoff, der zu Kohlenoxyd verbrennt und gasförmig entweicht, beim Schweißen mit nackten Elektroden bis zu 80 vH. In ähnlicher Größenordnung bewegt sich auch der Abbrand an Mangan; Silizium brennt fast völlig aus. Die dicke Ummantelung der Drähte setzt die Abbrandverluste z. T. erheblich herab, z. B. an Kohlenstoff und Mangan auf etwa 50 vH, während der Siliziumgehalt fast völlig erhalten bleiben kann. Welche Bedeutung der Erhaltung dieser Elemente beizumessen ist, geht daraus hervor, daß der Mangangehalt in erster Linie zur Desoxydation, d. h. zur Bindung des Sauerstoffs beiträgt und Silizium den Ausfall der Schlackendecke günstig beeinflusst. Deshalb wird den Elektroden für normale Baustähle bis zu 1,5 vH Mangan beigegeben. Auch die Seelenelektrode hat einen sehr hohen Gehalt an Mangan (etwa 0,85 vH), der eine gesteigerte Sauerstoffbindung bewirkt.

Der Gehalt an Phosphor, Schwefel und Kupfer bleibt in der Schweißung nahezu erhalten. Deshalb ist die Forderung bezüglich der weitgehenden Schwefel- und Phosphorfreiheit des Werkstoffs sehr berechtigt, und es ist anzustreben, auch bei Thomasstahl den Phosphorgehalt, der die Schweißung rißempfindlich macht, auf das praktisch geringste Maß zu bringen. Eine Anreicherung an Schwefel in der Schweißung, die über die übliche Menge hinausgeht, kann z. B. dann eintreten, wenn durch Diffusion aus geseigten Zonen des Mutterwerkstoffs eine Abwanderung in die Schweißung erfolgt. Auch hier kann Mangan, die Gegenwart genügender Mengen vorausgesetzt, insofern günstig wirken, als es den an das Eisen gebundenen Schwefel zu Mangansulfid bindet. Das in den Eisenkristallen gleichmäßig verteilte, im Mikrogefüge als blaugrau gefärbte Einschlüsse erkennbare Mangansulfid ist viel unschädlicher als das an den Korngrenzen abgelagerte Eutektikum Eisen—Schwefel (Schmelzpunkt etwa 1200°) und hat einen Schmelzpunkt von etwa 1500°, wodurch die Warmbrüchigkeit weitgehend beseitigt wird.

Geringe Mengen des Eisens selbst gehen hauptsächlich mechanisch in Form eines feinen Sprühregens (Spritzen) verloren und schlagen sich als rostbrauner Belag oder in Form kleiner Perlen in der Umgebung nieder (Abb. 158).

Untersuchungen ergaben, daß beim Verarbeiten von Nacktelektroden der Sauerstoffgehalt von 0,02...0,10 im Draht auf 0,15...0,25 in der Schweißung anstieg. Der Sauerstoff tritt dabei meist in Form feinverteilter Eisen- und Manganoxyde auf, die bei der an sich raschen Erstarrung der mit Nacktdraht hergestellten

Schweiße nur unvollkommen ausgeschieden und teilweise auf der Naht als Schlacke abgesetzt werden. Die Abnahme an Sauerstoff bei dünn umhüllten Elektroden ist kaum merklich, dagegen wesentlich bei dicker Ummantelung, bei denen der Sauerstoffgehalt auf $0,02 \dots 0,08$ vH vermindert werden kann.

Neben dem Sauerstoff ist es der Luftstickstoff, der an den metallurgischen Vorgängen in der Schweiße maßgeblich beteiligt ist. Ein hoher Stickstoffgehalt ist ein auffallendes Kennzeichen des mit nackten Elektroden geschweißten Stahls und ist der stickstoffbindenden Kraft des Lichtbogens zuzuschreiben. Stickstoff und Sauerstoff der Luft verbrennen im Lichtbogen zu Stickoxyden, die ihrerseits mit dem Schmelzbad eine Umsetzung eingehen und zu Eisenstickstoffverbindungen (Nitriden) führen oder vom Eisen gelöst werden. Nitrierter, d. h. also stickstoff-

haltiger Stahl ist stets hart und mehr oder weniger spröde. Nach chemischen Untersuchungen hat z. B. lichtbogengeschweißter Stahl bei normal $0,002 \dots 0,06$ vH Stickstoffgehalt der nackten Elektrode in der Schweiße $0,15 \dots 0,2$ vH Stickstoff. Wenn auch eine Steigerung der Härte und eine Zunahme der Festigkeit manchmal erwünscht ist, so trifft dies doch nur für bestimmte Fälle zu und erfolgt stets auf Kosten der Verformbarkeit. Ein Stickstoffgehalt von etwa $0,1$ vH steigert zwar die Festigkeit um etwa 20 vH, setzt jedoch die Dehnung um etwa 80 vH herab und führt gleichzeitig eine starke Verminderung der Kerbschlagzähigkeit herbei. Deshalb enthalten die Ummüllungsmassen stickstoffbindende Stoffe, die auch noch innerhalb der Schweiße und nicht nur im Lichtbogen wirksam sein können. Auf

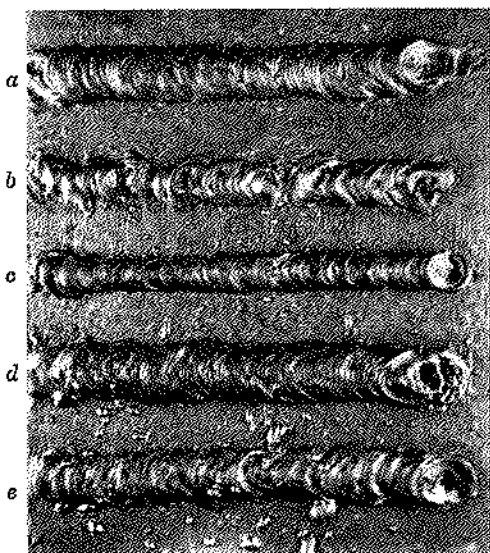


Abb. 158. Aussehen von Schweißdraußen.

Grund von Analysenserien kann behauptet werden, daß die Stickstoffaufnahme der Schweiße hierdurch vom etwa 30fachen (Nacktelektrode) auf das nur 3fache, also auf $\frac{1}{10}$ herabgedrückt werden kann. Der Nachweis der Stickstoffbindung wird später an Hand der metallographischen Prüfung erbracht, wo der Stickstoff im ausgeglühten Schliff in Form von Stickstoff- oder Nitridnadeln sichtbar wird.

Zur Verhütung oder wenigstens Verringerung der Sauerstoff- und Stickstoffaufnahme der Schweiße ist der Lichtbogen, wie schon früher erwähnt, möglichst kurz zu halten. Wirksamer sind die desoxydierenden (sauerstoffentziehenden) Bestandteile der Seelendrähte und weitaus am wirksamsten die dicken Ummüllungsmassen der Elektroden. Um ein möglichst gutes Ausgasen und einen Übergang der Sauerstoffverbindungen in die Schlacke zu gewährleisten, muß das Schmelzbad einen gewissen Flüssigkeitsgrad aufweisen, der von der Höhe der Stromstärke abhängig ist. Eine zu geringe Stromstärke führt zu einer zu raschen Erstarrung des Schmelzbades, so daß die nicht ausgeschiedenen Oxyde einen hohen Sauerstoffgehalt der Schweiße ergeben. Naturgemäß ist auch eine zu hohe Stromstärke schädlich, da sie zur Überhitzung oder Verbrennung

der Schweißnaht führen kann. Deshalb muß auch aus metallurgischen Gründen die Stromstärke richtig bemessen sein (s. Tabelle 12).

Abschließend sei noch erwähnt, daß sich die geschilderten Vorgänge im wesentlichen bei der Schweißung niedrig legierter, d. h. normaler Baustähle abspielen und daß sich die Abbrandverhältnisse durch größere Anteile an bestimmten Elementen verschieben. Hierauf wird im Abschnitt „Die Schweißung von Sonderstählen“ noch näher eingegangen.

Aussehen der Schweißnaht. Das Aussehen einer Schweißraupe ist von folgenden Faktoren abhängig: von der Stromstärke, der Lichtbogenlänge, der Elektrodenart, der Handfertigkeit des Schweißers im Halten und Führen des Lichtbogens und der Schweißgeschwindigkeit. An Hand von Raupeinmustern, die unter den verschiedensten Bedingungen hergestellt worden



Abb. 159. Aussehen von Schweißraupen.

sind, soll der Einfluß auf deren Aussehen erklärt werden. Die Raupe der Abb. 158 und 159 sind mit nackten Elektroden und mit Gleichstrom geschweißt. *a* ist die richtig hergestellte normale Schweißraupe, *b* die mit allen Fehlern behaftete

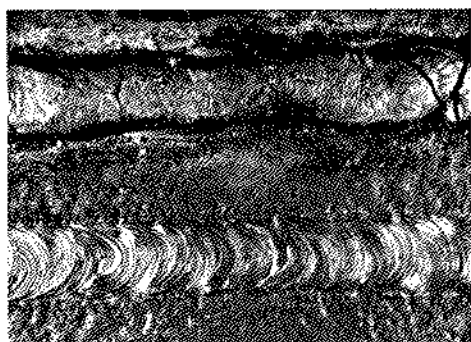


Abb. 160. Aussehen von Schweißraupen mit und ohne Schlacke.

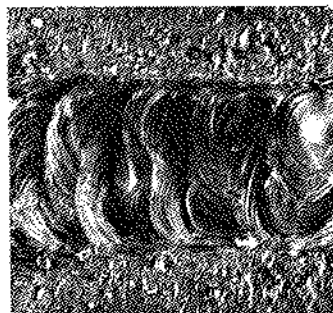


Abb. 161. Aussehen einer Decklage.

Raupe eines Anfängers. Sie zeigt eine wahllose Verteilung der aufgeschmolzenen Stahltropfen, im Gegensatz zur gleichmäßig schuppenkettenartigen Anordnung der Naht *a*. Eine mit zu geringem Strom geschweißte Raupe veranschaulicht *c*; sie ist trotz Beibehaltens des gleichen Elektrodendurchmessers von nicht genügendem Einbrand und bei geringer Breite von starker Überhöhung. Die nächste Schweißraupe *d* ist mit zu hoher Stromstärke geschweißt und von zahlreichen, auch oberflächlich erkennbaren Poren durchsetzt, die ihr Höchstmaß im Endkrater erreichen. Endlich zeigt *e* eine mit zu langem Lichtbogen geschweißte Raupe. Sie ist teilweise auch überhitzt und beiderseits von starken Spritzern umlagert, die sogar bis in die Umgebung der Raupe *c* gelangt sind. Den

Einfluß der Elektrodenführung auf die Raubenbildung hebt Abb. 159 hervor, in der f in geradliniger Führung (Abb. 154a), g mit pendelnder Bewegung (Abb. 154f) und h mit Schleifenführung (Abb. 154e) ausgeführt sind. Mit schwach

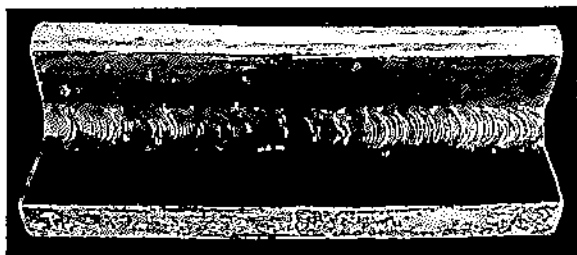
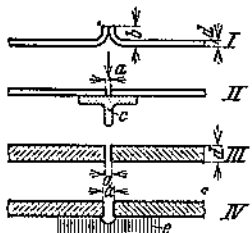


Abb. 162. Aussehen einer Kehlschweißung.

umhüllten Elektroden geschweißte Rauben weichen im Aussehen von diesen Raubenbildern nur wenig ab.

Dickumhüllte Elektroden verändern das Aussehen der Rauben wesentlich, wie dies auch in den Abb. 160 und 161 zum Ausdruck kommt. Nach dem Niederschmelzen der Elektroden bildet sich eine dicke Schlack-

kendecke i , die sich nach dem Erkalten möglichst von selbst abheben oder doch sehr leicht entfernen lassen soll und unter der dann eine sehr saubere, metallisch glänzende und flachliegende Schuppenkette zum Vorschein kommt, wie dies bei k ersichtlich ist. Ein gleich schönes Aussehen hat die Decklage Abb. 161 eines in sechs Lagen geschweißten dickeren Bleches, bei der die Schleifenführung zur Anwendung kam. Die Kehlnaht der Abb. 162 zeigt ein besonders gefälliges Aussehen, wie wenn sie maschinell hergestellt wäre. Nähte solchen Aussehens lassen stets auf die Verwendung dickumhüllter Elektroden schließen.



2. Grundsätzliches über die Schweißung von Stahl.

a) Die Vorbereitung des Werkstücks.

Mit Rücksicht darauf, daß eine sachgemäße Vorbereitung nicht nur das Schweißen erleichtert, sondern auch dessen Endergebnis günstig beeinflusst, ist einem guten Zurichten besondere Sorgfalt zuzuwenden. Von Wichtigkeit sind die Anpassung der Konstruktion an die Bedingungen der Schweißung sowie Vorbeugungsmaßnahmen gegen Wärmewirkung und Anordnungen zur Erhöhung der Sicherheit der Verbindung. Zunächst sollen die grundlegenden Verbindungsarten besprochen werden.

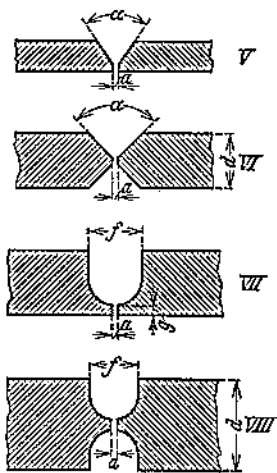


Abb. 163. Vorbereitung von Blechkanten zur Stumpfschweißung.

• Stumpfschweißungen. Maßgebend für die Art des Stumpfstoßes ist die Blechdicke (Abb. 163 I...VIII). Der Bördelstoß I, der weniger mit dem Metall- als mit dem Kohlelichtbogen geschweißt wird, findet bei dünnen Blechen unter $d \approx 2$ mm Anwendung, wobei b , schon des guten Durchschweißens halber, möglichst gering gehalten werden soll. Die nächsten drei Arten II...IV werden als I-(J-) Stöße bezeichnet und für etwa 2...4 mm

dicke Bleche verwendet, wenn von beiden Seiten — Zugänglichkeit vorausgesetzt — geschweißt wird, auch bis 8 mm. Der Kantenabstand a beträgt 0,5...1,5 mm und richtet sich nach der Elektrodenart. Da es schwierig ist, dünne Bleche zu schweißen, bedient man sich, wenn angängig, einer genutzten Kupferunter-

lage *IVc*, die außerdem ein sauberes Aussehen der Nahrückseite bewirkt. Bedingt die Konstruktion eine Versteifung der Bleche, so wird zweckmäßig der Stoß auf diese verlegt und mit dieser verschweißt, wie dies bei *IIc* durch ein τ -Profil, das auch durch beliebige andere Formeisen ersetzt werden kann, geschehen ist.

Bleche über 4 mm Dicke bedingen zur Erfassung des vollen Querschnitts der Verbindung beim Schweißen ein Abschrägen der Blechkanten und Auseinanderlegen der Fugenränder (*V...VIII*), um das immer wichtige Durchschweißen zu gewährleisten. Der Abstand α beträgt 1,5...3 mm je nach Blechdicke und Elektrodenart. Entsprechend der Abschrägung hat man zu unterscheiden zwischen v-(Vau-) Stoß *V*, x-(Ix-) Stoß *VI*, u-Stoß (Kelch- oder Becherstoß) *VII* und Doppel-u-Stoß *VIII*. Die meistangewandte Verbindung ist der v-Stoß, der im allgemeinen erst bei Blechen über 15 mm Dicke durch den x-Stoß ersetzt wird, wenn die örtlichen Verhältnisse eine beiderseitige Zugänglichkeit des Stoßes gestatten. Der Abschrägungswinkel α beträgt 70°, bei dickeren Blechen, besonders beim x-Stoß, 50...60°. Die Praxis hat ergeben, daß

diese Winkel ausreichend sind und gegenüber dem bei der Entwicklung der Schweißtechnik ursprünglich angegebenen Abschrägungswinkel von 90° den Vorzug haben, daß die einzuschmelzenden Werkstoffmengen erheblich geringer sind, was nicht allein von wirtschaftlicher, sondern auch von technischer Bedeutung ist, weil das Schrumpfen der Schweiße verkleinert wird. Der Querschnitt des x-Stoßes beträgt bei gleicher Blechdicke und gleichem Winkel α nur die Hälfte des entsprechenden v-Querschnitts. Ist das Schweißen eines x-Stoßes nicht möglich, dann ist bei sehr dicken Blechen weniger der u-Stoß als der in Abb. 164 skizzierte Kelchstoß *I* zu empfehlen, wiederum um die einzuschmelzenden Werkstoffmengen kleiner zu halten. Damit verbindet sich der Vorteil einer fast über den ganzen Querschnitt gleichmäßigen Schrumpfung, da die Kanten ziemlich steil verlaufen. Allerdings kann die Vorbereitung nicht, wie beim v- und x-Stoß, durch Brennschneiden, sondern nur durch Hobeln erfolgen. Das Maß f sollte für Abb. 163 *VII* und *VIII* etwa $\frac{1}{3} \dots \frac{1}{2}$ der Blechdicke d betragen, g zwischen 3 und 6 mm, je nach Elektrodendurchmesser. Die gleichen Gesichtspunkte, die für den Ersatz des v- durch den x-Stoß bestimmend sind, gelten auch für den Doppel-u-Stoß, der ebenso wie der u-Stoß heute nur noch selten benutzt wird. Für Blechdicken von 50 mm aufwärts sind die Kantenvorbereitungen der Abb. 164 *I...IV* heute die gebräuchlichsten. Die in mm eingeschriebenen Maße erübrigen ein besonderes Eingehen auf diese Fugengestaltung. Bei den Ausführungsformen *II* und *IV* kann das Hobeln durch Brennschneiden (autogen) ersetzt werden. *IV* ist im allgemeinen nur bei Automaten-

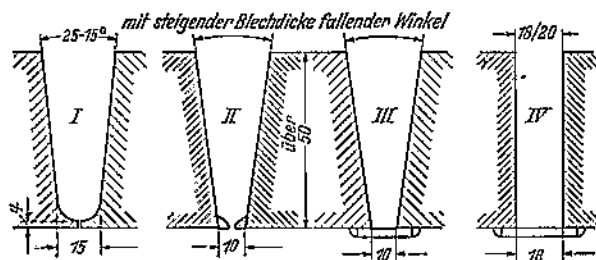


Abb. 164. Vorbereitung von Dickblechen zum Schweißen.

schweißung gebräuchlich. Kehl-schweißungen. Die einfachste Form der Schweißverbindung ist die Kehlnaht, da sie keiner besonderen Vorbereitung der Blechränder bedarf. Sie wird angewandt bei Überlapp-, Winkel- und τ -Stößen. Die Überlappungsschweißung, gegenüber der Gasschweißung eine besondere Anwendungsmöglichkeit der Elektroschweißung, kann ein- und doppelseitig ausgeführt werden. In Abb. 165

Die einfachste Form der Schweißverbindung ist die Kehlnaht, da sie keiner besonderen Vorbereitung der Blechränder bedarf. Sie wird angewandt bei Überlapp-, Winkel- und τ -Stößen. Die Überlappungsschweißung, gegenüber der Gasschweißung eine besondere Anwendungsmöglichkeit der Elektroschweißung, kann ein- und doppelseitig ausgeführt werden. In Abb. 165

sind Überlappungsschweißungen verschiedener Art dargestellt. Die Ausführungsform *a*, doppelseitige leichte Kehlnaht, und *b*, einseitige volle Kehlnaht,

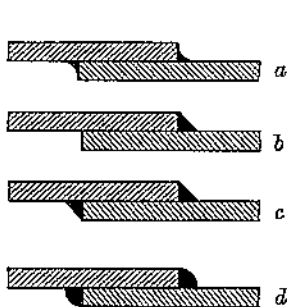


Abb. 165. Ausführung der überlappten Schweißung.

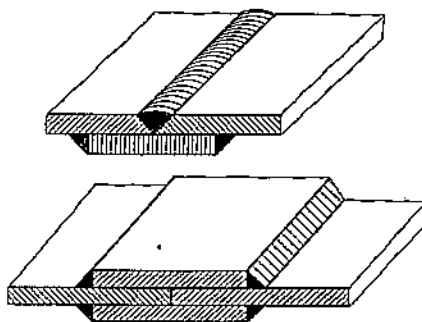


Abb. 166. Einfache und doppelte Laschenverbindung.

kommen nur dort in Frage, wo geringe mechanische Kräfte auf die Naht einwirken. Müssen größere Kräfte übertragen werden, so sind die Beispiele *c* und *d*, die doppelseitige volle bzw. überhöhte Kehlnaht üblich. Die Breite der Überlappung beträgt bei Blechdicken bis zu 10 mm: 40...50 mm, bei Dicken von 11...20 mm: 60...70 mm.

Zu dieser Verbindungsart zählen auch Laschenverstärkungen, von denen zwei Fälle in Abb. 166 dargestellt sind. Das Aufschweißen einseitiger Laschen erfordert natürlich auch die Schweißung des eigentlichen Blechstoßes, während dieser bei doppelseitiger Laschenverbindung offen bleiben kann. Dabei unterscheidet man

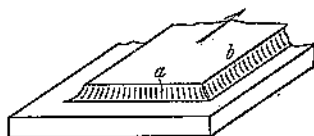


Abb. 167. Stirn- und Flanken-naht.

Stirn- und Flanken-naht, wie sie in Abb. 167 skizziert sind. Die quer zur Kraft- richtung liegenden Kehlen *a* sind als Stirnnaht, die längs liegenden Kehlen *b* als Flanken-naht anzusprechen. Ein Sonderfall ist die Schlitz-

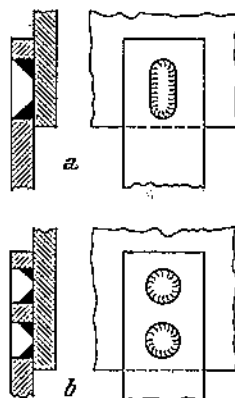


Abb. 168. Schlitznaht.
a = Langlochnaht,
b = Rundlochnaht.

nahtschweißung, bei der die Langloch- (Schlitz-) und die Rundlochnaht unterschieden wird (Abb. 168). Man wird sie nur dann ausführen, wenn die Quer-

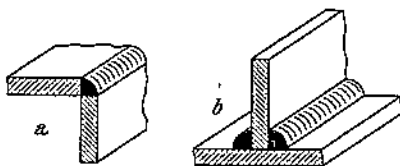


Abb. 169. Winkel- und T-Stoßverbindung.

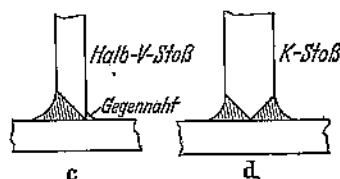


Abb. 170. Sonderstöße bei T-Verbindungen.

schnitte von Stirn- und Flanken-nahten zur Kraftübertragung nicht ausreichen, gegebenenfalls schwer anzuordnen sind. Wichtig ist eine genügend große Öffnung, die ein unbehindertes Führen der Elektrode ermöglicht.

Außer eines sauberen Zugschnitts bedarf auch der Winkelstoß *a*, Abb. 169 (Tek- oder Kantenschweißung), keiner besonderen Vorbereitung, da die Kanten zwangsläufig eine Kehle bilden, wie beim τ -Stoß *b*, der meist doppelseitig geschweißt wird. Dagegen erfordern die für schwingungsbelastete Verbindungen bestimmten Halb *v*- (*c* in Abb. 170) und κ -Stöße (*d*) eine sorgfältige Bearbeitung der Schweißkanten.

Während bei allen Stumpfstoßverbindungen nur eine durchlaufende Naht mit oder ohne Überhöhung Anwendung findet, können Kehlnähte häufig auch als unterbrochene Nähte ausgeführt werden, wenn sie zur Kraftübertragung ausreichen und Dichtschweißung nicht verlangt wird. Eine Ausnahme macht der Winkelstoß, der nur als durchlaufende Naht vorkommt. Die Anordnung der unterbrochenen Naht geht aus Abb. 171 hervor. Entweder liegen sich die Nahtstrecken gegenüber, wie bei *a* (Kettenschweißung), oder sie liegen wechselweise versetzt, wie bei *b*, was auch als Zickzackschweißung bezeichnet wird. Die von der Schweißung nicht erfaßten Nahtstrecken l_1 sind meist länger als die Schweißnahtabschnitte l_2 , mit anderen Worten: die Teilung t , die von Mitte zu Mitte Schweißstrecke gemessen wird, ist stets größer als l_2 . Wird die Schweißnaht auf Biegung beansprucht, so können die nichtverschweißten Nahtstrecken l_1 die erforderliche Dehnung aufnehmen und die Schweiße entlasten.

Für alle diese Verbindungsformen hat der „Fachausschuß für Schweißtechnik“ im VDI in Zusammenarbeit mit

dem Deutschen Normenausschuß das Normblatt DIN 1912 herausgegeben, in dem schweißtechnische Zeichen und Begriffe in Skizzen erläutert und in Sinnbildern für Zeichnungen festgelegt sind¹. Tabelle 13 gibt einen Auszug aus den Grundsinnbildern dieses Normblattes wieder.

b) Die Schweißung von Stahlblechen.

Polung des Werkstücks. Voraussetzung ist, daß die zur Verfügung stehende Schweißmaschine sachgemäß und auf Grund der jeweils mitgegebenen besonderen Betriebsvorschrift bedient wird. Das Werkstück (Blech) wird, sofern Gleichstrom zur Verfügung steht, an das + Kabel der Stromleitung angeschlossen, der Elektroden-

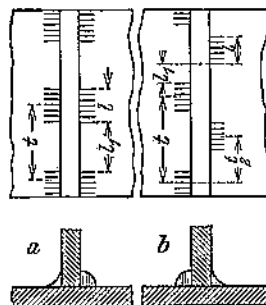


Abb. 171.
Unterbrochene Kehlnähte.

Tabelle 13.

Benennung	Grundzeichen	Sinnbilder			
		überwölbt	flach	hohl	wurzelseitig nachgeschweißt
Bördenaht	~	~	~		
I-Naht	=	=	=		
V-Naht	<	<	<		<
U-Naht	C	C	C		C
X-Naht	X	X	X		
Doppel U-Naht	>C	>C	>C		
Kehlnaht	L	D	D	L	
Ecknaht					
Dreiblechnaht	L	D	D		
3/4 V-Naht	<	<	<	<	<
K-Naht	X	X	X	X	
Loch- und Schlitznaht	±			±	

¹ Auf die Wiedergabe der Normblätter wird hier mit Rücksicht auf den Raummangel verzichtet. Sie sind zu 0,75 RM. je Stück durch den Beuth-Vertrieb, Berlin, erhältlich.

halter an das —Kabel. Davon weicht man ab bei Dünoblechen, um Lochbrand zu vermeiden und im allgemeinen bei dickumhüllten Elektroden, sowie bei hochlegierten Stählen und den Nichtisenmetallen. Bei Wechselstrom ist die Art des Anschlusses gleichgültig. Im übrigen ist die Wirkung dieselbe, ganz gleich, ob das Blech unmittelbar mit der stromführenden Klemme in Verbindung steht oder ob die Klemme an einen stromleitenden Werkstück angeschlossen ist, auf den das Blech nur aufgelegt wird. Die Hauptsache ist, daß für guten Kontakt gesorgt wird; wenn notwendig, wird die Stelle, an welche die Klemme anzuschließen ist, metallisch blank gemacht, da Rost isolierend wirkt. Die Klemmen müssen fest angezogen sein, lose Klemmen werden warm und schmelzen schließlich ab. Die Klemmen an den Maschinen und Tafeln sind fast immer mit + und — gekennzeichnet, entsprechend dem positiven und negativen Stromanschluß. Fehlt diese Angabe oder polt eine Hauptstrommaschine aus irgendwelchen Ursachen um, so kann die Feststellung des Pols durch angefeuchtetes Polreagenzpapier erfolgen. Der —Pol hinterläßt, an das Papier gehalten, einen rötlichen Punkt, der +Pol markiert sich nicht. Es handelt sich um mit Kochsalz- und Phenolphthaleinlösung getränktes Fließpapier (Rotfärbung des Phenolphthaleins am —Pol). Ist kein Polreagenzpapier zur Hand, dann taucht man beide Drahtenden (nicht zusammenkommen lassen!) in ein Gefäß mit Wasser. Dabei tritt am —Pol stärkere Gasentwicklung (H_2) als am +Pol (O_2) auf, was allerdings nicht ganz leicht zu beurteilen ist. Wie schon früher erwähnt, kann auch der Kohlelichtbogen zur Bestimmung der Polarität dienen, ein Hilfsmittel, das eine genauere Deutung zuläßt.

Spannung und Stromstärke. Nachdem man sich vom richtigen Anschluß der Maschine und der vorschriftsmäßigen Vorbereitung und Reinigung der Schweißstelle des Blechs von anhaftendem Rost, Öl und Schmutz überzeugt hat, kann die Maschine in Betrieb gesetzt werden. Hierbei ist darauf zu achten, daß der Elektrodenhalter nicht mit dem Gegenpol in Berührung kommt. Am besten wird er an einem Holzgestell oder an einer trockenen Wand aufgehängt, nicht aber auf den Schweißtisch oder das Werkstück abgelegt. Nun erfolgt die Regelung des Schweißstroms nach der für die Maschine gelieferten Anweisung, die sich in ihren

Tabelle 14.

Blechedicke mm	Elektroden- durchmesser mm	Schweiß- spannung V	Schweißstromstärke A
0,75	1	13...15	18...22
1	1	13...16	24...30
1,5	1,5	16...18	33...40
1,5	2	16...18	36...45
2	2	16...18	50...60
3	3	16...18	80...120
4... 5	4	17...19	120...180
6... 7	4...5	17...19	150...200
8...10	5	18...20	160...200
11...15	5	18...20	180...220
16...20	5	19...22	200...230
über 20	5...6	20...25	200...260

Daten etwa der Tabelle 14 nähert und zusätzliche Angaben enthält, die die für ihre Maschinen erforderlichen Leerlaufspannungen bzw. Kurzschlußstromstärken umfassen. Die Werte in Tabelle 14 sind als normale Grenzwerte für die Schweißung mit nackten Elektroden aufzufassen, für Bleche unter 2 mm allerdings für ummantelte Elektroden. Bei selbsttätiger Schweißung können diese Stromstärkenwerte bis zu 70 vH gesteigert werden. Beim Arbeiten mit schwachumhüllten Elektroden bleiben die Schweißspannungen etwa die gleichen

wie in Tabelle 14, während die Stromstärken um etwa 10 vH niedriger gehalten werden. Für dickumhüllte Elektroden liegen die Spannungen bis zu 30 vH höher und die Stromstärken können bis zu 20 vH niedriger liegen. Im übrigen richtet sich die Stromstärke nicht allein nach dem Elektrodendurchmesser, sondern auch nach der Masse des Werkstücks. Die Zusammenstellung der Tabelle 14 umfaßt Elektroden bis zu 6 mm Durchmesser, da dickere Elektroden seltener und

dann auch nur umhüllt benutzt werden. Das Verhältnis zwischen Stromstärke und Elektrodenquerschnitt bezeichnet man als Stromdichte, die sich beispielsweise für eine 4 mm-Elektrode und 180 A errechnet zu $180 : \frac{4^2 \cdot \pi}{4} = 14,4 \text{ A/mm}^2$. Diese Belastungsziffer schwankt zwischen 9,5 und 16,0 A/mm², weicht aber für Elektroden über 5 mm Durchmesser nach unten ab.

Schweißarbeit. Beim Zünden des Lichtbogens fällt das Voltmeter fast auf 0, während das Amperemeter plötzlich in die Höhe schnellte. Das beweist, daß in diesem Augenblick nur eine sehr geringe Spannung, dafür aber die ganze verfügbare Stromstärke durch den Berührungspunkt am Werkstück hindurchgeht. Ist der Lichtbogen gebildet, so stellen sich Spannung und Stromstärke selbsttätig ein. Mit der Herstellung des Kurzschlusses muß man sich über den Verlauf der Arbeit, über Schweißrichtung und Elektrodenführung im klaren sein, da mit der Lichtbogenbildung sofort der Werkstoffübergang von der Elektrode einsetzt. Im Werkstück entsteht ein Schmelzkrater, in den der Elektrodenwerkstoff einzuschmelzen ist. Es ist Grundbedingung, daß das Werkstück örtlich gut warm und nach wenigen Sekunden genügend flüssig ist, damit eine gute Verbindung des aufgeschmolzenen Blechs mit dem Schweißgut hergestellt wird und kein Kleben eintritt, was eine Folge zu geringer Stromstärke oder zu hoher Schweißgeschwindigkeit sein kann. Wichtig ist — das muß immer wieder hervorgehoben werden —, den Lichtbogen bei allen Metallelektrodenarten so kurz wie zugänglich zu halten! Selbstverständlich erfordert es einige Übung, bis man den Vorschub der Elektrode mit dem jeweils abschmelzenden Werkstoff in das richtige Verhältnis bringt. Versäumt man dies, so muß naturgemäß der Lichtbogen länger werden, bis er endlich abreißt und von neuem gezündet werden muß. Das häufige Erlöschen des Lichtbogens ist für die Güte der Schweißung nachteilig und kennzeichnet — eine gute Schweißmaschine und brauchbare Elektroden vorausgesetzt — immer die Ungeschicklichkeit des Schweißers. Übrigens läßt sich die Handfertigkeit des Schweißers auch durch Beobachtung des Voltmeters prüfen, da starke Schwankungen des Voltmeterzeigers auf ungleichmäßiges Arbeiten hinweisen. Dagegen vermag ein geübter Schweißer den Lichtbogen so gleichmäßig lang zu halten, daß sich kaum eine merkliche Bewegung des Voltmeters feststellen läßt. Die im Oszillogramm festgehaltenen Schwankungen zwischen Schweiß- und Kurzschlußspannung sind infolge der sehr geringen Dauer, während der sie sich abspielen, an gewöhnlichen Voltmetern nicht ablesbar.

Um das An- und Abschmelzen des Elektrodenhalters zu verhüten, darf die Elektrode nicht zu weit abgeschmolzen werden. Das Einspannende der Elektrode von etwa 35 mm (je nach Maulbreite des Halters) muß abfallen. Durch knappes Einklemmen der Elektrode können die unvermeidlichen Abfälle verringert werden. Vorrichtungen für das Zusammenschweißen der Abfallenden haben sich nicht bewährt. Dünne, leicht durchfedernde Stäbe spannt man in der Mitte ihrer Länge ein und wendet, wenn die eine Hälfte niedergeschmolzen ist, den Halter um und stößt den Stab nach der unteren Seite des Halters durch. Das Einspannen dünner Elektroden auf geringere Längen hat außerdem den Vorteil, daß die Elektrode nicht so leicht glühend wird und weniger federt. Infolgedessen kann der Lichtbogen leichter gehalten werden.

Schweißraupen und Einbrand. Die Schweiße besteht bei Einlagenschweißungen aus einer Raupe, bei Mehrlagenschweißungen aus dem Aufbau mehrerer neben- oder übereinander angeordneter Raupen. Beim Erlernen des Schweißens¹ beginnt

¹ Es ist nicht Aufgabe dieses Buches, Anweisungen für die planmäßige Ausbildung von Elektroschweißern zu geben. Recht brauchbare Unterlagen hierfür sind die „Lehrblätter

man deshalb mit dem Auftragen von Raupen auf ebenen, waagerechten Flächen, um neben richtigem Halten und Führen des Lichtbogens die mit den Eigenschaften der Elektroden und Stromstärken zusammenhängenden Vorgänge der Schmelzschweißung kennenzulernen. Neben der Gleichmäßigkeit im äußeren Aussehen der Raupen kommt es vor allem auf ihre innige Verschmelzung mit dem Werkstück an, wofür der Ausdruck Einbrand geprägt wurde. Der erzielte Einbrand läßt sich äußerlich am Endkrater der Raupe abschätzen, ist aber mit Sicherheit nur im Querschnitt feststellbar. Abb. 172 gibt einige Raupenquerschnitte wieder. Bei Annahme gleichen Elektrodendurchmessers und gleicher Schweißgeschwindigkeit in den verschiedenen Fällen zeigt *a* eine mit zu geringer Stromstärke geschweißte und deshalb ohne ausreichenden Einbrand gebliebene Raupe. Den

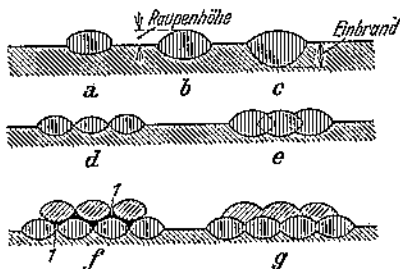


Abb. 172. Querschnitte durch Schweißraupen.

Querschnitt einer mit richtiger Stromstärke ausgeführten Raupe zeigt *b*, während *c* mit zu hoher Stromstärke geschweißt wurde und einen viel zu tiefen Einbrand erkennen läßt. Auf den Einbrand sind außerdem von Einfluß: die Blechdicke, die metallurgischen Eigenschaften des Werkstücks sowie der Elektrode und gegebenenfalls deren Umhüllung und die Polarität. Daß zwischen Raupe und Werkstück eine innige Verschmelzung eintreten muß, ist selbstverständlich, jedoch gehen die Meinungen auch in Fachkreisen

darüber auseinander, welches Maß der Einbrandtiefe hierfür erforderlich ist. Aus vielen technologischen Untersuchungen geht hervor, daß schon Einbrandtiefen von 1 mm völlig ausreichend waren.

Beim Aneinanderreihen von Raupen ist darauf zu achten, daß jede folgende Raupe die vorangehende um ein bestimmtes Maß überschneidet, damit ein dichter zusammenhängender Verband gewährleistet wird. Demnach ist die Anordnung der Raupen bei Skizze *d* (Abb. 172) falsch, da sich die Raupenflanken nur berühren. Richtig ist allein der Aufbau bei *e*. Dieselben Gesichtspunkte gelten für Mehrlagenschweißung, d. h. für den Aufbau der Raupenlagen übereinander. Die im Querschnitt von *f* entstandenen Hohlräume *l* haben ihre Ursache in den bei *d* gemachten Fehlern, wegen der gleichmäßige Aufbau der Schweiße *g* im Sinne von *e* erfolgte und einwandfrei ist.

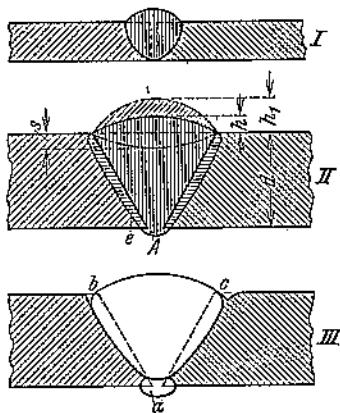


Abb. 173. Querschnitte von I- und V-Schweißern.

Aufbau der Schweiße. Die folgenden Abbildungen behandeln den Aufbau von Verbindungsschweißungen. Da der π -Stoß nur für dünne Bleche in Frage kommt, wird er normalerweise nur in einer Lage geschweißt. Der Querschnitt entspricht etwa der Abb. 173 I. Die Anzahl der Lagen in abgeschrägten Stumpfstößen (Abb. 163 V...VIII) richtet sich nach der Form der Schweißmulde und der Dicke der benutzten Elektroden. Unabhängig von der Anzahl der Lagen soll der Gesamtquerschnitt der Schweiße das Aussehen der Abb. 173 II aufweisen.

für Lichtbogenschweißung“ des „Reichsinstituts für Berufsausbildung in Handel und Gewerbe“, Berlin, die unter Mitwirkung der Verfasser in Gemeinschaftsarbeit entstanden sind. Das praktische Schweißen kann nur in Schweißlehrgängen gründlich erlernt werden.

Bei *A* ist ein gutes Durchschweißen in der Wurzel angedeutet; die Flächen *e* deuten den Einbrand an, und *h* ist die übliche Überhöhung der Schweißse, d. h. die Verstärkung der Schweißse über die Blechdicke *d* hinaus, die je nach Blechdicke 2...4 mm beträgt. Eine darüber hinausgehende Verdickung der Schweißse, etwa wie bei *h*₁ gezeichnet, ist unschön, wertlos und unwirtschaftlich; darüber hinaus lenkt sie den geradlinigen Kraftfluß ab und neigt zu natürlicher Kerbwirkung. Grobe Fehler im Innern der Schweißse und Bindungsfehler bei *a* im Scheitel sind dadurch in keinem Falle auszugleichen. Eine konkave Oberfläche der Schweißse, die um das Maß *s* gegenüber der Blechoberfläche zurücksteht, ist falsch, da sie eine Schwächung der Konstruktion bedeuten würde. Bei allen Beanspruchungen wirken sich Kerben als besonders gefährlich aus, da sie allein schon den Bruch der Schweißse zur Folge haben können. Kerben entstehen beim ungenügenden Durchschweißen im Scheitel, was durch eine Kapp- (Wurzel- oder Gegen-) Naht *IIIa* behoben werden kann, sofern nicht eine Unterlage (Abb. 163 IV) bevorzugt wird. Oder sie entstehen an der Oberfläche der Schweißse durch zu hohe Stromstärke und falsche Führung der Elektrode innerhalb (*IIIb*) oder außerhalb (*IIIc*) des Schweißquerschnitts. Werden Kerben, gleichgültig ob es sich um innere (im Nahtquerschnitt) oder um äußere (Nahtoberfläche) handelt, nicht sorgfältig vermieden, so ist sowohl bei statischer, mehr noch bei dynamischer Beanspruchung der Konstruktion mit baldigem Zubruchgehen zu rechnen, da die Kerbwirkung starke Spannungsspitzen hervorruft. Auch die Laugensprödigkeit wird durch Kerben stark gesteigert.

Der Aufbau einer Mehrlagenschweißung beginnt für die unterste Lage *I*, Abb. 174 I, mit einer dünneren Elektrode, um ein gutes Durchschweißen sicherzustellen, sofern dies mit der Rißempfindlichkeit hochfester Stähle vereinbar ist.

Für die folgenden Lagen geht man zu dickeren Elektroden über. Die zweite Lage erfaßt den Querschnitt in voller Breite, wobei darauf zu achten ist, daß eine gute Verbindung mit den Fugenrändern eintritt und keine durch starke Wölbung der Lage hervorgerufene Furchen *a* entstehen, die zu Schlackeneinschlüssen und unverbundenen Stellen führen. Sie sind durch richtige Elektrodenführung zu vermeiden, bzw. treten sie bei dickumhüllten Elektroden infolge der Leichtflüssigkeit der Schweißse nicht so oft in Erscheinung (*IIIb*). Mit zunehmender Fugenbreite wächst die Lagenzahl, weshalb meist mehrere Raupen nebeneinander aufzutragen sind, und zwar immer zuerst die an den Werkstoffrändern gelegenen, wie dies aus der Zahlenfolge der Abb. 174 II hervorgeht. Damit die Oberfläche

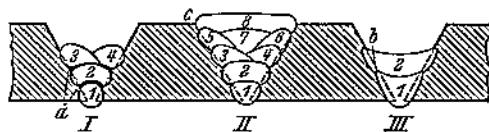


Abb. 174. Aufbau der V-Schweißse.

der Schweißse keine als Kerben wirkenden Rillen zwischen den Raupenflanken enthält, wird die oberste Lage, die Decklage, häufig in Wellenführung hergestellt, d. h. die Raupen werden quer zur Nahtichtung aufgetragen, wie dies aus der photographischen Aufnahme Abb. 175 (links) zu ersehen ist. Abb. 175 zeigt den

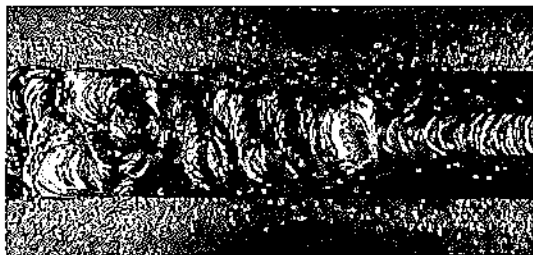


Abb. 175. Aufbau einer dreilagigen V-Schweißse.

der Schweißse keine als Kerben wirkenden Rillen zwischen den Raupenflanken enthält, wird die oberste Lage, die Decklage, häufig in Wellenführung hergestellt, d. h. die Raupen werden quer zur Nahtichtung aufgetragen, wie dies aus der photographischen Aufnahme Abb. 175 (links) zu ersehen ist. Abb. 175 zeigt den

Gesamtaufbau in drei Lagen, insbesondere die mittlere auch in Wellenführung ausgeführt. Bei Herstellung der Decklage ist zu beachten, daß die Blechränder richtig erfaßt werden und weder Randkerben (c in Abb. 173) zwischen Schweißse und Blechabschrägung noch bei sehr breiter Decklage im Blech auftreten.

Sieht man von wirtschaftlichen Gesichtspunkten ab, so ist der Mehrlagenschweißung als der technisch besseren wohl immer der Vorzug zu geben, weil die folgenden Lagen die vorausgegangenen, bereits genügend erkalteten, ausglühen und damit die Schweißse vergüten. Gleichzeitig erreicht man den Vorteil geringer Schrumpfung der Schweißse und eine Herabminderung der inneren Spannungen.

Häufig anzutreffende Fehler sind in Abb. 176 skizziert. Bei a ist nicht durchgeschweißt (Wurzelfehler); die Stoßfuge bleibt zum Teil unverbunden und wirkt



Abb. 176. Fehlerhafte Schweißen.

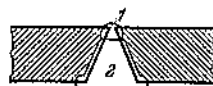


Abb. 177. Aufbau einer stehenden Naht.

als Kerbe. Ähnliche Erscheinungen zeigt b , eine Naht mit versetzten Blechrändern, die bei geringer Beanspruchung bricht. Bei c haben wir den Fall einseitiger Verbindung, während d völlig unverbunden blieb, eine Folge falscher Elektrodenführung.

Bei der Senkrechtschweißung baut sich die Schweißse meist aus zwei Lagen auf, entsprechend der Abb. 177. Hierbei wird die erste Lage (I) oft von oben nach unten gelegt, die zweite Lage, den vollen Querschnitt ausfüllend, zweckmäßig von unten nach oben. Diese Ausführungsart ist deshalb angängig, weil das Schmelzbad trotzdem auf kleiner Fläche gehalten werden und nicht auf ungenügend erhitzte Blechränder voranfließen kann. In gewisser Hinsicht tritt auch hier ein Ausglühen ein, dem ein langsames Erkalten folgt. Allerdings ist in diesem Falle die Querschrumpfung meist größer als bei einer Mehrlagenschweißung, deren Aufbau im Sinne der Abb. 174 II erfolgen kann.

Der Aufbau von Kehlschweißen ist an T-Stößen in Abb. 178 dargestellt und gilt sinngemäß auch für Überlappstöße. Die Schweißse soll im Querschnitt

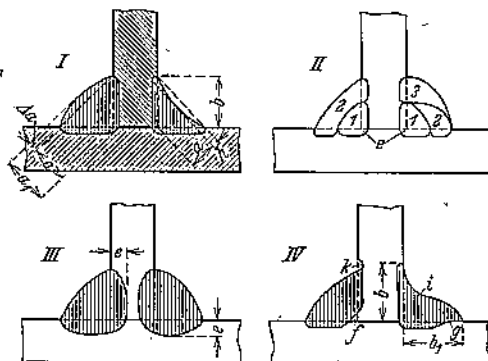


Abb. 178. Aufbau von Kehlschweißen.

ein gleichschenkelig rechtwinkliges Dreieck bilden, dessen Höhe a (I) für die Festigkeitsberechnung bestimmend ist. Die Überhöhung Δa kann deshalb gering gehalten werden, um wirtschaftlich zu bleiben. Die bei I rechts dargestellte leichte Kehlnaht, bei der das Maß a um das Stück h von der Grundlinie zurücksteht, wird insofern als günstiger angesehen, als der Übergang zwischen Blech- und Nahtoberflächen allmählich verläuft, während sie bei stark überhöhter Wulst einen Winkel mit scharf ausgeprägtem Scheitel bilden, was für den

Kraftlinienfluß ungünstig ist. Die Anordnung der Lagen ergibt sich aus II ; auf der linken Seite sind 2-Lagen-, auf der rechten 3-Lagen-Schweißungen dargestellt. Die erste Lage darf höchstens mit 4 mm-Elektroden ausgeführt werden, um einen guten Einbrand e am Scheitel zu erzielen. Wird die Kehlnaht mit der zweiten Lage voll-

endet (*II* links), dann gilt das zur Abb. 155 bezüglich der Elektrodenführung Gesagte. Reichen zwei Lagen nicht aus, um das vorgeschriebene Maß α zu erhalten, so müssen drei und mehr Lagen angeordnet werden, wie das im rechten Teil von *II* veranschaulicht ist. Gerade bei Kehlnähten werden in der Praxis die verschiedensten, z. T. grundlegenden Fehler gemacht, die in *III* und *IV* angedeutet sind. Da ein Durchsacken der Schweißse nicht eintreten kann, neigen die Schweißer manchmal dazu, die Einbrandtiefen e zu übertreiben, wie dies in *III* zum Ausdruck gebracht ist. Soll die Trennfuge zwischen durchlaufendem und Stehblech aus betrieblichen Gründen völlig beseitigt werden, dann zieht man die K-Naht (Abb. 170) vor, bei der der Aufbau der Schweißse sinngemäß erhalten bleibt. Weit häufiger ist der bei f (*IV*) gezeigte Fehler ungenügenden Einbrands, der eine Verkürzung des Maßes α mit sich bringt. Im selben Bild ist bei k auf den Fehler der Schwächung des Blechquerschnitts durch Kerbbildung am Rande der Schweißse hingewiesen. Den Querschnitt der Schweißse, wie er bei unsachgemäßer Elektrodenführung nicht selten anzutreffen ist, gibt i wieder. Die Schweißse ist der Schwere folgend nach unten abgefließen und bei g mit dem Grundwerkstoff unverbunden geblieben. Dadurch wird der Anlageschenkel b_1 länger als b und die Nutzhöhe a im Verhältnis zum Schweißquerschnitt i sehr gering. Man wird aus diesem Grunde anstreben, die Kehlnaht durch zweckentsprechende Drehvorrichtungen in die sog. „Wannenlage“ zu bringen, die das Schweißen erheblich erleichtert und besonders bei schweren Stücken eine gleichschenklige Nahtausbildung sicherstellt. Im Stahlbau wird die Stirnkehlnaht an Gurtlamellen absichtlich mit verlängertem Anlageschenkel b_1 gefordert.

Dünnblechschweißung. Wenn auch die Schweißung dünner Bleche (unter 3 mm) hauptsächlich der Gasschweißung vorbehalten bleiben dürfte, so ist doch in Sonderfällen, vor allem dort, wo ein starkes Verziehen nach Möglichkeit völlig ausgeschaltet werden soll, die Lichtbogenschweißung zu bevorzugen. Die damit verknüpften Schwierigkeiten erfordern allerdings nicht allein ein großes Maß an Erfahrungen, sondern auch Geschicklichkeit und große Handfertigkeit, diese um so mehr, je dünner die Bleche sind. Die untere Anwendungsgrenze dürfte bei 0,75 mm Blechdicke liegen. Dabei sind 3 Verfahren, nämlich die Metall- und Kohlelichtbogen- sowie die Arcatomschweißung möglich.

Die Art der Vorbereitung entspricht den Skizzen *I*...*IV* in Abb. 163. Der Bördelstoß, der für Kohlelichtbogen- und Arcatomschweißung in Frage kommt, ist am leichtesten schweißbar. Sehr schwierig ist demgegenüber das Schweißen ohne jede Unterlage, entsprechend Skizze *III*, so daß man zu geeigneten Unterlagen (wie bei *IV*) greift. Wo der Blechstoß auf einen versteifenden oder tragenden Körper verlegt werden kann, dient dieser als natürliche Unterlage, die mit dem Blech verschweißt wird (*II*). Außerdem ist ein Festhalten der Blechkanten während des Schweißens durch Einspannvorrichtungen, wie Schienen, Spannbügel, Zwingen und anderes gegebenenfalls auch ein punktwises Heften des Stoßes eine die Arbeit erleichternde Maßnahme. Mitunter wird, besonders wenn es sich um längere Nähte handelt, der Pilgerschritt am besten zum Erfolg führen. Werden Metallelektroden verarbeitet, dann entscheidet deren Art die Spaltbreite α , die bei ganz dünnen Blechen gleich Null ist, im übrigen höchstens der Blechdicke entspricht. Dabei ist die Verwendung dickumhüllter Drähte anzuraten, um das Halten des kurzen Lichtbogens zu erleichtern und um auch mit Wechselstrom arbeiten zu können. Für solche Arbeiten hat sich der Schweißgleichrichter als besonders brauchbar erwiesen. Entgegen der sonst üblichen Arbeitsweise wird das Dünnblech an den weniger heißen Minuspol gelegt, und dünne Drähte werden möglichst kurz eingespannt, um ihr starkes Schwingen und Glühendwerden zu verhüten.

Dickblechschweißung. Hierunter sollen Bleche von über 30 mm verstanden werden, die ebenso wie die Dünnbleche eine besondere Vorbereitung und Behandlung erfordern. Für die Gestaltung der Blechränder sind maßgeblich: Blechdicke, die Anordnung der Naht und ihre Zugänglichkeit, sowie das Bestreben, möglichst geringe Mengen Füllwerkstoff einzubringen. Hieraus wurde eine große Anzahl von Vorschlägen abgeleitet, wie U- und Doppel-U-Stöße mit rundem und schrägem Fugengrund, gleich- und ungleichförmige X-Nähte und die Nahtformen der Abb. 164. Diese Steilkantennähte sind heute am gebräuchlichsten, und zwar wegen ihres billigen Zurichtens und weil der Fugengrund für eine Nachbearbeitung der Wurzelseite besser zugänglich ist als bei Doppelstößen. Bei der Grundraupe kann an die Stelle des runden Fugengrundes (Abb. 164 I) ein beiderseitiges Auftragen an den Wurzelrändern im Sinne von II, oder das Anheften eines Blechstreifens, wie bei III und IV gezeigt, treten. Hier fällt beim Aufbau der einzelnen Lagen, das sonst bei Dickblechen häufiger übliche Recken der Schweißlagen mit Preßluftdöppern fort. Durch gleichmäßiges Warmhalten der Naht wird die Ribbildung, die bei Dickblechen fast immer zu erwarten ist, abgewendet. Vorwärmen und Warmhalten auf etwa 200° geschieht zweckmäßig durch mit Leuchtgas gespeiste Heizvorrichtungen, die aus mit kleinen Bohrungen versehenen Gasrohren selbst hergestellt werden können. Um Spannungsrisse zu verhüten, ist schon die erste Lage mit ausreichendem Querschnitt herzustellen, d. h. mit Elektroden von nicht unter 4 mm, besser von 5 mm Durchmesser. Die folgenden Lagen werden bei höher gekohlten Stählen mit 6 mm und nur bei niedrig gekohltem Stahl mit 7...8 mm Elektroden geschweißt.

c) Schrumpfungen und Spannungen.

Allgemeines. Die vom Werkstück aufgenommene Schweißwärme und sein Wiedererkalten, sowie das Zusammenziehen der Naht und der Schweiß selbst haben Schrumpfungen und Wärmespannungen zur Folge, deren Ausmaß möglichst beschränkt werden muß, da sie zur Ribbildung oder zum Bruch des Werkstücks schon während des Erkaltes oder unmittelbar danach führen können. Bleiben größere Spannungen in der geschweißten Konstruktion zurück, dann können sie diese während der betrieblichen Beanspruchung gefährden, wenn auch eine gewisse Selbsthilfe des Baustoffs ausgleichend wirken kann. Für die Gestaltung und Berechnung einer Schweißkonstruktion ist die Kenntnis der Größe, Richtung und Verteilung der zu erwartenden Schweißspannungen wichtig. Mittel, die Entstehung von Spannungen gänzlich zu unterbinden, gibt es nicht, jedoch können sie durch geeignete Maßnahmen vor dem Schweißen, während und nach der Schweißarbeit so stark beschränkt werden, daß sie unschädlich sind. Die Klärung der theoretischen Fragen, die mit den verwickelten Spannungsvorgängen während des Schweißens zusammenhängen, ist trotz vielseitiger und umfassender Forschungsarbeiten¹ leider noch nicht erreicht, was wegen der mit den ungleichen Erhitzungs- und Schrumpfungsvorgängen stark wechselnden Werte verständlich ist.

Schrumpfungen. Die Größe der Schrumpfung hängt, außer von den metallurgischen Eigenschaften des Werkstoffs, in erster Linie ab von der Masse des ein-

¹ Bierett: Versuche zur Ermittlung der Schrumpfspannungen in geschweißten Verbindungen usw. Mitteilungen d. dtsh. Mat.-Prüf.-Anstalt, Sonderheft 25. — Zur Festigkeitsfrage bei der Schweißung fester Baustähle. Elektroschweißg., Heft 9, 1938. — Ermittlung der Schweißspannungen. Stahl und Eisen 1935. — Bollenrath: Eigenspannungen bei der Lichtbogen- und Gasschweißung. Abhandlungen des aerodyn. Instituts. T. H. Aachen 1934, Heft 14. — Lottmann: Schweißen im Schiffbau. Elektroschweißg. 1930, S. 133. — Malisius: Die Schrumpfung geschweißter Stumpfnähte. Elektroschweißg. 1936, S. 1—9.

geschmolzenen Elektrodenwerkstoffs, von der Form des Nahtquerschnitts, der Schweißgeschwindigkeit, der Stromstärke, der Höhe und Gleichmäßigkeit der zugeführten Wärme und von der Wärmeableitung. Für die Schrumpfgeschwindigkeit sind maßgebend: die spezifische Wärme des Werkstoffs, mit deren Höhe die Abkühlungsgeschwindigkeit abnimmt, und die Wärmeleitfähigkeit. Außerdem sind die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs, wie die Streckgrenze, die Zugfestigkeit und der Grad der Verformbarkeit von Einfluß, sowie metallurgische Faktoren, die sich aus dem oft sehr raschen Erkalten der Schweiße dadurch ergeben, daß Verschiebungen der Gefügeumwandlungspunkte und damit Volumenänderungen eintreten, was Ribbildung besonders bei festeren Stählen zur Folge haben kann.

Man hat bei Blechen, auf die sich unsere Betrachtungen beschränken sollen, zwischen Quer- und Längsschrumpfungen zu unterscheiden. Die in Richtung der Blechdicke auftretenden Dickschrumpfungen können ihrer Geringfügigkeit halber unberücksichtigt bleiben. Die Größe der Querschrumpfung, die senkrecht zur Naht liegt, wächst mit der von der Blechdicke abhängigen Fugenbreite und setzt sich aus einer Parallel- und einer Winkelschrumpfung zusammen. Während die Parallelschrumpfung von der Blechdicke weniger abhängig ist, trifft dies im verstärkten Maße für die Winkelschrumpfung zu, da ja die Fugenbreite (v -Naht) und damit die Menge des eingeschmolzenen Werkstoffs über der Nahtbasis erheblich zunimmt. Der eine der Blechsenkel in Abb. 179c

wird beim Erstarren der Schweiße aus seiner ursprünglichen waagerechten Lage (frei bewegliche Bleche vorausgesetzt) um den Winkel α durch Winkelschrumpfung abgehoben. Demnach müßte dieser Teil der Schrumpfwirkungen bei π -, U-, Doppel-U- und X-Stößen geringer sein als bei v -Nähten, besonders dann, wenn beiderseitig gleichzeitig (stehend) oder wechselseitig geschweißt wird. Da dies praktisch immer zutrifft, ist es einer der Hauptgründe dafür, die in Abb. 164 dargestellten Steilkantennähte zu bevorzugen. Es ist wohl verständlich, daß die Winkelschrumpfung um so kleiner sein muß, je gleichzeitiger der Zusatzdraht in den gesamten Nahtquerschnitt eingetragen wird. Dies ist aber eine Forderung, der nur in wenigen Fällen entsprochen werden kann. Demnach wird die Winkelschrumpfung als der Hauptanteil an der Querschrumpfung immer verhältnismäßig groß sein müssen, da ja dickere Bleche stets in mehreren Lagen geschweißt werden müssen und mit der Anzahl der Lagen die Winkelschrumpfung wächst. Sie ist deshalb beim Lichtbogenschweißen auch größer als beim Gasschweißen.

Die Querschrumpfung setzt unmittelbar nach dem Einbringen des Füllwerkstoffs ein, während sich der Blechwerkstoff infolge der aufgenommenen Schweißwärme noch ausdehnt. Während die Schweißnaht selbst noch flüssig oder plastisch ist, muß demnach die Wärmedehnung der inzwischen fest verbundenen Blechteile eine Verengung der Nahtfuge herbeiführen, die in erster Linie für das Gesamtmaß der Schrumpfung bestimmend ist. Die Schrumpfung der Schweiße selbst macht nur etwa 10 vH der durch die Blechdehnung bedingten Querschrumpfung aus.

Da bei der Kehlnaht die Einbrandzone nur einen beschränkten Teil der Blechdicke erfaßt, ist die Querschrumpfung kleiner als beim Stumpfstoß und von der Blechdicke viel weniger abhängig; sie erreicht in der unterbrochenen Naht

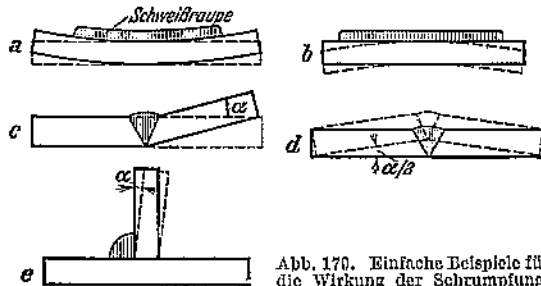


Abb. 170. Einfache Beispiele für die Wirkung der Schrumpfung.

ihre geringsten Werte. Jedoch nähern sich die Schrumpfungswerte ununterbrochener Überlappnähte mehr denen von Stumpfnähten. Zur Verminderung der Quer- und Winkelschrumpfungen sind geringste Wärmezufuhr und ein kleiner Nahtquerschnitt (soweit dies wegen der Kraftübertragung und der Reißgefahr der Wurzellagen möglich ist) anzuraten, wie ja ganz allgemein der Querschnitt aller Nahtarten auf das wirklich notwendige Maß beschränkt bleiben soll.

Die in Richtung der Naht auftretenden Längsschrumpfungen haben ihre Ursache vor allem in plastischen Stauchungen innerhalb der hochoverhitzten Zonen der Bleche. Da der Formänderungswiderstand des Stahls erst unterhalb 650° einsetzt, und dieses Temperaturgebiet bei der Lichtbogenschweißung entlang der Naht nicht sehr breit ist, tritt die größte Stauchung in unmittelbarer Nähe der Naht selbst ein. Das Maß der verhältnismäßig geringen, aber, wie noch gezeigt wird, sehr störenden Längsschrumpfungen bewegt sich in den Größenordnungen von 0,3 mm/m (Nacktdraht) und günstigstenfalls 1 mm/m (Manteldraht); dem gegenüber stehen jedoch hohe Längsspannungen. Die Hilfs- und Spannvorrichtungen zur Vermeidung von Verwerfungen dienen hauptsächlich der Beseitigung der oft sehr unangenehmen Verkrümmungen und Verwindungen, die den Längsschrumpfungen besonders bei langen Schweißnähten zuzuschreiben sind.

Spannungen. Ganz allgemein gesprochen kann man annehmen, daß die Spannung der innere Widerstand eines Körpers ist, den dieser einer äußeren Kraft entgegensetzt, gleichviel, ob sie mechanischer Art ist oder durch Temperaturveränderung veranlaßt wird. Das einfachste Beispiel ist das durch Gewicht belastete Gummiband, das sich so lange dehnen wird, bis die innere Spannkraft des Gummis (Elastizität) der Belastung das Gleichgewicht hält. Die gleichen Vorgänge spielen sich auch im belasteten Eisenstab ab. Untersucht man die Abhängigkeit der Dehnung eines Eisenstabes vom Belastungsgewicht, ein Versuch, den man auf der Zerreißmaschine durchführt, so erhält man ein Spannungs-Dehnungs-Schaubild, auf das wir mit Rücksicht auf die Verwandtschaft mit dem durch Temperaturveränderung bedingten Spannungen hier kurz eingehen und dem Abschnitt „Die Güte der Schweißnaht und ihre Prüfung“ vorgreifen müssen.

Die Beziehungen zwischen Spannung und Dehnung bei Belastung eines Eisenstabes sind in Abb. 180 angedeutet. Die Kurve *a* entspricht weichem, die Kurve *b* gealtertem Flußstahl und die Kurve *c* dem Gußeisen. Aus der Abbildung ist ersichtlich, daß die Kurven *a* und *b* zunächst geradlinig steil ansteigen,

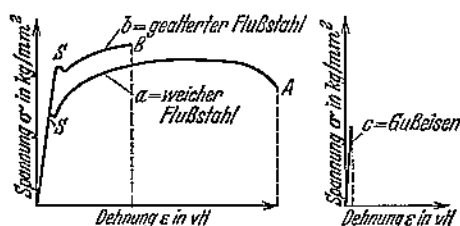


Abb. 180. Beziehungen zwischen Dehnung und Spannung bei Belastung.

dann allmählich, um im Fall *a* schließlich noch wieder etwas abzufallen. Bei *A* bzw. *B* hört die Kurve plötzlich auf, der Stab ist zerrissen. Unterbricht man den Belastungsvorgang im Teile des geradlinig ansteigenden Kurvenastes, indem man die Belastungskraft auf 0 zurückgehen läßt, so wird der Stab auf seine ursprüngliche Länge zurückgehen. Würde man indessen den Zugversuch oberhalb des

Punktes *S* (Streckgrenze) unterbrechen, so ergäbe die Messung eine bleibende Längung des Stabes. Demnach entspricht der geradlinige ansteigende Teil der Abbildung dem Gebiete der federnden Dehnung und die sich daran anschließende Kurve dem Gebiete der bleibenden Dehnung. Da, wie die Kurve *c* zeigt, Gußeisen praktisch gar keine Dehnung hat und auch die Zugfestigkeit viel geringer ist, kann dieser Werkstoff nur sehr viel weniger Spannungen aufnehmen als Flußstahl.

Die Dehnung eines Stabes bezeichnet man mit ε und drückt sie im vH einer bestimmten Meßlänge aus; die Spannung wird mit σ bezeichnet und in kg/mm^2 angegeben. Das Verhältnis $\frac{\text{Dehnung}}{\text{Spannung}} = \frac{\varepsilon}{\sigma} = \alpha$ nennt man die Dehnungszahl. In dem geradlinig ansteigenden Teil der Kurve ist dieses Verhältnis immer gleich derselben Zahl, und zwar hat man durch Versuche festgestellt, daß eine Spannung von 1 kg/mm^2 bei Flußstahl eine Dehnung von $0,0000465 \text{ mm}$ hervorruft. Da diese Zahl sehr klein ist, gibt man vielfach ihren umgekehrten Wert an: $\frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{1}{\alpha} = E$ und nennt diesen Wert Elastizitätsmaß, das allgemein auf kg/cm^2 bezogen wird. Für Flußstahl ist demnach $E = \frac{1}{0,0000465} = 21500 \text{ kg/mm}^2$ oder 2150000 kg/cm^2 . Ist die Dehnung eines Stahlstabes bekannt, so kann die Spannung $\sigma = E \cdot \varepsilon = 2150000 \cdot \varepsilon \text{ kg/cm}^2$ berechnet werden. Wird z. B. auf einen Stahlstab eine Meßlänge von 100 mm aufgetragen und dieser einer Belastung unterworfen, so daß er sich um $\frac{1}{10000} \text{ mm}$ längt, dann ist die Zugspannung $\sigma = E \cdot \varepsilon = (2,15 \cdot 10^6) \cdot (10 \cdot 10^{-5}) = 215 \text{ kg/cm}^2$.

Beim Schweißen werden die Spannungen durch Wärmeausdehnung oder Schrumpfung der Schweiße bzw. des Werkstoffs verursacht. Denkt man sich einen Stab eingespannt, so daß ihm die Möglichkeit sich auszudehnen oder zusammenzuziehen genommen ist, und erwärmt ihn, so müssen durch die Einspannung derartige Kräfte auftreten, daß eine der Wärmeausdehnung zwar gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete Kraft entsteht. Bei einer Wärmeausdehnung werden demnach an den Einspannstellen Druckkräfte, beim Schrumpfen Zugkräfte entstehen. Durch genaue Meßversuche ist man in die Lage versetzt, für jeden Körper seine Längenausdehnung je Grad zu ermitteln. Diese gemessenen Werte bezeichnet man als Längenausdehnungszahlen oder Wärmedehnzahlen. Eisen hat eine Wärmedehnzahl von $1,1 \cdot 10^{-5}$. Erwärmt man einen Eisenstab von 1 m Länge gleichmäßig um 100° , so wächst seine Länge um $1,1 \text{ mm}$. Die Größe der Kraftdehnung, wie die Dehnung des Stabes in der Zerreißmaschine bezeichnet werden soll, war so, daß 1 kg/mm^2 Spannung eine Dehnung von $0,0000465 \text{ mm}$ hervorrief, d. h. also um einen Eisenstab von 1 m Länge um $1,1 \text{ mm}$ zu dehnen, ist eine Kraft von $\frac{1,1}{1000 \cdot 0,0000465} = 23 \text{ kg/mm}^2$ notwendig. Demnach hat man auf Grund der Wärmedehnzahl eine Beziehung zwischen Temperaturgraden und Spannung gefunden. Im Beispiel entspricht eine Erwärmung von 100° einer Spannung von 23 kg/mm^2 , und es würde, um 1 kg/mm^2 Spannung im Stabe zu erreichen, $\frac{100}{23} = 4,3^\circ$ Temperaturveränderung notwendig sein. Bei einer Erwärmung des eingespannten Stabes um etwa 100° würde sich bereits eine Druckspannung ergeben, die zu einer bleibenden Verformung führt.

Hinsichtlich des geschilderten Zugversuchs muß ausdrücklich herausgestellt werden, daß sich diese Verhältnisse nur auf normale Temperaturen beziehen. Im Blaubruchgebiet ($200 \dots 300^\circ$) tritt eine Verminderung der Verformungsfähigkeit bei steigender Festigkeit und Bruchgefahr ein. Da die Streckgrenze im Temperaturgebiet zwischen 600 und 700° erheblich abnimmt, und der Werkstoff gleichzeitig hohe Verformungsfähigkeit aufweist, können merkliche Spannungen erst unterhalb dieser Temperaturen auftreten (600°). Erst hier setzt ein Formänderungswiderstand, die Ursache der Spannungen, ein.

Für das Ausmaß der Schweißspannungen gilt zunächst die grundsätzliche Überlegung, daß die der Erhitzung folgende Schrumpfung frei beweglicher

Körper sehr groß ist, dafür aber die Wärmespannungen sehr gering sind. Umgekehrt wird beim starr eingespannten Körper die Schrumpfung einen Kleinstwert, dagegen die Spannung einen höchsten Wert annehmen. Da nun beim Schweißen selten weder der eine noch der andere Fall allein auftritt, sind die Spannungserscheinungen um so verwickelter, als die Naht, besonders die längere, ja nicht auf einmal gleichmäßig, sondern mit dem Schweißvorgang fortschreitend abschnittsweise erkaltet. Mit anderen Worten sind größere, bereits geschweißte Teile des Schweißkörpers, obwohl sie an sich frei beweglich sein mögen, als eingespannt zu betrachten; es bilden sich ständig wechselnde Spannungsfelder. Daraus ergibt sich auch die Folgerung, daß die Einspannvorrichtungen, die das Verwerfen oder Verkrümmen des geschweißten Körpers beseitigen sollen, eine höhere Restspannung verursachen, während andererseits diese ungewollten Verformungen der Konstruktion praktisch nicht in Kauf genommen werden können, obwohl hierdurch die Spannungen abgebaut würden. Allerdings ist eine so starre Einspannung, die eine vollkommene Unterdrückung des Schrumpfens bewirken könnte, nicht zu erreichen. Auch die Tatsache, daß sich erhitze Bleche beim Erkalten mehr zusammenziehen als sie sich ausdehnten, da meist eine Stauchwirkung auftritt, ist die Ursache zurückbleibender Spannungen. Alles in allem ist demnach ein spannungsfreies Schweißen, so sehr es zu begrüßen wäre, praktisch unmöglich.

Größe und Verteilung der Schrumpfspannungen (Zug und Druck) im Gesamtfeld der Bleche können, schon auf Grund der Schweißgeschwindigkeit, in weiten Grenzen wechseln, nur müssen sie, um den Gleichgewichtsbedingungen zu genügen, in jeder Kräfte richtung summarisch gleichwertig sein. In der Naht herrschen in Längsrichtung Zugspannungen, weil ja die in dieser Richtung eingespannten Bleche selbst am völligen Einschrumpfen behindert wurden. In der Nahtmitte tritt die Zugspannung am stärksten auf und sie nimmt nach den Blechenden zu ab, während sich außerhalb der Naht Druckspannungen vorfinden. Die Verteilung der mit den Längsspannungen im Gleichgewicht stehenden Querspannungen ist vor allem von der Schweißgeschwindigkeit und davon abhängig, ob in einem Zuge, also durchlaufend, oder unterbrochen geschweißt wird. Das kommt in Abb. 181, die die Verteilung der Querspannungen über die Nahtlänge

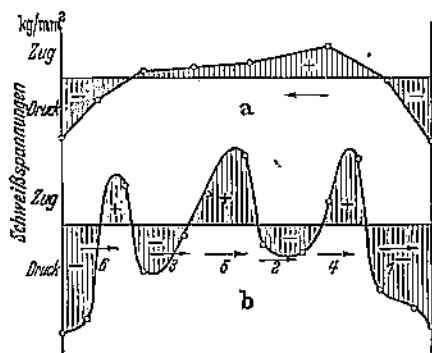


Abb. 181. Querschrumpfungen einer 600 mm langen Schweißnaht (V-Stoß) an 12 mm Blech.

veranschaulicht, sinnfällig zum Ausdruck. In der bei *a* durchlaufend geschweißten Naht besteht im mittleren Gebiet Zug, der bei langen Nähten fast gleich Null werden kann, an den Enden herrscht Druck. Die erheblichen Druckspannungen der Nahtenden sind als eine natürliche Sicherung aufzufassen, da eine solche Naht günstiger beansprucht ist als eine unter Zugspannung stehende. Diese Druckspannungen an den Nahtenden sind immer vorhanden, auch bei einer unterbrochenen, und zwar sprungweise geschweißten Naht *b* (Pfeile). Entsprechend den einzelnen Schweißabschnitten wechseln Zug und Druck

häufig und erreichen oft höhere Werte als bei der laufend geschweißten Naht. Daraus läßt sich der Schluß ziehen, daß der unterbrochenen Naht nicht immer das Wort gesprochen werden kann und daß sie folgerichtig angeordnet werden muß.

Die Längsschrumpfspannungen einer Naht sind um so größer, je schmaler die beiderseitigen Erhitzungszonen sind, je weniger verformbar der Werkstoff, also je fester er ist, und wenn er zur Härtung neigt. Demnach sind diese Spannungen in mit Nacktelektroden geschweißten Nähten in erhöhtem Maße zu erwarten, und sie können bei größeren Werkstoffdicken und in ungünstig gelagerten Fällen die Ursache von Nahtquerrissen sein. Breitere Erhitzungszonen können in gewissen Grenzen vorteilhaft sein. Die richtige Schweißfolge, Art und Größe der Wärmezufuhr, Wahl der Elektrodenart, die für die Rißsicherheit, gegen Verwerfungen und für geringste Restspannungen erforderlichen Maßnahmen in einem logisch durchdachten Schweißplan vor Arbeitsbeginn zu entwickeln, gehört zweifellos zu den dankbarsten, aber auch schwierigsten Arbeiten des Schweißfachingenieurs. Das erhellt schon daraus, daß die Spannungswerte fast immer die Streckgrenze des Werkstoffs erreichen und beim mehrachsigen Spannungszustand sogar weit überschreiten können, was allerdings zur Überschätzung der Spannungsgefahren keinen Anlaß geben sollte, da ganz ähnliche Verhältnisse auch beim Walzen und anderen Fertigungsverfahren auftreten. Dem kommt auch die Selbsthilfe eines genügend verformungsfähigen Werkstoffs entgegen, worunter man einen teilweisen Abbau der Spannungen durch ausgleichende Betriebsspannungen zu verstehen hat, d. h. die innere Spannung der Naht wird von den gefährdeten Stellen hoher Spannungsspitzen zu weniger gefährlichen Stellen abgedrängt. Spannungsspitzen, die durch Wärmestauung und das hiermit verknüpfte große Temperaturgefälle, besonders in der Längsrichtung elektrisch geschweißter Nähte auftreten, gefährden die Sicherheit der Konstruktion nur mittelbar, da sie, wie betont, erfahrungsgemäß während des Betriebes abgebaut werden. Das hat seine Ursache in einer Reckung, die durch äußere Belastung der Konstruktion über die Streckgrenze hinaus eintritt; der gereckte Werkstoff nimmt dann den ursprünglichen Spannungsanteil nicht mehr auf.

In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, daß auch Blasen oder größere Poren, besonders dann, wenn sie scharfe Kanten und Ecken besitzen, also nicht kugelig sind, am Lochrande Spannungsspitzen verursachen, deren Höchstwert den der mittleren Spannungen um ein Mehrfaches übersteigt. Daß mit der Verringerung des Schweißquerschnitts durch Porenanteile eine proportionale Festigkeitsabnahme Hand in Hand geht, ist kaum zweifelhaft, dagegen können sie u. U. die Kerbschlagzähigkeit erhöhen.

Daß die richtige Erkenntnis der inneren Spannungen für die Betriebssicherheit der Schweißkonstruktion sehr wichtig ist, steht außer Zweifel. Vorübergehende Bedenken sind dadurch praktisch widerlegt worden, daß die Erfahrung lehrt und Versuche bewiesen haben, daß, zumindest bei Stumpfnähten, durch die Schrumpfspannungen im allgemeinen weder der statischen noch der Dauerfestigkeit Abbruch getan wird. Die schon erwähnten günstigen Druckspannungen an den Stumpfnähtenden können sogar zur Erhöhung der Dauerfestigkeit beitragen.

Der natürliche Spannungszustand, wie er sich beim Schweißen uneingespannter, mithin ursprünglich frei beweglicher Bleche ergibt, wird durch weitere Spannungsfelder dann überlagert, wenn die Bleche auf einer starren Unterlage oder sonstwie so fest eingespannt werden, daß sie den Schrumpfkraften nur sehr wenig nachzugeben vermögen. Die Folge sind hohe Zugkräfte, die mitunter die ganze Nahtlänge in bedenklicher Weise erfassen.

Da bei Kehlnähten, auf Grund der sehr ungünstigen Einspannverhältnisse, das Ausdehnen und Schrumpfen der Schweiße unter starker Behinderung in Längs- und Querrichtung erfolgt und wahrscheinlich der weitaus größte Teil der Naht einen hohen räumlichen Spannungszustand aufweist, sind sie gegenüber der Stumpf-

naht offenbar erhöhter Rißgefahr ausgesetzt. Diese Fragen sind zur Zeit noch wenig geklärt.

Hilfsmaßnahmen gegen Spannungserscheinungen. Grundlegende Maßnahmen sind wiederholt genannt worden, wie geringe Nahtquerschnitte, einwandfreie Vorbereitung der Blechränder, möglichst steile Schweißkanten, Vermeidung unnütz hoher Wärmezufuhr, abschnittsweises Schweißen usw. Bei Anwendung von Hilfs- und Abwehrmitteln muß man sich darüber im klaren sein, daß das eine meist nur auf Kosten des anderen erreichbar ist. Entweder man beläßt den Werkstücken freies Bewegen und nimmt Maß- und Formveränderungen, wie Verwerfung und Verkrümmung bei gleichzeitig geringen Spannungsverhältnissen in Kauf, oder man spannt sie mehr oder weniger starr ein, vermeidet Verformung und rechnet mit erhöhten inneren Spannungen, die nur durch Spannungsfreiglühen zuverlässig zu beseitigen sind. Diese für den Abbau der Spannungen sehr wichtige Maßnahme kann jedoch nur an geschlossenen und räumlich nicht allzu großen Körpern getroffen werden; bei offenen Bauteilen, z. B. bei Stahlbaukonstruktionen, verbietet sie sich von selbst. In den Fällen, in denen es vor allem darauf ankommt, Verwerfungen zu verhindern, z. B. bei Blechen aus St 37/42, wird man erhöhte Spannungen als unschädlich hinnehmen können und eingespannt schweißen, während man bei tragenden Bauwerken (Stahlhoch- und Brückenbau) hohe Spannungen möglichst vermeiden muß und dafür rechnungsmäßig berücksichtigte Schrumpfungen zulassen kann.

Die in jedem Einzelfalle anders gelagerte Schrumpfwirkung bedingt, soll sie auf das praktische kleinste Maß gebracht werden, langjährige und umfangreiche Erfahrungen. Ein vielangewandtes Mittel sind das Pilgerschritt- und das abschnitt- oder sprungweise Schweißen, deren Grundgedanken in Abb. 182 veranschaulicht sind. *a* zeigt die durchlaufende (in einem Zuge) geschweißte, *b* die nur bei Kehlnähten übliche unterbrochene Naht. Der Pilgerschritt *c* beginnt bei 1 und endet bei 6, wobei das Pfeilende den Beginn und die Spitze das Ende der jeweiligen Schweißstrecke andeuten. Beim sprungweisen Schweißen *d*, werden bereits geschweißte Strecken nach rückwärts überholt. Das im Sinne von *a* geschweißte dünne Blech wird

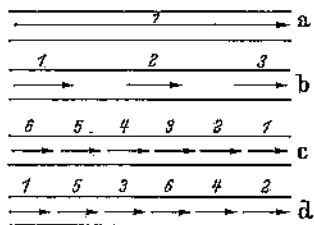


Abb. 182. Schweißfolge bei Stumpf- und Kehlnähten.

zweckmäßig vorher geheftet, was für die Nähte *c* und *d* wegfällt.

Einige Beispiele der Abb. 179 führen die Wirkung von Winkel- und Längsschrumpfungen vor Augen. Sowohl Längs- wie Querschrumpfungen können entweder durch Einspannen des Werkstücks oder durch dem Schweißen vorausgehendes Überstrecken oder auch durch Vorgabe auf ein geringes Maß gebracht werden. Beide Maßnahmen haben den Zweck, die Werkstücke vor dem Schweißen so zu verformen, oder die Blechränder von der gewollten Lage abweichend so zueinander anzuordnen, daß sie nach dem Schrumpfen in die richtige Stellung selbsttätig zurückgehen.

Um die auftretenden Verwindungen und Änderungen der Maßhaltigkeit der Körper möglichst gering zu halten, werden bei Blechen größerer Abmessungen Zuschläge beim Zuschnitt gegeben, die z. B. im Schiffbau durch praktische Versuche mit etwa 1,8 mm für Querschrumpfung an 5...12 mm dicken Blechen ermittelt wurden. Die viel geringere Längsschrumpfung ergab nach Lottmann einen Durchschnittswert von 0,35 mm/m. Im Fahrzeugbau rechnet man mit 1...1,3 mm/m. Diese Mittelwerte können je nach den vorliegenden Betriebs-

verhältnissen und durch die wiederholt angegebenen Faktoren Änderungen erfahren. Deshalb ist es auch schwierig, bindende Zahlen dafür zu geben, inwieweit man Formänderungen durch vorherige Richtungsabweichung der Blechstöße begegnen kann. Bei *a* (Abb. 179) ist gezeigt, wie bei einer Auftragsschweißung durch Schrumpfen eine in Richtung der Schweißung auftretende Biegung des Bleches eintritt, der man durch eine Vorbiegung des Bleches, wie bei *b*, in entgegengesetzter Richtung entgegenwirken kann. Die gestrichelten Linien zeigen den Vorbereitungszustand, die ausgezogenen den Zustand des Bleches nach vollendeter Schweißung an. Beim *v*-Stoß *c* bewirkt die Schrumpfung ein Aufbiegen der Bleche von der Ausgangslage um den Winkel α . Die Verformung kann man ausgleichen, indem nach *d* die Bleche in einem solchen Winkelschlage schräg zueinander gelegt werden, der der zu erwartenden Winkelschrumpfung entspricht. Das gleiche gilt für eine Kehlnaht entsprechend dem τ -Stoß in Skizze *e*. Bei *x*-Nähten heben sich die Formabweichungen praktisch gegenseitig auf, wenn auf beiden Seiten abwechselnd geschweißt wird. Über diese grundlegenden Hilfsmaßnahmen hinaus wird man besonders bei zusammengesetzten Konstruktionen auf eine feste Einspannung der Einzelteile nicht verzichten können. Hier sind zweckmäßige Verteilung der Nähte und Schweißen in Abschnitten zu empfehlen. Wo eben zugänglich, sollten Nahtanhäufungen und -überschneidungen vermieden werden, besonders bei rißempfindlichen Werkstoffen. Hohe Schweißgeschwindigkeit und nicht zu hohe Stromstärke werden meist das angestrebte Ziel besser zu erreichen helfen.

Da ja bei jeder Warmbehandlung eines Werkstücks mit größeren Formveränderungen zu rechnen ist als beim Bearbeiten bei Raumtemperatur, sind alle Schweißungen, soweit dies die Fertigung überhaupt zuläßt, vor der endgültigen maßhaltigen Bearbeitung des Werkstücks auszuführen und entsprechende Bearbeitungsanschläge zu berücksichtigen.

Die nach dem Ausbau aus Einspannvorrichtungen auftretende geringe Verformung des Werkstücks (Rückfedern) wie auch die bei uneingespannten Teilen meist zu erwartenden größeren Formveränderungen können in vielen Fällen durch Nachrichten beseitigt werden. Dabei ist die Art des Nachrichten, ob kalt oder warm, von ausschlaggebender Bedeutung. Erhitzen mit einer Flamme (Schweißbrenner) hat immer eine Verkürzung der Stelle durch Zusammenziehen zur Folge, Warmhämmern wirkt ihr durch Reckung (Strecken) entgegen. Entscheidend sind die Lage der zu richtenden Stelle und die Werkstoffdicke. Hämmern allein kann nur durch Strecken, mithin nur bei dünnen Blechen Zweck haben; verwundene Flächen werden geglättet. Wesentlich wirksamer, aber viel vorsichtiger anzuwenden ist das örtliche Erhitzen, durch das auch die dicksten Werkstücke gerichtet werden können. Soll z. B. der in Abb. 179 bei *a* skizzierte Körper, der nach der Raupenseite hin durch Schrumpfung durchgebogen, also verkürzt ist, ausgerichtet werden und reicht ein Hämmern wegen der Werkstoffdicke nicht aus, oder handelt es sich um einen rohrförmigen oder sonstwie gestalteten Hohlkörper, dessen Inneres für den Hammer nicht zugänglich ist, dann streicht man mit der Flamme auf der Gegenseite (von unten) einige Male hin und her und überläßt den Körper der natürlichen Abkühlung. Zieht er sich nach völligem Erkalten nicht auf das gewünschte Maß zurück, dann wird die Erwärmung kurz wiederholt. Dieses Verfahren läßt sich sinngemäß auf zahllose ähnliche Fälle übertragen.

Bekannt ist, daß dünne Verkleidungsbleche, auch ungeschweißte, aber bereits eingebaute, beispielsweise an Fahrzeugen und Maschinengestellen, durch sog. Punktieren mit der Flamme ohne Hämmern gerichtet werden. Es beruht darauf, wellige Stellen der Blechtafeln mit einer Schweißflamme senkrecht kurz zu erhitzen

und sie durch Schrumpfung völlig zu glätten. Die Stauchung der erhitzten Stelle kann u. U. bei fester Unterlage durch Hämmern unterstützt werden.

Rißgefahr. Sie ist eine der übelsten Begleiterscheinungen beim Schweißen und tritt vor allem bei Stählen von höherer Festigkeit auf. Ihre Ursache liegt in metallurgischen und physikalischen Eigenschaften der Schweiße selbst und ihrer Übergangszonen im Baustoff. An erster Stelle steht die Schweißempfindlichkeit des Werkstoffs an sich, die bei Baustählen niedriger Festigkeit, z. B. bei St 37 nur dann zu erwarten ist, wenn die Gehalte an Stickstoff, Schwefel oder Phosphor das übliche Maß übersteigen (Thomasstahl) und außerdem ungünstige Schweißbedingungen hinzukommen. Hinsichtlich des Kohlenstoffgehalts werden zur Härtung neigende Stähle, z. B. St 52 und solche mit über 0,15 vH C, diese Empfindlichkeit zeigen. Es bilden sich in unmittelbarer Nähe der Naht harte Übergangszonen, meist in Verbindung mit hohen Spannungen. Die Gefahr der Rißbildung ist um so größer, je schmaler die Erhitzungszone ist. Die Risse, die ihren Ausgang von den Härtungszonen (u. U. Ausscheidungshärtung) nehmen und besonders bei St 52, 70, 120 usw. auftreten, können sich bereits nach Beendigung der Schweißung einstellen, oft auch erst bei geringen äußeren Belastungen. Bauart, Werkstoffdicke und Lage der Nahte sind hierbei von Bedeutung.

Auch die Schweißnahttrißempfindlichkeit hängt mit den Eigenschaften des Baustoffs, daneben aber auch mit denen des Elektrodenwerkstoffs zusammen. Die Risse treten in der Naht selbst auf und beschränken sich auf die Schweiße, während sie im ersten Falle von der Härtungszone ausgingen und weit in den Baustoff hinein verlaufen können. Meist handelt es sich dabei um ausgesprochene Warmrisse, die sich bereits während des Schweißens in höheren Temperaturgebieten (oberhalb 600°) bilden, teilweise jedoch im Blaubruchgebiet zwischen 200 und 300°, also in einem Temperaturabschnitt verringerter Formänderungsfähigkeit. Besonders gefährdet sind die ersten Lagen, d. h. die Wurzelnaht und schwache Kehlnähte. Man wird deshalb versuchen, die Rißbildung dadurch abzuwenden, daß man einmal einen weniger empfindlichen Draht verwendet und daneben auch einen solchen genügender Dicke. Mit anderen Worten soll bereits die erste oder auch einzige Lage einen genügend großen Querschnitt ergeben, was die Verwendung dickerer Elektroden bedingt und scheinbar zu den früheren Angaben im Widerspruch steht. Es war jedoch darauf hingewiesen worden, daß für die Schweißung rißempfindlicher Stähle Ausnahmen gelten.

Die dritte Abart ist die Schweißrissigkeit einiger legierter Stähle. Die Risse treten neben der Naht, d. h. entlang dem Übergang auf, und zwar besonders an geringen Querschnitten von Stählen höherer Festigkeit, z. B. bei Chrom-Molybdän-Stählen, wie sie bevorzugt im Flugzeugbau verwendet werden. Die Schweißrissigkeit steigt mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt und wird durch die Gegenwart von Phosphor, Schwefel und Sauerstoff begünstigt. Die Rißbildung ist vor allem von der Abkühlungsgeschwindigkeit abhängig. Schroffe Abkühlung führt zur Versprödung und ist dringend zu vermeiden bzw. durch entsprechende Wärmemaßnahmen zu verzögern. Als zweckmäßige Gegenmaßnahmen sind anzusehen: Keine Nahtanhäufungen, möglichst keine Nahtüberschneidungen, nicht nachschweißen.

Die Ursachen der Schweißrissigkeit sind trotz vielseitiger Forschungsarbeiten noch nicht geklärt. Eine Erklärung für die Warmrisse scheint die zu sein, daß durch Wasserstoff ein Aufsprengen der Korngrenzen auftritt und Risse im Blech auf die Bildung spröder Martensitfelder zurückzuführen sind. Bei der Warmrissigkeit der mit dickummantelten Drähten geschweißten Verbindungen kann ferner die Störung der Ausbildung des Kristallisationsgefüges beim Erstarren der

Grund sein. Eine weitere Ursache ist im ungleichmäßigen Wärme fluß bei Kehlnähten zu suchen, wodurch erhebliche Schubspannungen von der Naht aufgenommen werden müssen. Vor allem treten Risse bei dünnflüssigem Drahtwerkstoff auf, also bei planen oder konkaven Nähten.

Zur Abwendung der Rißgefahr ist eine wohlbedachte Wärmemaßnahme immer das beste Gegenmittel. Der Schweißer muß sich unter allen Umständen von dem althergebrachten Spruch „Stemmen, Verkitten und Verlöten hilft dem Schweißer aus allen Nöten“ freimachen. Die Wärmemaßnahmen können sein: Vorwärmen, Warmhalten, Nachwärmen. Die Vorwärmung auf $200 \cdots 300^\circ$ ist eine der erfolgreichsten Maßnahmen. Werden nur die der Schweiß angelagerten Zonen örtlich vorgewärmt, dann ist ein Heften der Nähte ratsam, da immer mit einem Verwinden des Körpers zu rechnen ist. Ganzes Erwärmen des Werkstücks

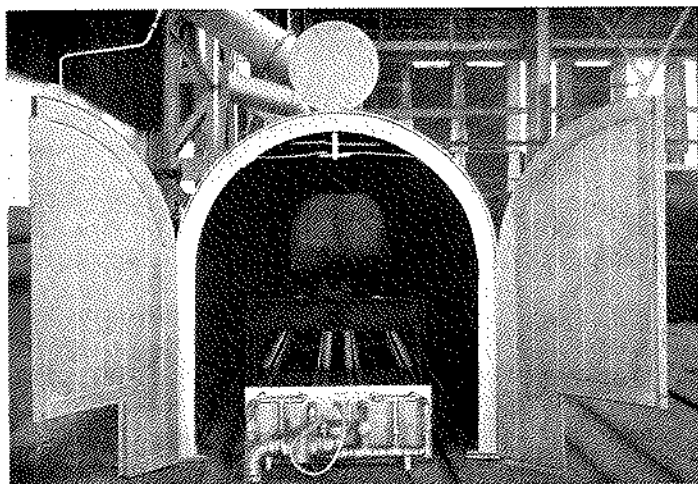


Abb. 183. Gasbeheizter Vorwärmofen für größere Werkstücke.

in einem Vorwärmeofen ist in jedem Falle vorzuziehen; dabei kann das Heften weggelassen, jedoch ist es zweckmäßig, das Werkstück mit den Einspannvorrichtungen in den Ofen einzubringen. Die durch die schwierigere Beförderung erhitzter Körper und durch verminderte Schweißleistung um etwa 20 vH bedingten Mehrkosten werden durch den besseren Erfolg der Arbeit ausgeglichen. Einen Tunnelvorwärmeofen von 8500 mm Baulänge und 1400 mm Breite, der durch zwei Brennerbatterien beheizt wird, veranschaulicht Abb. 183. Als Wärmequelle dient Leuchtgas, das in 200 Brennerköpfen der $1\frac{1}{4}$ " Gasrohrschlange verbrannt wird. Der Hohlraum des doppelwandigen, für 200° bestimmten Ofens ist zum Wärmeschutz mit Schlackenwolle isoliert.

Die Abkühlungsgeschwindigkeit ist abhängig von der Wärmeleitzahl des Werkstoffs, dessen Masse und der Ausgangstemperatur beim Schweißen. Um sie zu verringern und die Rißgefahr abzuwenden, ist es oft notwendig, die bereits geschweißten Nahtstrecken auf $150 \cdots 200^\circ$ warm zu halten und die entstehenden vorzuwärmen. Geeignete Heizvorrichtungen sind dem jeweiligen Fall anzupassen und so anzusetzen, daß sie die Arbeit des Schweißers möglichst nicht behindern. Als Beispiel einer solchen vorbildlichen Heizvorrichtung mag Abb. 184 gelten, die einen aus Sieromal hergestellten und geschweißten Behälter darstellt, in dessen

Rohrboden etwa 200 Rohre aus dem gleichen Werkstoff eingeschweißt werden sollen.

Das Nachwärmen des fertigen Werkstücks auf höhere Temperaturen wird angewandt, um ungleiche Spannungsverhältnisse in den Nähten zu beheben.

Darüber ist unter „Spannungsfreiglühen“ einiges ausgeführt.

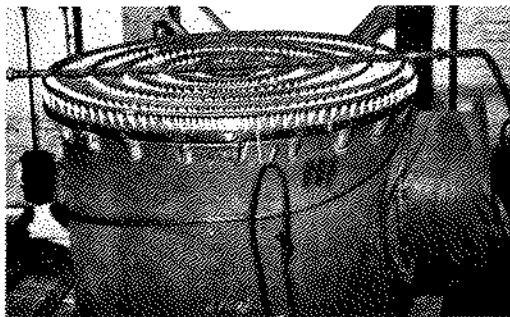


Abb. 184. Leuchtgasheizvorrichtung für Schweißnähte.

d) Nachbehandlung und Vergütung der Stahlschweiße.

Nachbehandlung. Unter Nachbehandlung der Schweiße sollen einige mechanische Arbeiten ohne Wärmeaufwand verstanden sein, die eine Reinigung und Verbesserung der Nahtoberflächen zum Zwecke haben. Die beim Arbeiten mit Nacktdraht anfallenden Oxydhäute und Spritzer, sowie die dünne Schlackenhaut, die beim

Verschweißen dünnumhüllter und Seelenelektroden gebildet wird, werden mit einer Stahldrahtbürste oder der Schneide eines Flachmeißels ohne Benutzung eines Hammers entfernt. Das Festbrennen der Spritzer kann durch Bestreichen der Nachbarzonen der Naht mit Kalkmilch vermieden werden. Daß diese Verunreinigungen auch während des Schweißens der einzelnen Lagen durch Bürsten und leichtes Hämmern sorgfältig zu entfernen sind, um Einschlüsse von Schlackennestern zu verhüten, ist selbstverständlich. Die beim Schweißen mit dickummantelten Drähten niedergeschmolzene Schlackendecke, die beim Erstarren oft selbsttätig abspringt, wird durch leichtes Schlagen mit dem Pickhammer gelöst und dann mit der Drahtbürste restlos entfernt. Dabei sind Oberflächenbeschädigungen, insbesondere aber Kerben unbedingt zu vermeiden. Das Auge hat sich an das Aussehen einer gleichmäßigen und formenschönen Schweißnaht ebenso gut einzustellen vermocht wie auf eine Nietnaht, so daß eine Nachbearbeitung der Raupen aus Schönheitsgründen nicht notwendig ist. Eine Nachbearbeitung ist vielmehr nur insoweit erforderlich, als es ein gutes und lückenfreies Haften des Farbanstriches — falls er überhaupt in Frage kommt — verlangt. Wenn bei auf Dauerfestigkeit hochbeanspruchten Nähten zur Erhöhung der Festigkeit und Sicherheit durch Ausgleich der Werkstückübergänge hin und wieder eine Nachbehandlung als ratsam erscheint, so kann dies keineswegs verallgemeinert werden. Auf die Wichtigkeit der Vermeidung von Längs- und Wurzelkerben wurde wiederholt hingewiesen. Namentlich im Brückenbau werden mitunter kerbenfreie und allmähliche Übergänge zwischen Schweißraupen und Baustoff durch Schleifen hergestellt.

Vergütung. Unter Vergütung soll ausschließlich eine thermische und mechanische Nachbehandlung der fertigen Naht verstanden sein, die sich auf eine Verbesserung des Gefügebauwes und auf die Beseitigung von Spannungen oder auf beides gemeinsam erstreckt. Dabei lassen sich verständlicherweise Schlackeneinschlüsse, Pastennester und Sauerstoffeinschlüsse nicht beseitigen, wohl aber die aufgenommenen Stickstoffmengen herabsetzen. Die Vergütung bezweckt, technologisch gesehen, eine Verbesserung der Dehnung, also der Verformbarkeit, der Kerbschlagzähigkeit und Dichte der Schweiße. Hierfür kommen praktisch nur zwei Mittel in Betracht: Wärmebehandlung und Hämmern. Die bei austeni-

tischen Stählen durch Abschrecken mögliche Vergütung soll vorerst unberücksichtigt bleiben.

Gefügebau der Schweiße. Jede unvergütete Schweiße zeigt ein ausgesprochenes Gußgefüge, dessen grobes Korn von verschiedenen Bedingungen, hauptsächlich von der Abkühlungsgeschwindigkeit, abhängig ist. Roh betrachtet sind im geätzten Querschliff einer Schweiße verschiedene Zonen zu erkennen, in erster Linie eine Schmelz- und eine Wärmeinflußzone. Abb. 185 soll dies veranschaulichen. Werden dünnere Bleche im $\perp$ -Stoß miteinander verschweißt, dann ergibt sich folgendes Bild: Die Blechkanten sind aufgeschmolzen und im Querschnitt der eigentlichen Schweiße mit dieser vermenegt. Innerhalb von d besteht eine Zwischenlegierung von Mutterwerkstoff a

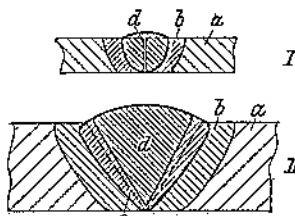


Abb. 185. Schmelz- und Wärmezonen einer Schweißnaht.

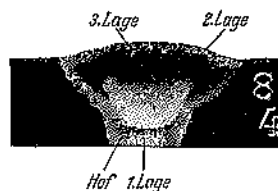


Abb. 186. In 3 Lagen geschweißte V-Naht.

und Elektrodenwerkstoff. Wird ohne Zusatzdraht, z. B. mit dem Arcatomlichtbogen oder mit der Kohlelektrode gearbeitet, dann ist in d lediglich der umgeschmolzene Werkstoff a vorzufinden. Streifen b ist der „Hof“, das ist der Bereich, innerhalb dessen eine so hohe Wärmeableitung von der Naht her stattfand, daß eine Umkristallisation des angrenzenden Mutterwerkstoffs a eintrat. Andere Verhältnisse liegen bei dickeren Blechen, z. B. in der v-Naht Abb. 185 II vor. Hier tritt noch ein Zwischengefüge (c) hinzu. a ist wiederum der Mutterwerkstoff und d der umgeschmolzene Elektrodenwerkstoff; beide bilden in der Zone c eine Zwischenlegierung, die sich auf die Tiefe des Einbrandes auswirkt. b ist der Hof, der im Makroschliff der v-Nähte (Abb. 186 und 187) deutlich sichtbar ist.

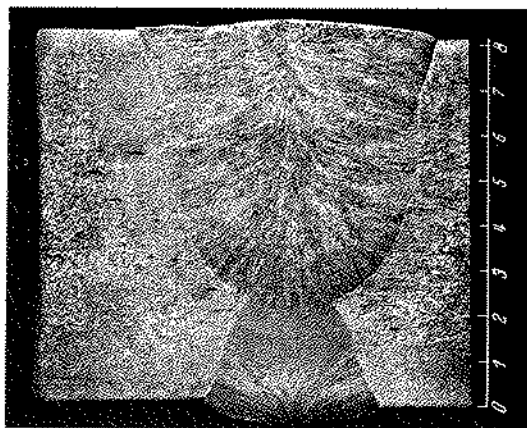


Abb. 187. Makroschliff einer Dickblechschweißnaht.

Eine von der Schweißdauer und dem Drahtdurchmesser abhängige Vergütung der Schweiße ist bereits durch die Glühwirkung der jeweils folgenden Lagen zu erzielen. Die Dreilagenschweiße (Abb. 186) läßt erkennen, daß die untere und die Zwischenlage (2.) durch die dritte, die Decklage, durch Ausglühen eine Gefügeverfeinerung erfahren haben. Die oberste Lage wird entsprechend dem stärksten Wärme- fluß immer das größte Korn im Schliffbild aufweisen. Die Mehrlagenschweißung hat außerdem den Vorteil, daß die zum Spannungsfreiglühen erforderlichen Temperaturen in den unteren Lagen erreicht und damit größere Spannungen ausgeglichen werden. Diese Glühwirkung ist auch an der Kornverfeinerung der unteren zuerst geschweißten Lage der in Abb. 187 wiedergegebenen, nach dem Elliravverfahren hergestellten Dickblechnaht zu ersehen. Die im übrigen eine

Rohschweiße darstellende Naht läßt zwar ein stengeliges Gefüge, an den Oberflächen aber ein auffallend kleines Korn erkennen, was auf die Wirkung der sehr dicken Schlackendecke zurückzuführen ist.

Betrachtet man den Kristallaufbau einer Schweiße an Hand der Darstellung Abb. 188, so ergibt sich folgendes Bild: Die linke Hälfte zeigt das nicht nachbehandelte Gefüge, also die Rohschweiße, die rechte Bildhälfte das Gefüge einer nachgeglühten und gehämmerten Schweiße. Es handelt sich um eine

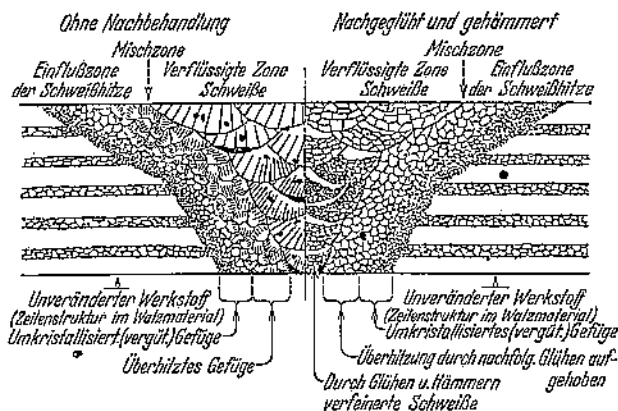


Abb. 188. Darstellung des Gefügeaufbaues einer Schweiße.

schließlich in den durch den Schweißvorgang unverändert gebliebenen Grundwerkstoff auszulaufen. In der rechten Bildhälfte ist dagegen ein durch Glühen und Hämmern verfeinertes Schweißgefüge dargestellt und die in der Einflußzone der Schweißhitze entstandene Überhitzung aufgehoben. Allerdings ist praktisch der Übergang vom Gebiete der Umkristallisation zum Mutterwerkstoff im allgemeinen nicht so schroff, vielmehr verläuft er ganz allmählich.

Vergütungsfähigkeit der Schweiße. Ob eine Elektroschweiße geglüht und gehämmert werden kann oder nicht, ist im allgemeinen von der verwendeten Elektrodenart abhängig. Da ein Hämmern der Naht — vom Ansrichten abgesehen — nur dann von Bedeutung sein kann, wenn es an der erhitzten Schweiße durchgeführt wird, kann man natürlich ein zum Rotbruch neigendes, mithin auch schlecht-schmiedbares, durch höheren Sauerstoff- und Stickstoffgehalt gekennzeichnetes Schweißgefüge nicht hämmern. Dagegen wird eine Vergütung der mit hochwertigen Elektroden hergestellten Schweißen durch Glühen und Hämmern immer Erfolg haben. Ein Ausglühen mit Nacktelektroden hergestellter Nähte wird praktisch keinen Erfolg zeitigen, wenigstens nicht im Sinne einer Gefügeverbesserung.

Spannungsfreiglühen. Der Zweck einer solchen Glühbehandlung der fertigen Schweiße kann nur der im Namen liegende sein: die Beseitigung von Spannungen. Metallurgische Verbesserungen des Gefüges sind hierbei nicht zu erwarten. Zum Spannungsfreiglühen genügt eine Temperatur von $600 \cdots 650^\circ$, wobei eine bestimmte, von der Masse des Körpers abhängige Glühdauer (bei 600° 1 h je 25 mm Werkstoffdicke) und gleichmäßiges Erhitzen und ebenso gleichmäßiges und langsames Erkalten des Werkstücks Bedingung sind. Eine zuverlässige Beseitigung der inneren Werkstoffspannungen ist demnach bei ungleichem Erhitzen nicht zu erreichen, woraus sich von selbst ergibt, daß das Glühen mit der Schweißflamme nur eine sehr fragliche Wirkung hat. Diese Art des Spannungsfreiglühens ist nur als ein Behelfsmittel aufzufassen, das außerdem nur rein örtlich wirken kann.

Ein notgedrungenener Anwendungsfall ist z. B. das Glühen geschweißter Rohrrundnähte an Fernleitungen größeren Durchmessers, wobei jedoch an die Stelle des Einflammenbrenners ein Mehrflammenringbrenner tritt. Ganz allgemein gesprochen sind Form und Abmessungen des Werkstücks für die Möglichkeit des Spannungsfreiglühens ausschlaggebend. Das Glühen sperriger und offener Konstruktionen (z. B. Hochbau- und Brückenteile) verbietet sich von selbst. In Betrieben, die laufend Schweißungen in größerem Umfange an hochbeanspruchten Bauteilen ausführen, empfiehlt sich die Aufstellung eines Glühofens mit guter Temperaturregelung, in den auch größere Bauteile eingebracht werden können. — Im Temperaturgebiet dicht über 700° spricht man von einem Weichglühen. Hierbei handelt es sich um die Umwandlung des streifigen in den weicheren körnigen Perlit, also schon um eine Veränderung des Gefügebauaufbaus.

Normalisieren. Die wertvollste Glühbehandlung ist das Normalglühen oder Normalisieren, das gemäß dem Eisen-Kohlenstoff-Schaubild (Abb. 22) oberhalb der Linie *GOS* (Ac_3 -Punkt), also in einem Temperaturgebiet über 720° erfolgen muß. Glühtemperatur und Glühdauer sind vom Kohlenstoffgehalt des Stahls abhängig. Je kohlenstoffärmer der Stahl ist, um so höher liegt die Glühtemperatur, die bis knapp über 900° ansteigen kann. Die an die Temperatur gebundene Glühdauer bewegt sich zwischen 20 min und 2 h und richtet sich außerdem nach der Werkstoffdicke. Die Abkühlung muß gleichmäßig und an ruhender Luft vor sich gehen; verzögerte Abkühlung ergibt ein grobes Korn, wie es bei Temperaturen oberhalb etwa 950° entstehen würde. Ein Sonderfall ist das wiederum behelfsmäßige Normalglühen von Rohrrundnähten während weniger Minuten bei etwa 950° , wobei der bereits besprochene Ringflammenbrenner Verwendung findet.

Das Normalisieren dient dem Zwecke der Gefügeverbesserung und schließt gleichzeitig ein Spannungsfreiglühen in sich ein. Es tritt eine Kornverfeinerung durch Umkristallisation auf. Während ein längere Zeit auf über 900° erhitzter, sog. überhitzter Stahl durch Normalglühen ohne weiteres wieder verbessert werden kann, trifft dies für verbrannten Stahl (längere Zeit über 1200° erhitzt) nicht mehr zu; er ist endgültig verdorben (s. Abschnitt I E 2).

Die Wirkung des Normalglühens bei einer Einlagenschweißung geht aus Abb. 189 hervor. Das Bild *I* zeigt den Übergang zwischen Grundwerkstoff *M* (Zeilenstruktur) und Schweißse *S* in 60facher Vergrößerung, wobei allerdings hervorzuheben ist, daß nicht die reine Schweißse selbst, sondern die Umwandlungs-

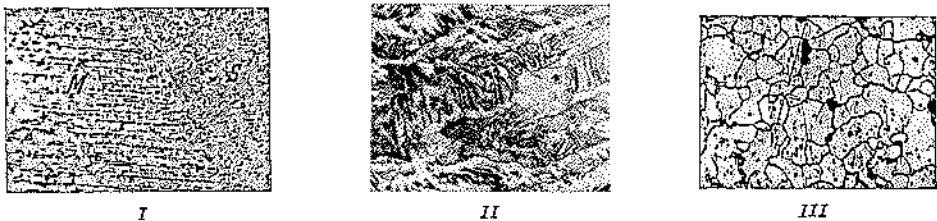


Abb. 189. Unbehandelte und vergütete Schweißse ($V = 60$ und $V = 200$).

und Mischzone sichtbar ist. Bild *II* zeigt ein der Mitte der Schweißse entnommenes Schliffbild in 200facher Vergrößerung mit Widmannstättenscher Gußstruktur, die sich durch ungleichmäßig verteilte, länggestreckte Kristalle auszeichnet. Endlich läßt Bild *III* das Gefüge derselben, aber normalgeglühten Schweißse bei gleicher Vergrößerung erkennen. Die gleichmäßigen kleinen Kristalle beweisen, daß das Gefüge durch das Normalglühen wesentlich verbessert worden ist.

Vom Normalisieren, das allerdings mit erheblichen betrieblichen Kosten verknüpft ist, wird heute viel Gebrauch gemacht. In manchen Fällen ist es vorgeschrieben, so z. B. im Kesselbau, wenn der Schweißfaktor 0,9 in Rechnung gesetzt werden darf. Ausgenommen ist die austenitische Schweißung.

Einen für das Spannungsfreiglühen und das Normalisieren gebauten Glühofen zeigt Abb. 190. Der Ofen hat, bei einer Herdlänge von 15000 mm, eine Breite von 3000 mm und eine Höhe von 2800 mm. Er kann Schweißstücke von etwa 50 t, zuzüglich 15 t Unterlagen und Versteifungen aufnehmen. Die Höchsttemperatur beträgt 1100°. Die Glühtemperatur wird mittels 6 Pyrometer bei 600 bis 950° mit $\pm 10^\circ$ Genauigkeit gemessen und selbsttätig aufgezeichnet. Die

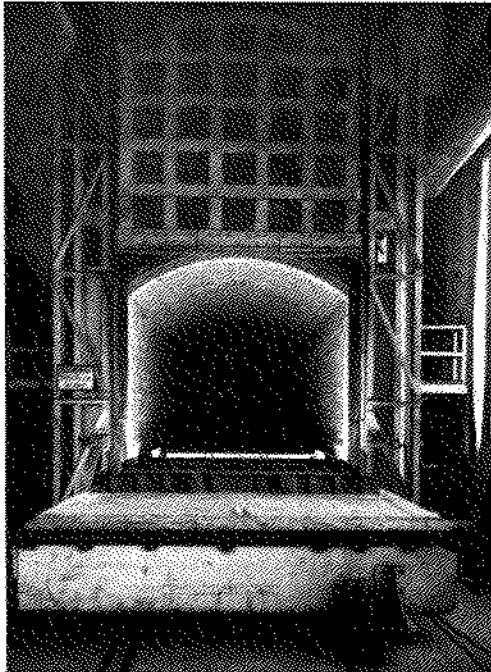


Abb. 190. Großraum-Glühofen für schwere Schweißkörper.

Heizbrenner gestatten verschiedene Schaltmöglichkeiten; die Heizung geschieht durch Programmregler. Während beim Spannungsfreiglühen Unterlagen und Versteifungen der zu glühenden Bauteile nicht ohne weiteres notwendig sind, verlangt das Normalglühen dringend gutes und zuverlässiges Versteifen und Abstützen, da sonst bedeutende Formabweichungen eintreten können.

Hämmern. Es ist zwischen Warmhämmern und Kalthämmern zu unterscheiden. Besondere Bedeutung hat lediglich das Warmhämmern, d. h. das Durchschmieden in Rotglut, also bei Temperaturen über etwa 700°. Zum Hämmern gehören Sachkenntnis, Handfertigkeit und Vorsicht, da sonst mehr verdorben als gutgemacht wird.

Gegenüber der Gasschweißung, bei der das Warmhämmern als ein dem Verfahren zugehöriger Arbeitsvorgang anzusehen ist, tritt das Hämmern beim Lichtbogen-

schweißen in seiner Bedeutung schon deshalb zurück, weil nur selten die notwendige Wärme über längere Zeit zu haben ist. Das Warmhämmern, das natürlich Schmiedbarkeit der Schweiße voraussetzt, hat eine Verminderung der Spannungen und vor allem ein Verfeinern des Schweißgefüges zum Ziel. Man kann sich dabei die Wirkung des Hämmerns so vorstellen, daß durch die starke Erschütterung ein Zertrümmern der Kristalle auftritt und ihr Wachstum unterbunden wird. Das Warmhämmern hat außerdem ein Strecken des Korns und eine Gefügeverdichtung zur Folge. Auf die hohe Bedeutung des nach Czernasty mit „Rekristallisationsvergütung“ bezeichneten Vergütungsverfahrens sei besonders im Zusammenhange mit der richtigen Temperatur und gründlichem Durchschmieden hingewiesen. Den Bedingungen des Warmschmiedens entsprechen fast alle mit ummantelten Drähten hergestellten Schweißen, sofern der Mutterwerkstoff geeignet ist, während die Schweißen der Nackt- und Seelenelektroden im all-

gemeinen nicht schmiedbar sind. Selbstverständlich kann das Hämmern von Schweißen, die mit Schlackenschichten und Kaltlagen durchsetzt sind, nicht den gewünschten Grad der Vergütung ergeben. Wohl aber können Blasen und Poren beim Durchschmieden der Schweiße in ihrem Umfang u. U. sogar wesentlich verkleinert werden. Da die Voraussetzungen für das Halten eines ausreichenden Wärmezustandes beim Lichtbogenschweißen infolge der raschen Wärmeableitung meist nicht erfüllt sind, wird mitunter eine fremde Wärmequelle hinzugezogen werden müssen. Keinesfalls aber darf im Temperaturgebiet der Blaubruchigkeit (200...300°) gehämmert werden, da sonst Rißgefahr besteht, die ja z. B. gerade durch das Hämmern der einzelnen Lagen dicker Nähte verhütet werden soll.

Soweit es sich um Kalthämmern und nicht nur um bloßes Richten handelt, können zwar Schrumpfungen und Spannungen stark herabgedrückt werden, doch bleibt seine Wirksamkeit auf gewisse Werkstoffdicken beschränkt. Wie bei jeder Kaltverformung steigen Festigkeit und Härte, dagegen nehmen Dehnung und Verformbarkeit ab; der Werkstoff verliert demnach an Zähigkeit und wird vorzeitiger Alterung und Langensprödigkeit ausgesetzt.

e) Die Berechnung von Schweißverbindungen.

Allgemeines. Solange die Schweißung mehr als ein Ausbesserungsmittel angesehen wurde, lag das Bedürfnis, eine Schweißverbindung zu berechnen, kaum vor. Im übrigen fand man sich damit ab, die Festigkeit einer Schweißverbindung etwa jener einer genieteten Konstruktion gleichzusetzen, d. h. die Zugfestigkeit der Schweiße mit 75 vH der des Grundwerkstoffs anzunehmen. Erst als die Schweißung eine wertvolle Teilarbeit in der Fertigung von z. T. hochbeanspruchten Bauwerken wurde, war zwangsläufig die Forderung gegeben, die aus Festigkeitsuntersuchungen ermittelten Gütezahlen der Schweiße auf deren Berechnung zu übertragen und die Werte für die zulässigen Spannungen bei Schweißverbindungen festzulegen. Die genaue Ermittlung der durch Wirkung äußerer Kräfte in den Schweißverbindungen auftretenden Spannungen wird dadurch erschwert, daß neben den aus der Herstellung (z. B. durch Verformung) im Werkstoff vorhandenen latenten (verborgenen) Spannungen vor allem die beim Schweißen entstehenden oft erheblichen Schrumpfspannungen vorhanden sind, die bereits behandelt wurden. Die für die Berechnung als zulässig anerkannten Spannungswerte sind unter Berücksichtigung der Schrumpfspannungen festgelegt worden, weshalb letztere bei unseren künftigen Betrachtungen ausscheiden.

Die für die Beanspruchung einer Schweißverbindung zugelassenen Höchstwerte richten sich nicht allein nach der Art der Kraftwirkung (Zug, Druck, Biegung usw.), sondern auch nach der Art der Beanspruchung (des Belastungsfalls). So ist z. B. die Beanspruchung der Schweißverbindungen im Stahlhochbau meist nur eine ruhende, im Brückenbau, Schiffbau und gesamten Maschinenbau jedoch meist eine wechselnde, und im Dampfkesselwesen kommt noch die Berücksichtigung der hohen Temperaturen und deren häufigen Schwankungen hinzu. Aus diesem Grunde haben die zuständigen Überwachungs- und Abnahmebehörden voneinander abweichende Vorschriften für geschweißte Bauteile erlassen¹.

Bei der Berechnung von Schweißverbindungen ist nach den üblichen Gesetzen der Festigkeitslehre zu verfahren. Auf Grund umfangreicher Untersuchungen und Erfahrungen sind die in den Einzelfällen zugelassenen Beanspruchungen der

¹ Vorschriften für geschweißte Stahlbauten (Hoch- und Brückenbau, DIN 4100 und 4101); Vorschriften für Klassifikation und Bau von Schiffen (Germanischer Lloyd); Werkstoff- und Bauvorschriften für Landdampfkessel.

Schweißverbindungen unter Berücksichtigung bestimmter Sicherheitsgrößen bei den verschiedenen Belastungsarten festgelegt.

Grundlagen der Festigkeitsberechnung. Die allen einfachen Festigkeitsberechnungen für eine Schweißverbindung zugrunde liegende Beziehung ist, wie bei ungeschweißten Prüfstäben:

$$P = \sigma \cdot F_s, \quad \sigma = \frac{P}{F_s}.$$

Hierin bedeuten: P = Belastung in kg,

σ = Festigkeit (bzw. Spannung) in kg/cm²,

F_s = Schweißquerschnitt in cm².

Der Querschnitt F_s ergibt sich aus dem Produkt von Dicke (a) und Länge (l) der Schweißnaht; $F_s = a \cdot l$. Zur Ermittlung der Festigkeit bei Zugversuchen wird, wenn es sich um Schweißerprüfungen mit an den Prüfungsstäben belassener Nahtüberhöhung handelt, die Schweißnahtdicke gleich der Blechdicke gesetzt, d. h. die Nahtüberhöhung h in Abb. 173 II bleibt unberücksichtigt, während bei Kehlnähten entsprechend Abb. 178 I a_1 , mithin $a + \Delta a$ als Schweißnahtdicke einzusetzen ist. Für die grundsätzliche Bestimmung der Schweißnahtfestigkeit werden stets Stumpfnähte angenommen, deren Nahtüberhöhung auf Blechdicke abgearbeitet ist.

Bei der Berechnung der durch die Schweiße aufzunehmenden Kräfte geschweißter Konstruktionen gilt die oben angeführte Grundformel, jedoch im Stahlhoch- und Brückenbau mit der Abweichung, daß weder die wirkliche Länge noch die volle Höhe des Schweißquerschnitts in Ansatz gebracht werden. Von der Länge l werden Anfangs- und Endkrater der Naht abgezogen. Ohne Berücksichtigung der Schwankungen im Umfange des Kraters sind beide mit je $1 \times$ Nahtdicke abzusetzen; Rechnungslänge demnach = wirkliche Länge $l - 2a$. Bei in sich geschlossenen Loch- und Schlitznähten (Abb. 168) wird die Länge der tragenden Naht ohne Kraterabzug durch die Summe der Lochrandlängen hinreichend genau bestimmt.

Das Maß der überhöhten Nahtdicke wird bei Stumpfnähten der Blechdicke gleichgesetzt, bei verschiedenen dicken Blechen der Dicke des schwächeren Bleches. Bei der Kehlnaht (Abb. 194) bleibt für die Berechnung die Überhöhung ebenfalls unberücksichtigt, so daß die Nahtdicke a der Höhe des der Schweiße eingeschriebenen gleichseitigen rechtwinkligen Dreiecks entspricht. Die Beziehung zwischen dem kurzen Anlageschenkel b des rechtwinkligen Dreiecks und dessen Höhe a ergibt sich zu:

$$a = \frac{b}{\sqrt{2}} \quad \text{und} \quad b = a\sqrt{2}.$$

Berechnungsgrundlagen im Stahlhochbau. Sie sind in den Vorschriften für geschweißte Stahlhochbauten (DIN 4100) verankert und stellen die erstmaligen Berechnungsgrundlagen für geschweißte Konstruktionen überhaupt dar, an die sich später andere Arbeitsgebiete anlehnen haben.

Im Stahlhochbau werden 2 Belastungsfälle unterschieden, und zwar Fall I Hauptkräfte, Fall II Haupt- und Nebenkkräfte, denen für bestimmte Stahlsorten

Tabelle 15.

Stahlart	St 00 · 12 ¹	Handelsbaustahl	St 37 · 12	St 52	
Belastungsfall I σ_{zul} . . .	1200	1400	1400	2100	kg/cm ²
Belastungsfall II σ_{zul} . . .	1200	1600	1600	2400	kg/cm ²

¹ St 00 · 12 darf nicht für tragende Bauteile verwendet werden.

zulässige Spannungen (σ_{zul}) fest zugeordnet sind, wie in Tabelle 15 auszugswise zusammengestellt.

Beispielsweise gelten für Zug und Biegung bei vollwandigen Trägern, Fachwerken und Stützen die in obiger Übersicht wiedergegebenen zulässigen Spannungen. Die für die Spannungen der Schweißnähte zulässigen Werte (ϱ_{zul}) sind je nach Naht- und Spannungsart niedriger als die σ_{zul} -Werte des Baustahls selbst und werden in Bruchteilen von diesen ausgedrückt, wie aus Tabelle 16 hervorgeht.

Tabelle 16.

Nahtart	Art der Spannung	Zulässige Spannung ϱ_{zul}	ϱ_{zul} in kg/cm ²		
			1200	1400	1600
Stumpfnähte	Zug	0,75 σ_{zul}	900	1050	1200
	Druck	0,85 σ_{zul}	1020	1190	1360
	Biegung	0,80 σ_{zul}	960	1120	1280
	Abscheren	0,65 σ_{zul}	780	910	1040
Kehlnähte (Stirn- und Flankennähte)	jede Beanspruchungsart	0,65 σ_{zul}	780	910	1040

Bei der Berechnung von Schweißnähten wird die Spannung ϱ von Flanken- und Stirnnähten der Anschlüsse und Stöße gezogener und gedrückter Glieder und der Schweißnähte an Trägeranschlüssen nach der oben angeführten abgewandelten Formel

$$\varrho = \frac{P}{\sum (a \cdot l)}$$

errechnet. Sie darf die Werte der Tabelle 16 nicht überschreiten. Ist bei der Berechnung der Schweißnähte neben einer Auflagekraft A auch ein Moment M zu berücksichtigen, so kann die Spannung aus dem Moment M nach der Formel $\varrho_1 = \frac{M}{W}$ bestimmt werden, wobei W das Widerstandsmoment einer Fläche bedeutet, die entsteht, wenn man sich die Dicken a sämtlicher Schweißnähte in die Anschlußebene umgeklappt denkt (Abb. 192). Der Auflagedruck A ergibt sich aus der Formel

$$\varrho_2 = \frac{A}{\sum (a \cdot l)},$$

wobei $\sum (a \cdot l)$ sämtliche Anschlußnähte umfaßt. Die Gesamtspannung ϱ findet man als geometrischen Mittelwert aus

$$\varrho = \sqrt{\varrho_1^2 + \varrho_2^2}.$$

Nach DIN 4100 müssen bei der Berechnung von Stegblechstößen mit Stumpfnähten in Biegeträgern folgende Bedingungen erfüllt sein:

1. Die Spannung aus der größten am Stoß möglichen Querkraft ($\max Q$) darf 0,65 σ_{zul} nicht überschreiten, mithin muß sein

$$\varrho_2 = \frac{\max Q}{a \cdot h_s} \leq 0,65 \sigma_{zul} \quad (h_s = \text{Steghöhe}).$$

2. Ist das am Stoß berechnete größte Biegemoment $= \max M$ und J das Trägheitsmoment des Gesamtquerschnitts, so muß nach der Formel $\varrho_1 = \frac{\max M \cdot h_s/2}{J}$

nachgewiesen werden, daß $\varrho = \frac{e_1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{e_1^2 + 4e_2^2} \leq 0,75 \sigma_{zul}$ ist. Dabei darf nicht außer acht gelassen werden, daß die Kehlnahtdicke für tragende Nähte mindestens 4 mm betragen soll und höchstens sein darf: $a = \frac{t}{\sqrt{2}} = 0,7 t$, wobei t

die Dicke des jeweils schwächeren Bleches ist. Ferner sollen Kehlnähte (ohne Endkrater) nicht kürzer als 40 mm sein und Flankenkehlnähte von Stabanschlüssen nicht über die Länge von $40 \cdot a$ hinausgehen.

Da im Brückenbau dynamische Beanspruchungen hinzukommen und bei der Berechnung die Dauerfestigkeit σ_{Dzul} zu berücksichtigen ist, sind (nach DIN 4101) α -Beiwerte eingeführt worden, die aus dem sog. γ -Verfahren unter Berücksichtigung der Schweißbelange entstanden sind. Auf die umfangreichen Berechnungsgrundsätze kann hier nicht näher eingegangen werden, vielmehr muß auf das diesbezügliche Sonderschrifttum verwiesen werden¹.

Beispiele aus dem Stahlbau. Zur Einführung sollen einige einfache Beispiele angeführt werden.

1. Beispiel. Berechnung des Anschlusses eines Winkels an einen Obergurt. Gegeben ist der in Abb. 191 dargestellte Anschluß des $\angle 65 \cdot 130 \cdot 10$ mit einer Zugkraft

$P = +21,0 t$. Der Abstand der Winkelschwerlinie beträgt nach der Tabelle: $e_1 = 4,65 \text{ cm}$; $e_2 = 8,35 \text{ cm}$. Der Werkstoff ist St 37 mit $\sigma_{zul} = 1,4 t/cm^2$.

Nach den Vorschriften ist: ϱ_{zul} (für Kehlnähte) $= 0,65 \sigma_{zul} = 0,910 t/cm^2$ und $a_{max} = 0,707 t_{min} = 0,707 \cdot 1,0 = 0,7 \text{ cm}$.

Die Schwerachse der Kehlnähte muß mit der Winkelschwerachse übereinstimmen. Zweckmäßig wählen wir für $a_1 = 0,7 \text{ cm}$, und entsprechend der Abrundung des Winkels für $a_2 = 0,5 \text{ cm}$.

Da $\varrho = \frac{P}{F_s}$ und $F_s = \sum a \cdot l$ ist, werden die erforderlichen Nahtlängen

$$l_1 = \frac{P}{a_1 \left(1 + \frac{e_1}{e_2}\right) \cdot \varrho_{zul}} \quad \text{und} \quad l_2 = \frac{P}{a_2 \left(1 + \frac{e_2}{e_1}\right) \cdot \varrho_{zul}}$$

Setzt man in diese Formeln die entsprechenden Zahlenwerte ein, dann ist

$$l_1 = \frac{21,0}{0,7 \cdot \left(1 + \frac{4,65}{8,35}\right) \cdot 0,91} = 21,2 \text{ cm}; \quad l_{1zul} = 40a = 28 \text{ cm}.$$

$$l_{1wirkl} = l_1 + 2a_1 \text{ (Endkrater} = a) = 21,2 + 2 \cdot 0,7 = 22,6 \text{ cm}.$$

$$\text{Ferner ist } l_2 = \frac{21,0}{0,5 \left(1 + \frac{8,35}{4,65}\right) \cdot 0,91} = 16,6 \text{ cm}; \quad l_{2zul} = 20,0 \text{ cm}.$$

$$l_{2wirkl} = l_2 + 2a_2 = 16,6 + 2 \cdot 0,5 = 17,6 \text{ cm}.$$

¹ Kommerell: Erläuterungen zu den Vorsch. für geschw. Stahlbauten, II. Teil: Vollwandige Eisenbahnbrücken, und laufende Veröffentlichungen in der Zeitschrift „Der Stahlbau“.

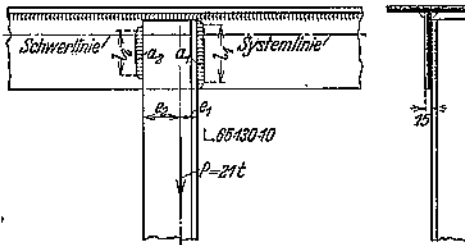


Abb. 191. Anschluß eines Winkels an einen Obergurt.

Die in den Nähten vorhandene Gesamtspannung infolge von P ist:

$$\sigma_{\text{vorh}} = \frac{P}{F_s} = \frac{21,0}{0,7 \cdot 21,2 + 0,5 \cdot 16,6} = \frac{21,0}{23,14} = 0,905 \text{ t/cm}^2, \quad \sigma_{\text{zul}} = 0,910 \text{ t/cm}^2.$$

Das Rechnungsergebnis zeigt, daß die zulässige Beanspruchung der Nähte im vorliegenden Beispiel nicht überschritten wird. Die größte Länge l_1 ist durch die Konstruktion begrenzt, wodurch man genötigt ist, für a_1 den höchstzulässigen Wert ($a = 0,7 \text{ t}$) einzusetzen. In der Praxis ist man bestrebt, für a den geringsten möglichen Wert mit dem größtzulässigen Wert für l einzusetzen, da hierdurch bei gleichbleibendem Querschnitt an einzuschmelzendem Werkstoff (Elektroden) gespart werden kann.

2. Beispiel. Berechnung eines Walzträgerstoßes mit Stoßblech. Gegeben ist ein $\pi P 20$ (Feiner) von $l = 2 \text{ m}$ entsprechend Abb. 192. Das Stoßblech ist $220 \cdot 20 \text{ mm}$. Die Einzellast $P = 5,9 \text{ t}$ wirkt in der Mitte, also an der ungünstigsten Stelle.

$$\text{Das im Stoß auftretende Biegemoment} = M_{\text{max}} = \frac{P \cdot l}{4} = \frac{5,9 \cdot 200}{4} = 295 \text{ cm t}.$$

Für die Flanschnähte a_{F1} wird $0,8 \text{ cm}$ angenommen, für die Stegnähte $a_{St} = 0,5 \text{ cm}$. In Skizze C sind die Dicken der Schweißnähte in ihre Anschlußebenen umgeklappt.

$$F_s = (2 \cdot 19,0 + 4 \cdot 8,5) \cdot 0,8 + 2 \cdot 0,5 \cdot 9,0 = 57,6 + 9,0 = 66,6 \text{ cm}^2.$$

$$J_s = \frac{1}{12} \cdot 19,0 (21,6^3 - 20,0^3) + \frac{1}{12} \cdot 2 \cdot 8,5 (16,8^3 - 15,2^3) = 5032 \text{ cm}^4.$$

$$W_s = \frac{J_s}{e_{\text{max}}} = \frac{5032}{10,8} = 466 \text{ cm}^3.$$

Nach den Vorschriften dürfen zur Aufnahme des Momentes nur die Flanschnähte (a_{F1}), zur Aufnahme der Querkraft nur die Stegnähte (a_{St}) herangezogen werden.

$$\text{Die Spannung infolge des Moments: } \sigma_1 = \frac{M}{W_s} = \frac{295}{466} = 0,63 \text{ t/cm}^2.$$

$$\text{Die Spannung infolge der Querkraft: } \sigma_2 = \frac{P}{F_{s \text{ steg}}} = \frac{5,9}{9,0} = 0,655 \text{ t/cm}^2.$$

Hieraus ergibt sich eine Gesamtspannung von

$$\sigma_{\text{vorh}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{0,63^2 + 0,655^2} = 0,908 \text{ t/cm}^2, \quad \sigma_{\text{zul}} = 0,910 \text{ t/cm}^2.$$

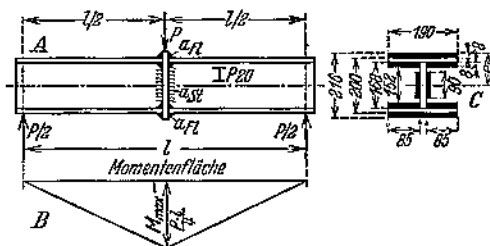


Abb. 192. Walzträgerstoß mit Stoßblech.

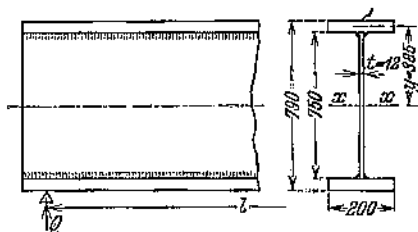


Abb. 193. Schweißträger.

3. Beispiel. Berechnung der durchlaufenden Kehlnähte eines Schweißträgers. Gegeben ist laut Abb. 193 ein Stegblech von $750 \cdot 12 \text{ mm}$ und Gurtplatten von $200 \cdot 20 \text{ mm}$. Die Querkraft $Q = 60,0 \text{ t}$. Das Trägheitsmoment des gesamten Querschnitts ist:

$$J = \frac{1}{12} (20,0 \cdot 79,0^3 - 18,8 \cdot 75,0^3) = 160794 \text{ cm}^4.$$

Das statische Moment der Gurtplatte auf die X-Achse bezogen ist:

$$S = F \cdot y = 20,0 \cdot 2,0 \cdot 38,5 = 1540 \text{ cm}^3.$$

Da es sich um eine durchlaufende Naht handelt, berechnen wir deren Dicke a für den laufenden Zentimeter. Setzt man $l = 1,0 \text{ cm}$, so lautet die Formel: $a = \frac{Q \cdot S}{J} \cdot \frac{1}{2\varrho}$; die errechneten Werte eingesetzt ergibt sich: $a = \frac{60,0 \cdot 1540}{180794} \cdot \frac{1}{2 \cdot 0,910} = 0,32 \text{ cm}$. Aus praktischen Gründen würde man die Gurtplatte mit $a = 0,4 \text{ cm}$ an das Stegblech anschließen.

Berechnungsgrundlagen im Kesselbau. Hierfür sind maßgebend die Werkstoff- und Bauvorschriften für Landdampfkessel, die Dampfpaß- und die Druckgasverordnung. Bei der Berechnung geht man von der Nennfestigkeit des Kesselbaustoffs k_z aus und muß je nach Nahtart einen Sicherheitswert α berücksichtigen, der für geschweißte Nähte 4,25 beträgt. Der Quotient $\frac{k_z}{\alpha}$ entspricht dem bisherigen σ_{zul} ; dem bisherigen ϱ_{zul} entspricht ein Wert v , der das Verhältnis der Mindestfestigkeit der Naht zur Zugfestigkeit des Blechs darstellt. Zum Vergleich der Berechnung im Stahlhochbau kann nachstehende Übersicht in Tabelle 17 dienen.

Tabelle 17.

Werkstoffbezeichnung	MI	MII	MIII	MIIV
$k_z (= \sigma_N)$ Nennspannung	3600	4100	4400	4700 kg/cm ²
$\frac{k_z}{\alpha} (= \sigma_{zul})$ $\alpha = 4,25$	850	965	1035	1100 kg/cm ²
$v = 0,5$	425	485	520	555 kg/cm ²
$\frac{k_z}{\alpha} \cdot v (= \varrho_{zul})$ $v = 0,7$	590	675	725	775 kg/cm ²
$v = 0,9$	760	870	930	995 kg/cm ²

Unter welchen Voraussetzungen die v -Werte in Rechnung zu stellen sind, wird im Abschnitt „Kesselschweißung“ näher erörtert. Die Tabelle läßt jedoch erkennen, welche bedeutende Werkstoffersparnis auf Grund höherer v -Werte zu erzielen ist.

Beispiel aus dem Kesselbau. Es soll die Wanddicke s einer Kesseltrommel (Mantel) berechnet werden. Der Betriebsdruck sei $p = 10 \text{ kg/mm}^2$, der Außendurchmesser betrage $D = 1000 \text{ mm}$, als Werkstoff sei *M I* mit $k_z = 36 \text{ kg/mm}^2$, $\alpha = 4,25$ und $v = 0,7$ angenommen; für Abrosten ist 1 mm Zuschlag (bis 30 mm Blechdicke) vorgeschrieben. Nach den Vorschriften lautet die Formel für Längsnähte:

$$s = \frac{D \cdot p \cdot \alpha}{2 k_z \cdot v} + 0,1 \text{ in cm,}$$

$$\text{mithin ist } s = \frac{100 \cdot 10 \cdot 4,25}{2 \cdot 3600 \cdot 0,7} + 0,1 \text{ cm} = 0,95 \text{ cm} \\ \sim 10 \text{ mm.}$$

Setzt man für v den höchsten zulässigen Wert 0,9 in die gleiche Rechnung ein, dann ist

$$s = \frac{100 \cdot 10 \cdot 4,25}{2 \cdot 3600 \cdot 0,9} + 0,1 \text{ cm} = 0,75 \text{ cm} \\ \sim 8 \text{ mm.}$$

Für Rundnähte gilt die Formel:

$$s = \frac{D \cdot p \cdot \alpha}{4 k_z \cdot v} + 0,1 \text{ cm.}$$

Da der Zahlenwert 4 im Nenner doppelt so groß ist wie in der Formel für Längsnähte, braucht die Rundnaht nicht nachgerechnet zu werden, was mit der Berechnung der erforderlichen Bodendicken nicht verwechselt werden darf.

Berechnungsgrundlagen im Maschinenbau. Im Gegensatz zum Stahlbau und zum Kesselbau ist das Schweißen im Maschinenbau keinen behördlichen Abnahmevorschriften unterworfen, so daß verbindliche Berechnungsgrundlagen nicht bestehen, vielmehr auf Vorschläge einiger Fachleute zurückgegriffen werden muß.

Angesichts der sehr verschiedenen Beanspruchungsverhältnisse, wie sie im Maschinenbau vorliegen und bedingt sind durch Schlag und Stoß, durch die Wirkungen von Massenkraften, durch Abnutzung, durch die Anforderungen an Starrheit und an Gestaltfestigkeit, sind hier wesentlich andere Verhältnisse gegeben als im Stahlhochbau. Die im Maschinenbau auftretenden Beanspruchungen sind deshalb nur sehr schwer, oft gar nicht rechnerisch zu erfassen, und das um so weniger, weil die aus Versuchen gewonnenen Ergebnisse nur mittelbar auf die geschweißte Maschine als Ganzes übertragen werden können.

Der zur Zeit wohl beste Vorschlag zur Bemessung der Maschinenbau-nähte stammt von Bobek¹, den wir hier im Auszug wiederholen. Man stellt die Dauerfestigkeit der jeweils benutzten Nahtart den von den gegebenen Belastungskraften verursachten wirklichen Nahtspannungen gegenüber; der Quotient aus beiden Werten bildet sodann die Sicherheit.

a) Die Dauerfestigkeit. Diese ist im wesentlichen von Werkstoff, Nahtart, Nahtgüte und Beanspruchungsart abhängig. Für die vorliegenden Zwecke wählt man den Grundfall einer mit blanken Elektroden sorgfältig hergestellten Stumpfnäht als X-Naht aus St 37. Die Ergebnisse der Dauerprüfung² sind in Abb. 194 dargestellt. Zu der jeweils unveränderlichen Grundspannung $\pm \sigma_m$ addiert sich algebraisch eine in den Grenzen $\pm \sigma_A$ beliebig oft schwingende Spannung und liefert den oberen Grenzwert

$$\sigma_o = \sigma_m + \sigma_A$$

und den unteren Grenzwert

$$\sigma_u = \sigma_m - \sigma_A.$$

$\sigma_m = 0$ liefert die reine Wechsellast $\pm \sigma_w$,

$\sigma_u = 0$ liefert die reine Schwellspannung σ_w .

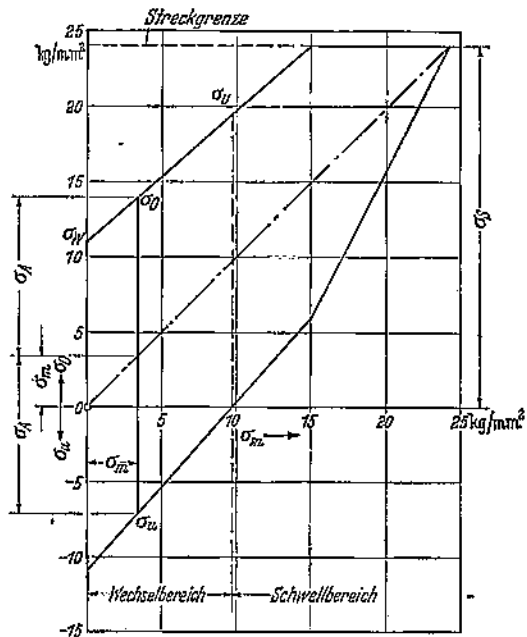


Abb. 194. Schaubild der Dauerfestigkeit einer X-Naht für St 37.

¹ Anleitungsblätter f. d. Schweißen im Maschinenbau. Herausgeg. vom Fachausschuß für Schweißtechnik im VDI, Berlin 1936, VDI-Verlag.

² Vgl. Kuratoriumsbericht für Dauerfestigkeitsversuche, Fachausschuß für Schweißtechnik im VDI, Berlin 1935, VDI-Verlag.

Der obere Grenzwert σ_o ist diejenige Spannung, die die Naht bei rund zwei-millionenfacher Wiederholung des Spannungswechsels zwischen σ_u und σ_o erträgt, ohne zu reißen; diese Anzahl gilt praktisch als dauernd, und man nennt daher σ_o die Dauerfestigkeit. Bei verschiedenen Vorzeichen zwischen σ_o und σ_u liegt der Wechselbereich vor, bei gleichen Vorzeichen liegt der Schwellbereich vor. Nach oben ist die Dauerfestigkeit begrenzt durch die Streckgrenze σ_s .

Bei Übertragung des Vorstehenden auf die Schweißtechnik nennt man die in Abb. 194 mit σ_o bezeichnete Dauerfestigkeit

$$\sigma_{DX} = \sigma_m + \sigma_A,$$

weil sie zu einer X-Stumpfnahht gehört.

Der Wert σ_A kann aus Abb. 194 für ein gegebenes σ_m zahlenmäßig abgelesen werden. Im übrigen ist der Wert σ_A innerhalb weiter Grenzen von σ_m fast unabhängig.

Wenn die ausgeführte Naht von der oben umrissenen Grundnaht in Nahtform, Schweißgüte, Kerbwirkung und Bauteilgröße abweicht, dann werden nicht andere Dauerfestigkeitsbilder herangezogen, sondern die oben ermittelte Dauerfestigkeit wird nach Bobek multipliziert mit einem Beiwert b_1 , b_2 , b_3 und b_4 , so daß die maßgebende Dauerfestigkeit in der Form erscheint

$$\sigma_D = \sigma_m + b_1 \cdot b_2 \cdot b_3 \cdot b_4 \cdot \sigma_A.$$

Die Beiwerte b_1 sind in Tabelle 18 abgeändert zusammengestellt, und zwar nur die für die Nahtformen und Belastungsarten für Kehlnähte, da für Stumpfnähte bei allen Belastungsfällen $b_1 = 1$ zu setzen ist. Bei Kehlnähten ist dieser Wert stets < 1 .

Tabelle 18.

Naht- formen		Beiwerte b_1 für Kehlnähte				
		einseitige Flachnaht	doppelseitige Flachnaht	doppelseitige Hahlnaht	Halb V- Naht	K-Naht
Belastungs- art	Zug und Druck	04	06	07	09	09
	Biegung	02	03	03	06	09
	Schub ¹	04	05	07	09	09

¹ längs und quer zur Naht

Konstruktionsschweißungen „N“ mit 0,5 in Rechnung gesetzt. Die Schweißgüte „N“ umfaßt nur statisch beanspruchte Konstruktionen, die von allen Schweißern und mit gewöhnlichen Elektroden an Stahl bis zu St 42 und Stg 38 ausgeführt werden, wobei nicht nachprüfbar Schweißfehler vorliegen können. Demgegenüber besteht die Schweißgüte „F“, worunter eine Festschweißung an Werkstoffen bis St 60 und Stg 58 zu verstehen ist, die neben hoher statischer Belastung auch Dauerwechselbeanspruchungen bis etwa 5 kg/mm² aufzunehmen hat und grundsätzliche Schweißfehler nicht aufweisen darf.

Beide Güteklassen „N“ und „F“ erhalten den Zusatz D, wenn Dichtschweißung verlangt wird, z. B. „FD“.

Feststehende und bewegliche Teile mit sehr hohen statischen und Wechselbeanspruchungen sowie erhöhten Temperaturbeanspruchungen, an den gleichen Werkstoffen wie bei „F“ fallen unter die Güteklasse „S“-Sonderschweißungen, bei der $b_2 = 1$ ist.

Der Beiwert b_3 ist immer < 1 zu bemessen, wenn der Schweißanschluß wegen der Gestalt des Werkstücks erhöhte Kerbwirkungen erwarten läßt. In einem solchen Falle wird eine Verstärkung der Schweißnaht angeraten, ohne daß bindende Zahlenwerte über die Größe von b_3 angegeben werden können.

Für den Beiwert b_4 soll nach Lehr und Hänchen anhand von Untersuchungen ein Abzug von $10 \cdots 25$ vH gemacht werden, der der Bauteilgröße Rechnung trägt und einen Ansatz von $b_4 = 0,75 \cdots 0,9$ verlangt.

Hänchen lehnt den Zuschlag für formbedingte Schrumpfung ab, mit der Begründung, daß, mit Rücksicht auf die Vielgestaltigkeit im Maschinenbau, die Spannungssteigerungen, die von der oberen Grenze einer Betriebsnennspannung (σ_{no}) bis zu einer Gefahrgrenze (σ_{ng} = Grenznennspannung) anwachsen können, fallweise berücksichtigt werden sollten. Die obere und untere Grenze der Betriebs-

nennspannung kann nach $\sigma_{no} = \frac{P_o}{\sum a \cdot l}$, bzw. $\sigma_{nu} = \frac{P_u}{\sum a \cdot l}$ errechnet werden.

Im Einzelfall ist zu überlegen, wodurch die Grenzen überschritten werden und bis zu welcher Höhe sie im Gefahrenzustand anwachsen können. Dieser Wert ist die Grenznennspannung, die zu der Betriebsspannung in Beziehung gesetzt wird:

$V = \frac{\sigma_{ng}}{\sigma_{no}}$. Dieses Spannungsverhältnis ist nur dann mit der Sicherheitszahl „S“

gleichzusetzen, wenn die Gefahrgrenze durch Beanspruchung des Maschinenteils in seiner Maschine festgestellt würde. Da solche Ermittlungen selten durch Prüfen des Maschinenteils in einer Prüfmaschine gleicher Bauart, sondern meist nur durch Prüfen eines Probestabes in einer fremden Prüfmaschine mit stetigen Belastungswechseln vorgenommen werden, ist die Festlegung der Gefahrgrenze für das Werkstück auch nur schätzungsweise möglich.

b) Die wirklichen Nahtspannungen (Betriebsspannungen), die von den gegebenen Belastungskräften hervorgebracht werden, beziehen sich auf eine Kraft- oder Arbeitsmaschine, die dadurch gekennzeichnet ist, daß infolge eines zeitlich verlaufenden Kräftespiels von unbegrenzter Dauer die Spannung in der zu berechnenden Naht sich zusammensetzt aus einer unveränderlichen Grundspannung σ_m und der sich darübersetzenden Wechsellastspannung vom Ausschlag σ_a ; demgemäß entsteht die Spannungsspitze

$$\sigma_d = \sigma_m + \sigma_a.$$

Bei schubbeanspruchten Kehlnähten setzt man sinngemäß

$$\tau_d = \tau_m + \tau_a.$$

c) Vergleich beider Spannungen. Da in den Ausdrücken für σ_D und σ_d derselbe Grundwert σ_m enthalten ist, vergleicht man die Werte $b_1 \cdot b_2 \cdot b_3 \cdot b_4 \cdot \sigma_A$ und σ_a miteinander und erhält die Sicherheit gegen Dauerbruch

$$S = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot b_3 \cdot b_4 \cdot \sigma_A}{\sigma_a}.$$

Verlangt wird $S > 1$; erwünscht ist $S = 2 \cdots 3$.

Beispiele aus dem Maschinenbau¹.

1. Kehlnaht zu einem Bremsgestänge (Abb. 195).

Die Zugkraft P ändert sich zeitlich zwischen 0 und 6000 kg.

Zur Übertragung dieser rein schwellenden Kraft dienen vier Flankenkehlnähte von der Länge $l = 110$ mm und Dicke $a = 5$ mm.

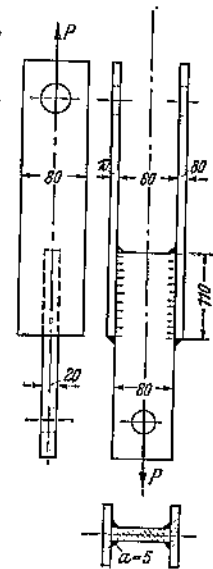


Abb. 195. Kehlnaht eines Bremsgestänges.

¹ Vgl. R. Hänchen: Schweißkonstruktionen. Grundlagen der Herstellung, der Berechnung und Gestaltung. Ausgeführte Konstruktionen. Berlin: Springer 1939.

Damit berechnet sich der Nahtquerschnitt $F_s = 4 \cdot 11 \cdot 0,5 = 22 \text{ cm}^2$ und $\tau_a = \frac{6000}{22} = 272 \text{ kg/cm}^2$ und $\tau_m = \frac{272}{2} = 136 \text{ kg/cm}^2$ und $\sigma_a = 136 \text{ kg/cm}^2$.

Mit der Mittelspannung $\sigma_m = \tau_m = 136 \text{ kg/cm}^2 = 1,36 \text{ kg/mm}^2$ folgt aus Abb. 194

$$\sigma_A = 11 \text{ kg/mm}^2 = 1100 \text{ kg/cm}^2.$$

Nach Tabelle 18 ist für doppelte Flachkehlnaht $b_1 = 0,6$. Für Schweißgüte F ist $b_2 = 1$.

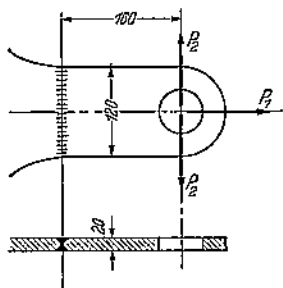
Für die bei Kehlnähten stets zu erwartenden Kerbwirkungen ist $b_3 = 0,6$ angenommen.

Ferner ist ein $b_4 = 0,9$ angenommen.

Damit folgt $b_1 \cdot b_2 \cdot b_3 \cdot b_4 \cdot \sigma_A = 0,6 \cdot 1,0 \cdot 0,6 \cdot 0,9 \cdot 1100 = 356 \text{ kg/cm}^2$ und die Sicherheit gegen Dauerbruch

$$S = \frac{356}{136} = 2,6.$$

2. Lagerblechanschluß durch Stumpfnahht (Abb. 196).



Ein Flachblech $120 \cdot 20 \text{ mm}$ erhält einen unveränderlichen Zug $P_1 = 30 \text{ t}$ und eine zeitlich nach oben-unten gerichtete Kraft $P_2 = 0,84 \text{ t}$. Die x-Stumpfnahht zwischen diesem Blech und dem Maschinenrahmen ist nachzurechnen. Es ist

$$\sigma_m = \frac{30}{12 \cdot 2} = 1,25 \text{ t/cm}^2 = 12,5 \text{ kg/mm}^2,$$

$$\sigma_a = \frac{0,84 \cdot 16}{2 \cdot \frac{12^2}{6}} = 0,28 \text{ t/cm}^2 = 2,8 \text{ kg/mm}^2.$$

Abb. 196. Lagerblech-Anschluß durch Stumpfnahht.

Für $\sigma_m = 12,5 \text{ kg/mm}^2$ ist nach Abb. 194 $\sigma_A = 9,6 \text{ kg/mm}^2$; ferner ist für die x-Naht in St 37 $b_1 = 1$, für die F-Naht $b_2 = 1$; schließlich ist $b_3 = b_4 = 0,9$ angenommen. Somit ist

$$b_1 \cdot b_2 \cdot b_3 \cdot b_4 \cdot \sigma_A = 1 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 9,6 = 7,8 \text{ kg/mm}^2;$$

$$\text{Sicherheit gegen Dauerbruch } S = \frac{7,8}{2,8} = 2,78.$$

f) Das Messen von Schweißnähten.

Allgemeines. Bis jetzt werden v- und x-Nähte meist durchgehend überhöht, ohne diese Verstärkung durch besondere Bezeichnungen zum Ausdruck zu bringen. Nur in einzelnen Fällen, für Zerreißstäbe bei Festigkeitsbestimmungen der Schweiße oder wenn Schweißnähte durch Laschen verstärkt werden sollen, wird die Überhöhung abgearbeitet.

Bei Kehlnähten jedoch unterschied man von Anfang an zwischen leichter, Voll- und verstärkter Kehlschweißung. Wie aus dem vorigen Abschnitt hervorgeht, ist die Dicke einer Schweißnaht durch die Berechnung genau festgelegt. Eine Unterschreitung der Nahtdicke (besser: Kehlnahthöhe) ergibt eine unzulässige Festigkeitsverminderung, während eine Überhöhung (oder Verdickung) oder bei Kehlnähten ein ungleichschenkliger Schweißquerschnitt eine Verschwendung an Schweißwerkstoff, Energie und Zeit bedeutet, da die normal vorgeschriebene Nahtdicke (Höhe) dem Sicherheitsfaktor bereits Rechnung trägt. Das Messen von Schweißnähten bezieht sich demnach auf die Bestimmung bzw.

Nachprüfung des Wertes a , der Höhe des eingeschriebenen gleichseitigen, rechtwinkligen Dreiecks, wobei vom kürzeren Anlageschenkel b auszugehen ist (Abb. 197). Hier entspricht das rechnerisch erforderliche Maß $a = 5,6$ mm einer Schenkellänge von $b = 8$ mm. Bei ungleichschenkligen Querschnitten, dessen einer Schenkel $b_1 = 13,0$ mm lang ist, beträgt das Maß $a_1 = 8,5$ mm; der Höhenunterschied von $8,5 - 5,6 = 2,9$ mm darf für die Berechnung von a nicht berücksichtigt werden, so daß sich ein unnötig um 60 vH größerer Nahtquerschnitt ergibt. Bei Zugversuchen an Schweißerkreuzen ist der volle Wert für a_1 einzusetzen.

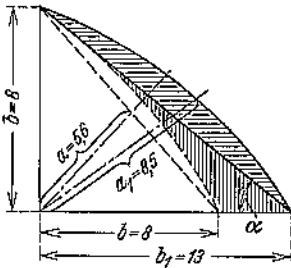
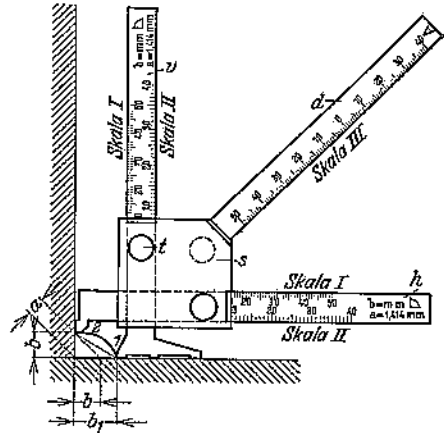
Abb. 197. Bestimmung des Maßes a .

Abb. 198. Messen einer ungleichschenkligen Kehlnaht.

Meßgeräte. Es gibt eine Anzahl von Meßgeräten, von denen ein Teil zur unmittelbaren Bestimmung von a dient, gleiche Schenkellängen b vorausgesetzt, was aber in der Praxis fast nie der Fall ist. Dieser Tatsache trägt z. B. das Gerät Abb. 198 dadurch Rechnung, daß es die kleinere Schenkellänge b bestimmt und auf einem Parallelmaßstab a abzulesen gestattet. Es zeigt drei in einem Schieber verstellbare und mit Schrauben t feststellbare Maßstäbe, von welchen der die Skala III tragende Diagonalstab d eine Ablesung der Höhe a_1 , unmittelbar gestattet, während die Skalen der Stäbe v und h die Schenkellängen und die dazugehörigen a -Werte abzulesen ermöglichen. Die unmittelbare Ablesung kommt nur für leichte Kehlnähte, die mittelbare für alle anderen Fälle in Frage.

Alle übrigen auf dem Markte befindlichen Geräte gestatten nur die Bestimmung des Maßes a_1 , ohne die Schenkellängen b zu berücksichtigen, auch dann, wenn sie mit einem verschiebbaren Skalenstab ausgestattet sind.

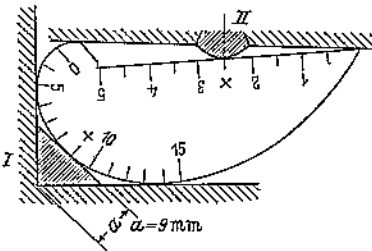


Abb. 199. Meßschablone für Schweißnahtdicken.

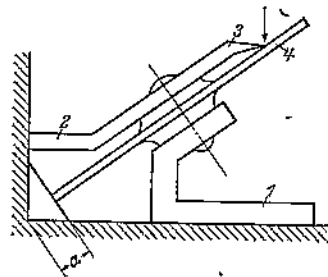


Abb. 200. Schweißnahtdickenbestimmung.

Von diesem Gedanken gänzlich abweichend sind Kurvenmeßgeräte entwickelt worden, wie sie in Abb. 199 und 200 skizziert sind. So zeigt Abb. 199 die An-

wendung der einfachsten Meßschablone, bei der zur Bestimmung von α (Fall I) die Kurve an drei Punkten anliegen muß, um den Wert α ablesen zu können. Die Nahtüberhöhung bei Stumpfnähten wird mit dem anderen bei II aufgetragenen Maßstabe gemessen. Auf der gleichen Grundlage beruht das in Abb. 200 dargestellte Meßgerät, bei dem die beiden Anschläge 1 und 2 mit einer zwischen dieser drehbaren exzentrischen Scheibe 4 verbunden sind. Das Maß α kann beim Zeiger 3 und infolge des großen Scheibendurchmessers mit größerer Genauigkeit an einer Skala unmittelbar abgelesen werden.

Im praktischen Betriebe sehr verbreitet sind auch Fächerlehren, ähnlich den Drahtlehren, bei denen ein Bündel auf verschiedene Naht Höhen abgestimmter Blechfächer in einem Gelenk zusammengefaßt sind.

Die Meßgenauigkeit ist immer völlig ausreichend, während die genaue Bestimmung des Wertes α eine Frage der gleichmäßigen Nahtausbildung ist. Mit ummantelten Elektroden geschweißte Nähte gestatten deshalb eine zuverlässigere Messung als die ungleichen Schuppenketten (Raupen) einer Nacktdrahtschweißung.

3. Wichtige Anwendungsgebiete der Stahlschweißung.

Nachdem die bisherigen Abschnitte das Grundsätzliche der Schweißtechnik und den Aufbau der Schweißung behandelten, wird in den folgenden Abschnitten — nach bestimmten Fachgebieten unterteilt — die Anwendung der Lichtbogenschweißung geschildert. Angesichts der vielseitigen, oft sehr verwickelten Konstruktionen und Formgebungen, die auf allen technischen Gebieten anzutreffen sind und die durch die Einführung der Schweißung eine fast unerschöpfliche Erweiterung erfahren haben, kann hier nur so weit darauf eingegangen werden, als es für das Verständnis des Konstruktionsgedankens und der Arbeitsdurchführung notwendig ist. Dabei ist es absichtlich vermieden worden, die ausführenden Firmen zu nennen, um den Eindruck einer Werbung auszuschalten. Weitere, ins einzelne gehende Anwendungsbeispiele in verschiedenen Fachrichtungen bringen dem Leser die Sonderschriften des VDI¹.

Der besseren Übersicht halber und um eine zu weitläufige Unterteilung zu vermeiden, sind Betrachtungen über Fertigung und Aushesserung gemeinschaftlich behandelt.

a) Schweißvorrichtungen.

Allgemeines. Zu den wichtigsten Hilfsmitteln des Schweißereibetriebes gehören die Schweißvorrichtungen, die dem Einspannen, Zusammenhalten, Drehen und

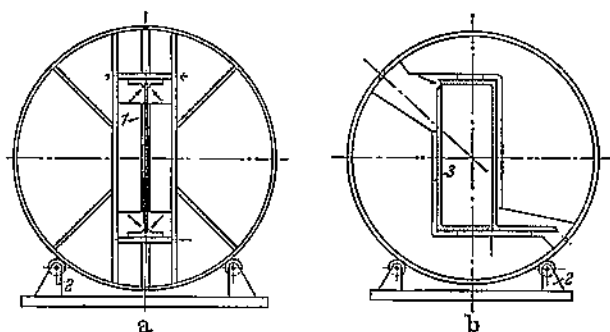


Abb. 201. Spannscheiben (Rühräder) für Stahlkonstruktionen.

Wenden der Werkstücke aller Art und jeder Größe dienen. Sie ermöglichen nicht allein ein wirtschaftliches, weil rascheres Arbeiten insbesondere bei der Massenfertigung, sondern sie geben dem Schweißer auch ein bequemes Mittel an die Hand, alle Werkstücke ohne den Einsatz vieler Hilfsarbeiter in die für ihn jeweils günstigste

¹ „Ausgewählte Schweißkonstruktionen“, Bd. 1...6, gesammelt und herausgegeben vom Fachausschuß für Schweißtechnik im VDI.

Schweißlage (Wannenlage) zu bringen. Senkrechte und Überkopfschweißungen, überhaupt das Schweißen in der von der waagerechten stark abweichenden Lage, fallen dann aus, ein Ziel, das jeder Betrieb anstreben sollte.

Vorrichtungen. Die im Kessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau seit langem übliche Drehvorrichtung einfachster Art ist der auf der Werkstattsohle oder in einer Grube untergebrachte Rollenbock (Abb. 201, bei 2), der von Hand oder motorisch angetrieben werden kann und auf dem Längs- und Rundnähte gleichermaßen gut zur Stellung des Schweißers angeordnet werden können. Daneben sind Schwenk-, Kipp- und Drehtische, die in ihrer Vielgestaltigkeit dem Konstrukteur einen großen Spielraum lassen, beliebte Hilfsmittel der Schweißerei. Dabei werden die Werkstücke auf den Vorrichtungen durch Fuß- oder motorischen Betrieb über Zahn- oder Kegelradgetriebe gedreht. Die Bewegung der Werkstücke über zwei aufeinander senkrecht stehende Achsen bedingt mitunter Hilfsvorrichtungen nach dem Grundgedanken des Kardangelenks. Vorrichtungen, die gleich-

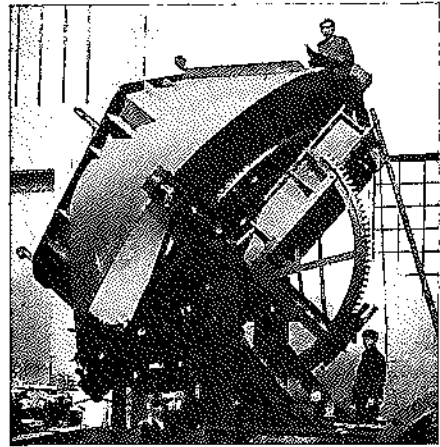


Abb. 202. Schweißung eines Einfüllstutzens in Schwenkvorrichtung.

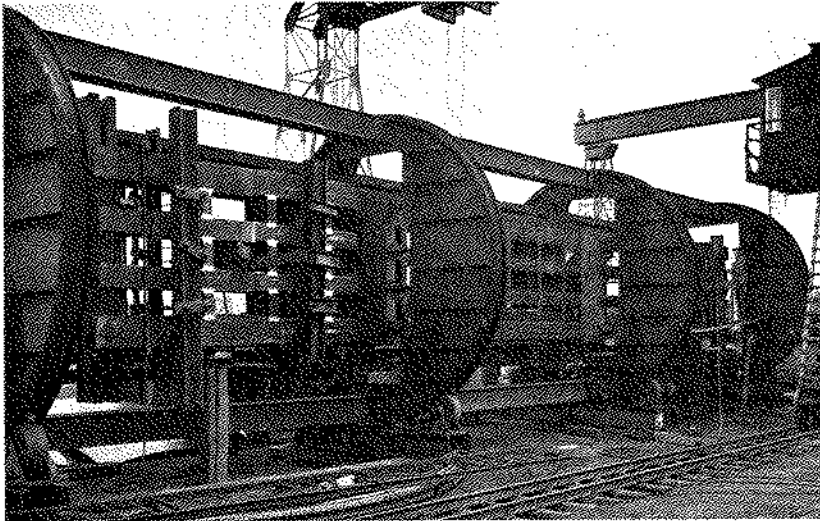


Abb. 203. Schweißung einer Tragbrückenkonstruktion in Drehscheiben.

zeitig sperrige und massige Werkstücke drehen und kippen sollen, können oft verwickelte und in ihren Abmessungen umfangreiche Formen annehmen, wie dies z. B. Abb. 202 zeigt. Dabei handelt es sich um die Schweißung eines auf ein Drehkreuz aufgespannten Bunkereinfüllstutzens, der in der Vorrichtung um 180° geschwenkt und dazu noch seitlich gekippt werden kann. Waggonuntergestelle,

überhaupt Fahrgestelle, werden, in zwei Achsstummeln geführt, als geschlossene Konstruktion in Drehständern um 360° drehbar eingebaut.

Eine der bedeutendsten Schweißvorrichtungen ist das sog. Rhönnrad, ein großes Rad, das ebenfalls auf einem mit zwei Rollen ausgestatteten Bock drehbar gelagert ist und sich im Stahlbau (Brückenbau) besonders eingeführt hat. Den Konstruktionsgedanken dieser geschweißten Drehscheiben veranschaulicht schon Abb. 201, und zwar zeigt *a* die für die Schweißung von Brückenträgern (1) übliche Bauart, *b* die für Träger von kastenförmigem oder sonstwie gestaltetem Profil (3). Abb. 203 zeigt den Einbau der Hauptträger der Tragbrücke eines Tiefladewagens in die rhönnradähnlichen Drehscheiben, deren Durchmesser nicht selten 5 m erreicht. Der Kranz der Scheiben besteht aus π - oder Π -Eisen, deren Profil auf den Bockrollen abläuft. Mit einem Abstände von etwa 6 m sind die Drehscheiben unter sich durch Träger verbunden und für den Einbau von Brücken- und Kastenträgern jeder Form und Abmessung einrichtbar. In der abgebildeten Vorrichtung wurden Brückenträger von 60 t Gewicht und mit einer Baulänge von über 26 m, bei 3 m Höhe, geschweißt. Daß solche Drehvorrichtungen vielfach gleichzeitig auch als Spannvorrichtungen gegen Verzug ausgebaut werden, dürfte naheliegen.

b) Rohrschweißung.

Während die Rohrschweißung zur Zeit der Entwicklung der neuen Schweißverfahren ausschließlich von der Gasschweißung beherrscht wurde, ist mit dem Fortschritt der Lichtbogenschweißung hierin insofern ein Wandel eingetreten, als Rohrleitungen größerer Abmessungen heute vielfach elektrisch geschweißt werden. Das bezieht sich insbesondere auf das Herstellen und Verlegen großkalibriger Dampf-, Wasser-, Ferngas-, Petroleum-, Öl-, Wind- und Absaugrohrleitungen verschiedenster Art¹.

Vorteile der Schweißung. Das geschweißte Stahlrohr hat allen bekannten Verbindungsverfahren gegenüber die Vorzüge der dauernden Dichtigkeit, Dehnbarkeit, Bruchsicherheit, praktisch unbeschränkten Formgestaltung, Gewichtsersparnis (Fortfall von Flanschen und Überlappungen), erhöhten Wirtschaftlichkeit und des Fortfalls der Rohrschwächung durch Gewinde u. dgl. Sie haben einmal dazu geführt, die gußeisernen Rohre zu verlassen, aber auch immer mehr den Ersatz von Rohrverschraubungen, Verflansungen, des Nietens usw. zur Folge gehabt. Die mit dem Fortschritte der Technik an Werkstoff und Verbindungsart gestellten hohen betriebstechnischen Anforderungen konnten erst dann restlos befriedigt werden, als es gelang, auch hochwertige, legierte, z. B. warmfeste Werkstoffe einwandfrei und sicher zu schweißen. Beschränkungen in der Anwendbarkeit der Schweißung im Rohrleitungsbau, sei es durch hohe Drücke oder durch höhere Temperaturen, gibt es kaum. Bei gezogenen und gewalzten Rohren ersetzt die Schweißnaht Fittings und Flanschen, bei Muffenrohren ersetzt sie die Packung und Bleiverstemmung. Eingerollte Rohre werden im allgemeinen längsnahtgeschweißt, was von Hand wie auch auf Schweißautomaten geschieht. Dabei handelt es sich um geradlinige oder spiralförmige Längsnahtverbindungen einfachster Art, auf die hier näher einzugehen sich erübrigt. In folgendem soll daher ausschließlich von Rohrrundnähten, also Rohrstößen, -anschlüssen und -formstücken, die Rede sein.

Stumpfstöße. Eine größere Gruppe von üblichen Formen des Stumpfstoßes für Rohrrundnähte ist in Abb. 204 veranschaulicht, wobei die Wahl des einen

¹ Die Bedeutung der Rohrschweißung machte besondere Prüfbedingungen für die Schweißer notwendig, die in DIN 2471 (früher 2470) zusammengefaßt sind.

oder anderen von dem Verwendungszwecke, der Abmessung und der von ihm aufzunehmenden Kraftübertragung abhängig ist. Der einfachste Verbindungsstoß ist bei *a* dargestellt. An Rohren bis zu 3 mm Wanddicke kann die Abschrägung fortfallen. Schwachwandige Rohre können mit Bördelstößen — wie bei *b* gezeigt — versehen werden, wobei sich vorteilhaft die Kohlelichtbogenschweißung anwenden läßt. Der Innenbord bei *h* kommt nur in Frage, wenn das Rohr nicht dem Durchflusse von Körpern, sondern als Konstruktionsteil dient. Um neben einem guten Durchschweißen eine glatte Innenfläche des Stoßes zu gewährleisten, werden mitunter die Formen *c* und *d* bevorzugt, wo Paßringe eingesetzt und mit dem Stoße verschweißt werden. Sogenannte Entlastungsstöße — wie sie bei *e*, *f* und *g* skizziert sind — haben den Zweck, die Schweißnaht von zusätzlichen Beanspruchungen zu entlasten, wie sie durch Verlagerung der Leitung, Temperaturschwankungen und ähnliches hervorgerufen werden. Die Aushalsung bei *e* und die Anordnung der doppelseitigen Sicken bei *f* und *g* bezwecken außerdem eine Aussteifung dünnwandiger Rohre und damit eine Erleichterung der Arbeitsdurchführung. Weniger oder gar nicht zu empfehlen sind die Beispiele *i* und *k*, wo Flach- und Hochkantlaschen eine vermeintliche Entlastung der Schweißnaht mit sich bringen sollen.

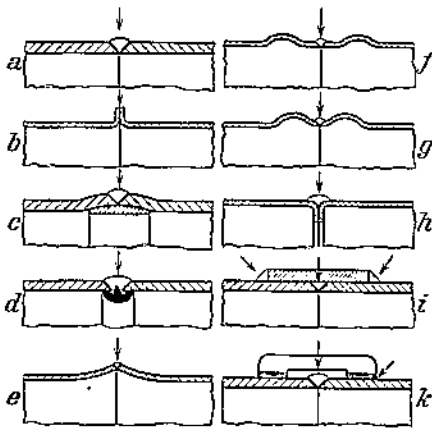


Abb. 204. Geschweißte Rohrstöße.

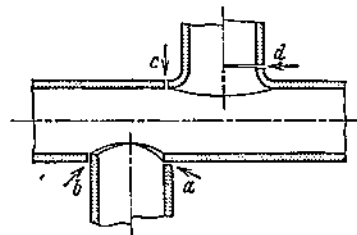


Abb. 205. Rohrabzweigungen.

Abzweigungen. Im allgemeinen sind die Abzweigungen der Abb. 205 gebräuchlich. Bei *a* haben lichte Weite des Stützens und des ihn aufnehmenden Loches gleichen Innendurchmesser, während bei *b* das Stützenende in ein größer gehaltenes Loch eingepaßt wird. In beiden Fällen entstehen Kehlnahtverbindungen. Das einzuschweißende Rohrende des Stützens muß bogenförmig ausgearbeitet sein, damit der Durchflußquerschnitt des Rohres nicht vermindert wird. Wird das Rohrinne nicht benutzt, so ist diese Maßnahme nicht notwendig. Im übrigen kann natürlich die Abzweigung an jeder beliebigen Stelle und unter jedem beliebigen Winkel angeordnet sein, wenn nur dafür gesorgt wird, daß die Naht für die Elektrode ringsum zugänglich bleibt. Nicht immer sind die einfachsten Abzweigungen *a* und *b* ausreichend. Wo es auf möglichst reibungs- und stoßfreien Durchgang ankommt, wird die Verbindungsart *c* und *d* gewählt. Diese hat außerdem den Vorteil, daß die Schweißnaht außerhalb der am stärksten auf Biegung beanspruchten Stelle verlegt wird. Die Aufweitung der Rohrlöcher, d. h. die Aushalsung, wird mit für diesen besonderen Zweck entwickelten Geräten durchgeführt.

Flanschen. Um lösbare Verbindungen zu erhalten, verwendet man bei kleinkalibrigen Rohren meist Rohrverschraubungen, bei großkalibrigen Rohren vorwiegend Flanschen, die früher mit Gewinden aufgeschraubt oder als Losflanschen auf gebördelten Rohrenden angeordnet wurden. Mit der Schweißverbindung er-

reicht man dies einfacher und vor allem dauerhafter, indem man entweder Ringflanschen im Sinne der Skizzen *a* bis *f*, Abb. 206, anschweißt oder Ansatzflanschen, wie sie bei *g* und *h* dargestellt sind. Darüber hinaus sind noch mannigfache Flanschenformen möglich; jedoch stellt *h* die beste Form eines Schweißflansches dar, dessen Ansatz auf die Wanddicke des Rohres verjüngt und mit diesem durch eine V- oder X-Naht verbunden ist. Damit entfällt besonders die bei dickwandigen und großkalibrigen Rohren mühevollen Arbeit des Gewindeschneidens. Die Wandelbarkeit von Rohrflanschen geht

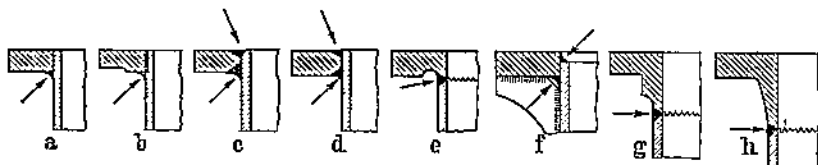


Abb. 206. Schweißungen von Rohrflanschen.

auch aus Abb. 207 hervor. Bei Massenfertigung von Rohrverbindungen wird sich fast immer die Aufstellung eines Schweißautomaten verlohnen.

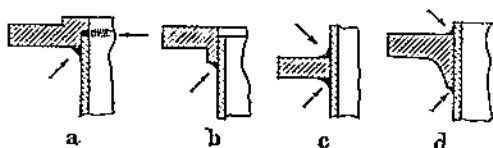


Abb. 207. Wandelbarkeit geschweißter Rohrflanschen.

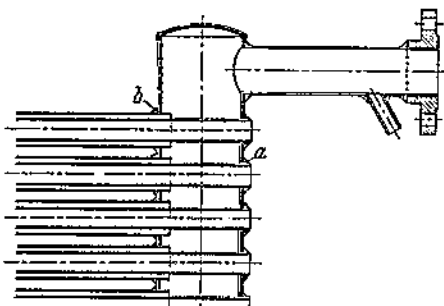


Abb. 208. Kühltischregister.

auch aus Abb. 207 hervor. Bei Massenfertigung von Rohrverbindungen wird sich fast immer die Aufstellung eines Schweißautomaten verlohnen.

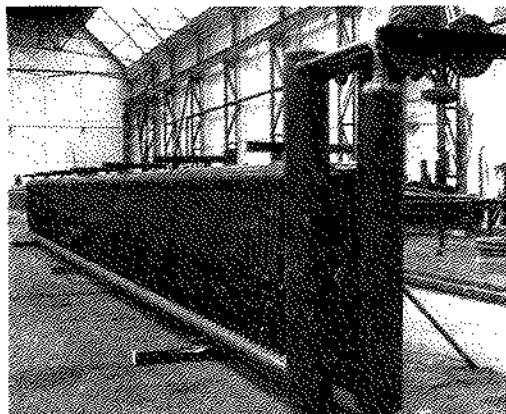


Abb. 209. Steilrohrverdampfer.

Rohrsysteme. Das gefällige Aussehen und die Einfachheit einer geschweißten Rohrkonstruktion kommen sinnfällig bei Rohrsystemen zum Ausdruck. Heizrohrregister, Kühltischsysteme, Rohrverdampfer, Gittermaste und vieles andere werden heute fast ausschließlich geschweißt hergestellt, wobei der große schweißtechnische Vorzug — von normalen Rohrabmessungen und -formen gänzlich unabhängig zu sein — besonders ins Gewicht fällt. Ein Kühltischregister mit der gebräuchlichen, konzentrischen Anordnung von Doppelrohren ist in Abb. 208 dargestellt. Die inneren Rohre sind bei *a*, die äußeren bei *b*

in das Sammelrohr eingeschweißt. Ebenso sind die Deckel, Stützen und Flanschen durch Schweißung in dem System verbunden. Das Ausführungsbeispiel eines aus zwei Elementen bestehenden Steilrohrverdampfers bringt Abb. 209. Der Verdampfer besteht aus 284 elektrisch in die Sammelrohre eingeschweißten Stehrohren

von 52,5/44,5 mm Durchmesser. Boden, Stutzen, Flanschen und Verbindungsrohre sind ebenfalls elektrisch verschweißt. Das Einschweißen von Rohren in Rohrwände

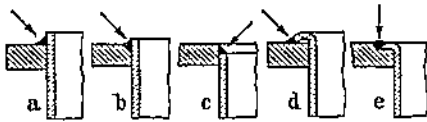


Abb. 210. Einschweißen von Rohren in Rohrwände.

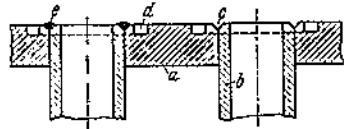


Abb. 211. Ausgleich zwischen Rohrwand und Rohrdicken beim Schweißen.

kann nach verschiedenen Gesichtspunkten und sowohl im Sinne der Abb. 210 als auch der Abb. 211 erfolgen. Die Deutlichkeit der Bilder erübrigt weitere Ausführungen.

Formstücke. Im engeren Zusammenhange mit der Erzeugung von Abzweigungen stehen die sog. Rohrformstücke. Die schwierigsten und verwickeltesten Rohrformstücke, die aus fertigungstechnischen Rücksichten weder mit gießereitechnischen Mitteln noch durch Nietung u. a. herstellbar sind, werden durch den Zusammenbau zweckentsprechend geformter, in und unter sich geschweißter Einzelteile in gefälliger Weise hergestellt. Der Schweißtechnik verdanken auch die Rohrbogenwerke ihre Entstehung. Sie fertigen nach gewissen Normen gestufte Schweißbogen und die verschiedensten Formstücke, die, untereinander oder mit Rohrsträngen zusammengeschweißt, einfachste und billige Konstruktionen ergeben.

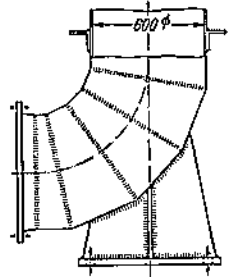


Abb. 212. Geschweißter Segmentkrümmer.

Tritt an die Stelle des gezogenen, genormten Kaliberrohres ein aus Blech eingerolltes, dann wird der Nutzen der Schweißung bei Formstücken noch mehr offenbar, wie dies für den Rohrkrümmer (Abb. 212) zutrifft, der aus 6 Segmenten besteht. Das große Hosenrohr (Abb. 213), dessen Größenverhältnisse sich im Vergleich zu dem auf der Leiter abgebildeten Arbeiter abschätzen lassen, ist aus rund 100 geschweißten Blechsegmenten und -schüssen sowie mehreren Versteifungsrippen hergestellt worden. Die Gesamtlänge der elektrischen Schweißnähte beträgt etwa 300 m. Solch verwickelten Zusammenbauarbeiten kommt der Vorteil des leichten Heftens der Stöße mit dem Lichtbogen und das verhältnismäßig geringe Verziehen der Bleche besonders zu statt. Auch der aus gepreßten Blechstücken gefertigte, doppelwandige Auspuffstutzen eines Dieselmotors (Abb. 214), ist samt den 3 Flanschen elektrisch geschweißt. Art und Lage der Nähte sind durch genormte Schweißzeichen hervor gehoben. Wie man unter Benutzung von Normenrohrcrügen und Rohrabschnitten Ausgleichrohre großen Kalibers, sog. Lyra-

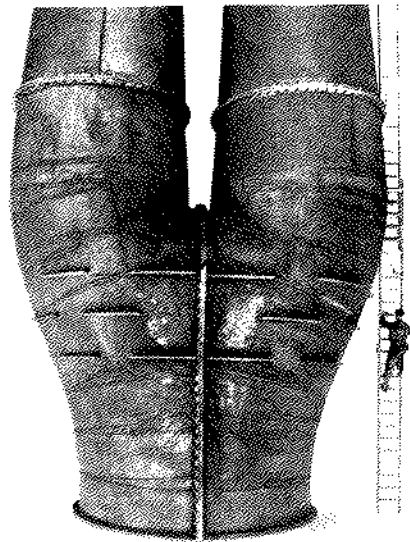


Abb. 213. Hosenrohrformstück für eine Turbine.

Muffenrohre. Stahlmuffenrohre werden je nach Länge und Durchmesser der Rohrstränge über dem Graben geschweißt und dann an Flaschenzügen versenkt, oder sie werden im Graben selbst geschweißt. Letztes erfordert das Auswerfen entsprechender Kopflöcher, die dem Schweißer eine möglichst unbehinderte Bewegungsfreiheit gestatten müssen. Aus der großen Anzahl der üblichen Muffen-

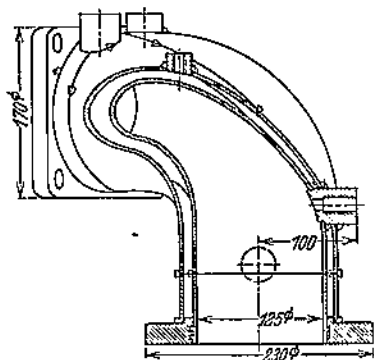


Abb. 214. Geschweißter Auspuffstutzen einer Dieselmachine.

rohrverbindungen, die z. T. unter Patentschutz stehen, sind in Abb. 216 die wesentlichsten zusammengestellt, soweit sie einer Warmverformung der Muffe während des Verlegens nicht bedürfen. Muffen der letzteren Art werden meist gasgeschweißt. Zu diesen gehören vor allem die als Strenger- und Klöppermuffen bekannten Verbindungen.

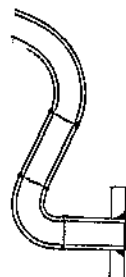


Abb. 215. Aus Rohrbogenformstücken zusammengeschweißtes Ausgleichrohr (Lyrbogen).

Die Schweißmuffenrohre unterscheiden sich von den

verstemmten Muffen vor allem dadurch, daß der Muffendurchmesser dem Schwanzende angepaßt ist und der für die Verstemmung notwendige Zwischen-

raum fortfällt. Die gewöhnliche Muffenrohrverbindung mit einer äußeren Rundnaht ist bei *a* dargestellt, während *b* in dem in die Muffe eingeschobenen Rohrende eine Entlastungssicke besitzt, die mit der Muffe in einer äußeren Rundnaht verschweißt wird. Demgegenüber ist bei der Ausführung *c* die Anordnung einer Doppelsicke an der Muffe vorgesehen, und das zylindrische Rohrende wird mit dem Muffenrande durch eine äußere Kehlnaht verbunden. Bei größerer Beanspruchung des Rohrnetzes, besonders auch bei größeren Rohrdurchmessern und in den Fällen, wo durch Erdverlagerungen oder -rutschungen (z. B. Bergbaugebiet) eine zusätzliche Beanspruchung des Rohrsystems zu erwarten ist, kann eine Vergrößerung der Schweißquerschnitte in der bei *d* und *e* angedeuteten Weise erfolgen, bei *d* insofern, als am Umfang der Muffe im gleichen Abstand verteilte Schweißlöcher angebracht werden, die mit Schweißwerkstoff ausgefüllt und mit dem eingeschobenen Rohrende verschweißt werden. Um das Auftreten von hohen Spannungen zu vermeiden, ist es dabei wichtig, die mit dem Fortschreiten der Rundnaht anliegenden Sicherungslöcher gleichzeitig, und nicht vor oder nach dem Schweißen der Rund-

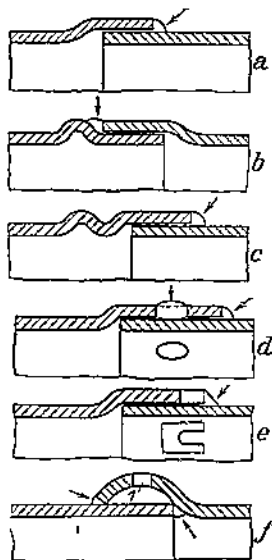


Abb. 216. Geschweißte Muffenrohrverbindungen.

naht, auszufüllen. Die Ausführung *e* unterscheidet sich von der vorhergehenden durch die Anordnung von Längsschlitten am Muffenende. Sind die Rohre befahrbar, so wendet man vielfach auch die Kugelmuffe *f* an, die je eine äußere und innere Rundnaht ermöglicht. Beim Abdrücken des Rohrstranges braucht lediglich der durch die Nähte begrenzte Ringraum unter Druck gesetzt zu werden, um die Verbindungen auf Dichtheit zu prüfen. Das für die Druckprobe notwendige Ge-

windeloch *I* wird mit einem Pfropfen verschlossen, damit gegebenenfalls die Druckprobe beliebig wiederholt werden kann. Diese Beispiele mögen genügen.

c) Behälter- und Kesselbau.

Offene Behälter. Wasserkästen, Tanks aller Art, Schmelzwannen, Silos, Bunker usw. von eckiger oder runder Form können mit und ohne Versteifung in unbeschränkten Abmessungen einwandfrei geschweißt werden. Dabei können außer einigen in Abb. 217a bis *f* skizzierten Flächenversteifungen, zahllose andere Möglichkeiten ausgenutzt werden. In den weitaus meisten Fällen genügen ein oder zweiseitige unterbrochene Nähte. Die Lage der Blechstöße und die Anordnung von Böden und Versteifungsrahmen richten sich nach Dicke und Abmessung der Blechtafeln, wobei selbstverständlich die Verwendung größerer Blechtafeln eine Ersparnis an Schweißnähten ergibt.

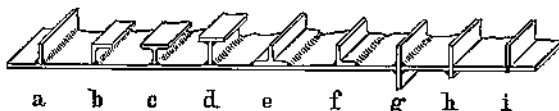


Abb. 217. Wandversteifungen durch angeschweißte Profile.

Die Längsnähte an den Blechschüssen werden ausnahmslos stumpf geschweißt, während in besonderen Fällen aus betriebs- oder fertigungstechnischen Gründen die

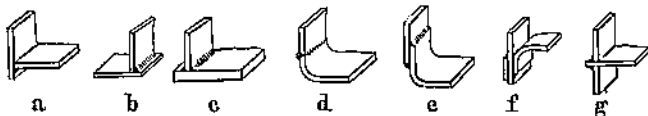


Abb. 218. Geschweißte Kasten- und Behälterecken.

Randversteifungen durch Kehlnähte angeschlossen werden¹, z. B. entsprechend der Abb. 206a und *f* oder der Abb. 207b, c und *d*. Für die Beschaffenheit der Böden und die Anordnung ihrer Anschlußnähte sind Blechdicke, Form und Abmessungen maßgebend. Entweder werden sie abgekantet und stumpf an den Mantel angeschweißt, oder sie stehen um einige mm über dem Mantel vor und werden durch Kehlnähte verbunden, wie dies in Abb. 218a bis *c* gezeigt ist. Für Druckgefäße kommen praktisch nur die Anschlußformen *d*, *e* und *f* in Frage. Die beste ist die von *d*, dagegen wird man *e* nur aus Fertigungsgründen bei dünneren Blechen und dann vorziehen, wenn eine Versteifung notwendig ist. *f* ist eine Nahtanordnung, bei der die Bodenwölbung nach innen verlegt und der Mantel durch einen Blechring von außen verstärkt ist. Bei *g* bis *i* (Abb. 217) und *g* (Abb. 218) ist der Einbau einer Trennwand dargestellt.

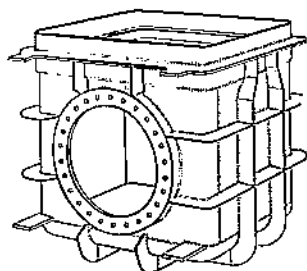


Abb. 219. Rippenverstärkte Sterilisationskammer.

Großflächige, vor allem dünnwandige Körper werden durch aufgeschweißte Versteifungen verstärkt, wie dies bereits bei Abb. 217 ausgeführt wurde. Das Beispiel einer mustergültigen Flächenversteifung zeigt Abb. 219. Der Großraum-Kohlenstaubbunker der Abb. 220 veranschaulicht die Flächenversteifung geschweißter Konstruktionen besonders sinnfällig. Die Flächen der Bunkerrutschen sind ringsum durch aufgeschweißte Winkleisen, der eigentliche Behälter ist durch abschnittsweise angeschweißte T-Profile ausgesteift.

Geschlossene Behälter und Kessel. Während die Längsnähte auch hier restlos als Stumpfnähte (V-, U- und X-Nähte) ausgebildet werden, sind Überlappungen

¹ Ausführliches s. Band 1.

an Rundnähten möglich. Verschiedene Ausführungen von Behälterrundnähten sind außer in Abb. 218*d...f* noch in Abb. 221 zusammengestellt. Dabei ist stets

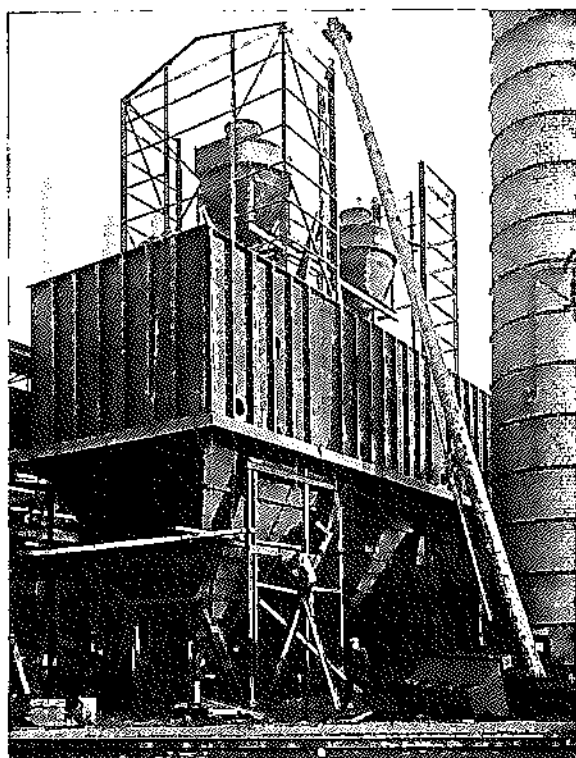


Abb. 220. Geschweißter Großraum-Kohlenstaubbunker.

Gestehungskosten wachsende, sondern bei Innendruck auch ungünstig beanspruchte Schweißnähte. Handelt es sich um Behälter von im Verhältnis zu ihrem

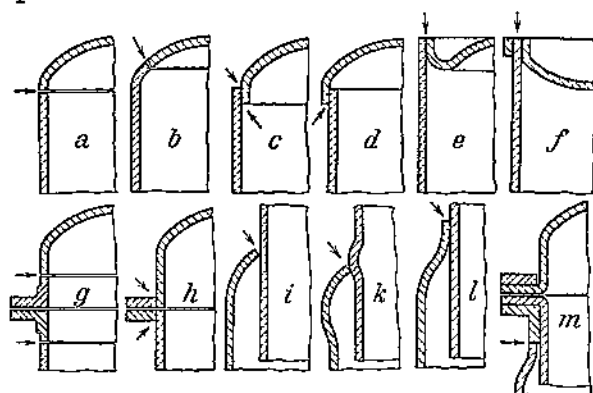


Abb. 221. Anordnung der Schweißnähte an geschlossenen Behältern.

Böden (*e...f*) mit oder ohne Randverstärkung (*f*) wird die Kehlnaht häufig durch die Stirnnaht abgelöst, wenn Kohlelichtbogenschweißung in Frage kommt. Da

darauf zu achten, daß sich die Vorbereitung der Schweißkanten wie bei Längsnähten nach der Blechdicke zu richten hat, gleichgültig, ob es sich um Rundnähte an den einzelnen Blechschüssen oder um Mantel-Boden-Verbindungen handelt. Die obere Reihe der Abb. 221, Skizze *a* bis *f*, bezieht sich auf unlösbare Boden-Wand-Verbindungen, und zwar zeigen *a* und *b* die Stumpfnäht, *c* und *d* die Überlappnaht nach außen gewölbter Böden; *d* ist selten. Skizze *a* entspricht auch einer normalen Schußrundnaht. Gutes, d. h. gleichmäßiges Vorbereiten der Blechrundnähte auf Durchmesser und Schweißfuge erleichtert die Ausführung der Schweißung erheblich und gewährleistet saubere Nähte und geringe Ausrichtarbeit. Versetzte oder im Durchmesser ungleiche Schüsse ergeben nicht allein unansehnliche, in ihren

Durchmesser geringen Blechdicken, so sind Überlappungen bei *c* und *d* angebracht, z. T. aus Gründen leichteren Zusammenbaus, z. T. um den Körper zu versteifen und durch das Eigengewicht bedingte Verformungen während der Beförderung zu verhindern. Die Notwendigkeit der doppelseitigen Rundnaht (Fall *c*) wird durch die Druck- und gegebenenfalls dynamischen Beanspruchungen bestimmt. Bei eingesetzten

diese Nahtanordnung nur dann brauchbar ist, wenn es sich um geringe Druckbeanspruchungen, also um mit dem Kohlelichtbogen schweißbare Stumpfnähte an dünneren Blechen handelt, gestaltet man Lichtbogennähte an dickeren Blechen so, wie es bei Abb. 218f angedeutet ist, wodurch eine Kehlnaht entsteht.

In der unteren Reihe der Abb. 221 ist bei *g*, *h* und *m* die Anordnung von Nähten an lösbaren Behälterdeckeln veranschaulicht. Bei *g* treten zwei Winkeleisenringe an die Stelle des Mantelschusses, wodurch auch zwei Rundnähte erforderlich werden. Die an die Blechschüsse anschließenden Schenkel der Winkeleisenrahmen sind auf Blechdicke abgesetzt. Die einfachste Form

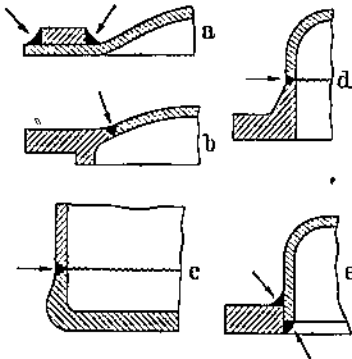


Abb. 222. Schweißung von Deckel- und Bodenverbindungen.

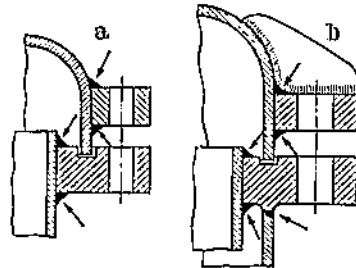


Abb. 223. Deckelschweißungen bei Dampfgefäßverschlässen.

stellt *h* dar, wo zwei die Deckelschrauben aufnehmende Flacheisenringe hochkantig mit der Mantel- und Druckwand durch Kehlnähte verbunden werden. Alle diese Arbeiten verlangen ein folgerichtiges Heften der Nähte in nicht zu weiten Abständen. Bewährte Deckelkonstruktionen für einfache und doppelwandige Druckgefäße sind außerdem in den Abb. 222a bis e und Abb. 223a und b skizziert.

Die Anordnung von Ausgleichteilen in zylindrischen Behältern veranschaulicht Abb. 224, während Abb. 225 einige Ausführungsbeispiele für Stutzenanschlüsse an Behältern und Rohren darstellt.

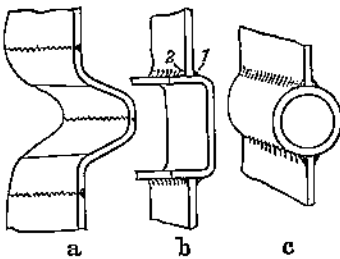


Abb. 224. Ausgleichteile in zylindrischen Behältern.



Abb. 225. Stutzenanschlüsse an Behältern und Rohren.

Doppelwandige Behälter (*i*, *k*, *l* Abb. 221). Sie erhalten sowohl Kehl- als auch V-Nähte, je nach dem Anschlusse des äußeren Mantels. Eine Bauart, die bei dampfbeheizten Boilern beliebt ist, zeigt *k*. An den Anlageflächen des Außenmantels an dem inneren besitzt letzterer eine Sicke, die die Schweißnaht aufnimmt und größere Spannungen vermeidet. Schließlich zeigt *m* den Anschluß eines Außenmantels an den Winkelrahmen eines doppelwandigen Behälters mit lösbarem Boden. Unter Verwendung von Zwischengliedern einfachster Natur können in vereinzelt Fällen Bodenkonstruktionen nach *b* und *c* in Abb. 226 angebracht werden. An Böden mit Flanschausbildung angeschweißte Doppelmäntel sind bei *d* und *e* skizziert. Verbindungen von Scheiben und Naben mit Kesselmänteln und

Doppelwandungen veranschaulichen *a* bis *d* in Abb. 227. Sinngemäß werden Stützen und Lochrandverstärkungen angeschlossen.

Einige Schwierigkeiten verursachen Zwischenböden in Behältern und Kesseln, vor allem dann, wenn sie öl- oder druckdicht sein müssen oder größere Durchmesser, die eine Bodenversteifung verlangen, in Frage kommen. Ausführungsbeispiele sind aus den Skizzen *a*...*h* der Abb. 228 zu ersehen. Der für die Lichtbogenschweißung geeignetsten Nahtverlegung entspricht *d* (Doppelkehlnaht). Hier wie bei *b*, *e*, *f* und *h* ist eine Teilung des Mantelbleches er-

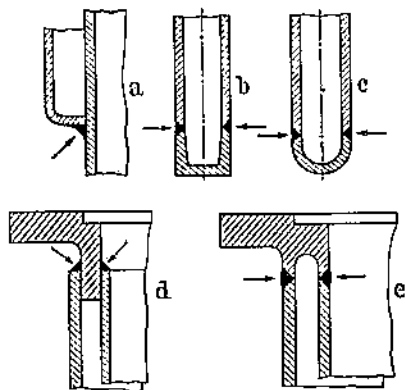


Abb. 226. Geschweißte Zwischenwände und Böden.

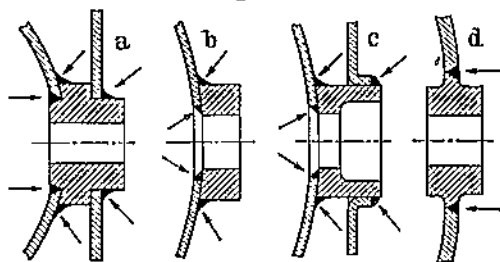


Abb. 227. Verbindung von Scheiben und Naben mit Kesselmänteln.

forderlich, während bei *a*, *c* und *g* die Zwischenböden in den ungeteilten Mantelschuß eingesetzt werden. Außerdem bedingen die Beispiele *a* und *c* eine Zugänglichkeit des Kesselinneren. Je

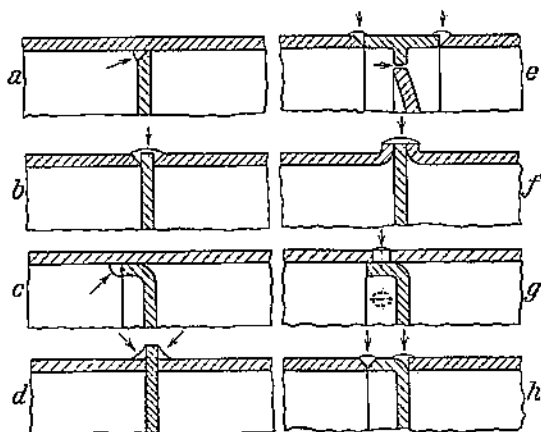


Abb. 228. Geschweißte Zwischenwände in Behältern.

eine dichte Verbindung des Zwischenbodens nicht notwendig und das Behälterinnere für den Schweißer nicht zugänglich, so kann man im Sinne von *g* Abb. 228 verfahren und den gebördelten Boden von außen durch Lochschweißung befestigen.

Gasbehälterschweißung¹. Gasbehälter von größeren Ausmaßen sind bisher nur vereinzelt völlig durch Elektroschweißung hergestellt worden. Dagegen wird die Ausbesserung von Gaslocken, die durch Verrosten undicht geworden sind, oft,

¹ Siehe auch Horn: Die Schweißung von Gasbehältern während des Betriebes. Schmelzschweißung 1929, S. 132...134.

und zwar unter Gasdruck ausgeführt. Explosionen durch die Gegenwart des Lichtbogens in mit Steinkohlengas gefüllten Behältern sind nur dann möglich, wenn die erforderlichen Luftmengen (78...94 vH) vorhanden sind, was beim normalen Betriebe natürlich ausgeschlossen ist. Der Lichtbogen kann demnach nur das Entstehen einer vom ausströmenden Gase genährten Stichflamme, d. h. nur ruhige Verbrennung, zur Folge haben, die im Augenblicke des Verschweißens der entstandenen Öffnung ihr natürliches Ende findet. Durchgerostete Stellen an Gasglocken waren immer das große Sorgenkind der Gaswerke, die zu den verschiedensten Behelfsmitteln griffen, um die Stilllegung der Behälter hinauszuschieben. Nicht nur vereinzelte Flicker oder Blechtafeln werden mit dem Lichtbogen auf die beschädigten Flächen aufgeschweißt, sondern völlig neue Schüsse; ja, ganze Glockenmäntel sind durch Anschweißen von Blechtafeln erneuert worden, wobei oft viele hundert Meter Schweißnaht erforderlich waren. Die angeschweißten Tafeln erhalten Sicken, die die vorhandenen Nietnähte überbrücken. Die Arbeitsausführung verlangt nicht allein verschiedene Vorsichtsmaßnahmen, sondern auch Schweißer, denen das Dichtschweißen dünner Bleche an stehender Wand keine Schwierigkeiten verursacht. Ein sinnreiches Verfahren gestattet auch die Ausbesserung der im Sperrwasser der Behälter bzw. der Teleskop-tassen gelegenen Glockenschüsse, demnach ein Schweißen unter der Wasserlinie, was erreicht wird, indem ein der Krümmung der Glocke angepaßter und nach vier Seiten abgeschlossener Blechkasten mit geeigneten Dichtungstoffen an dem Glockenmantel befestigt und das in ihm befindliche Wasser ausgepumpt wird, so daß die Glockenwand örtlich freiliegt.

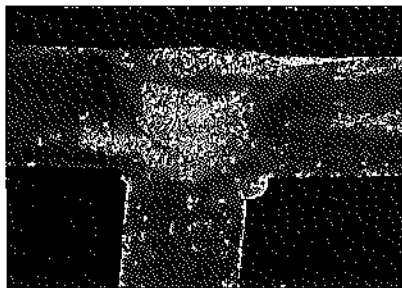


Abb. 229. Geätzter Querschliff einer Dreiblech-naht.

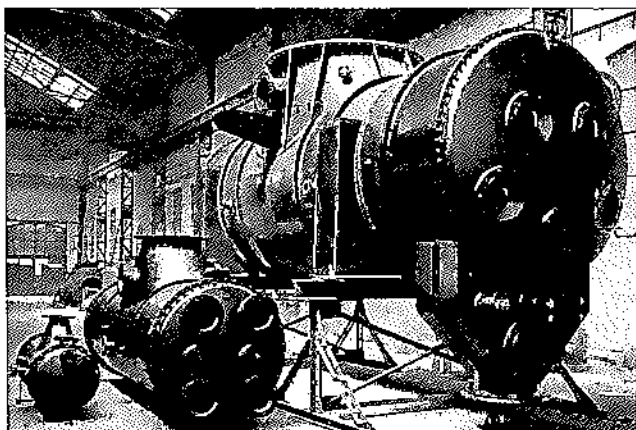


Abb. 230. Oberflächenkondensatoren für Dampfturbinen.

Großbehälterbau. Einige geschweißte Oberflächenkondensatoren für Dampfturbinen verschiedener Größe zeigt Abb. 230. Längs- und Rundnähte, Versteifungsanschlüsse, Anschluß- und Einbaukonsolen, Flanschen usw. sind geschweißt, desgleichen die Versteifungsrippen des Rohrdoms.

Abb. 231 zeigt die praktische Anwendung der bei Abb. 201 besprochenen Rollenböcke. Dabei handelt es sich um drei zusammengeschweißte, nahtlos gewalzte Kesselschüsse einer 12 m³-Druckluftflasche, die eine Länge von 8400 mm und 1400 mm Durchmesser besitzt. Die Blechdicke beträgt 60 mm,

der Betriebsdruck 70 atü. Die Schußkanten sind für die Schweißung der beiden Bodennähte vorbereitet. Auch der auf Rollböcken gelagerte Doppelkessel für

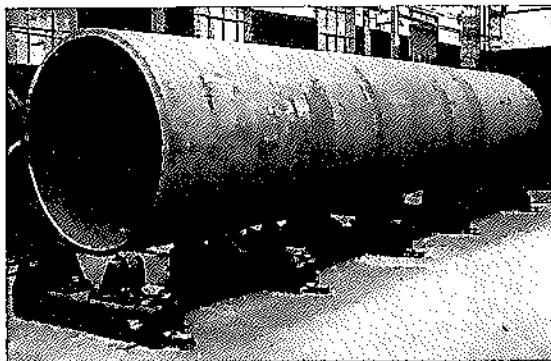


Abb. 231. Geschweißter Mantel eines Hochdruckkessels auf Rollböcken.

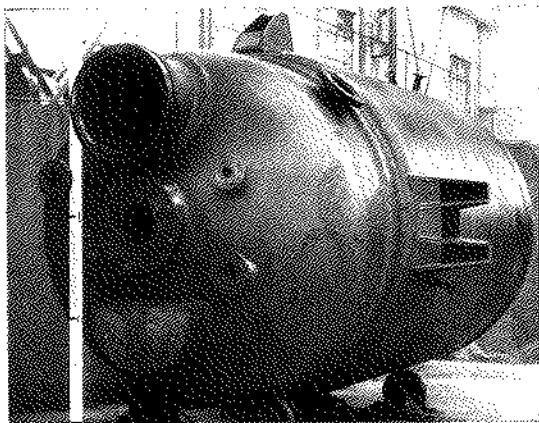


Abb. 232. Geschweißter doppelwandiger Kessel.

Lichtbogen hat dann zwei fast gleich dicke Blechränder anzuschmelzen. Die Rohre d sind im vorliegenden Beispiel in die Rohrwand eingewalzt.

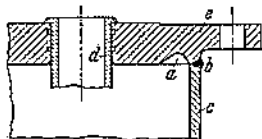


Abb. 233. Angeschweißte abgesetzte Rohrwände.

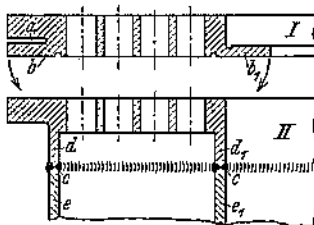


Abb. 234. Maßnahmen zur Abstimmung der Blechdickenübergänge beim Schweißen.

und je ein Ansatz d und d_1 für die Innen- und Außenmäntel e und e_1 geschaffen, die bei c verschweißt werden. Solche Vorkehrungen trifft man besonders bei

16 atü Betriebsdruck der Abb. 232 ist in allen seinen Teilen (Böden, Stutzen, Warzen, Tragpratzen) geschweißt. Die Bodennähte sind eine V-Schweißung, alle übrigen Nähte sind Kehlschweißungen. Der Innenkessel (1800 mm Durchmesser, 3500 mm Länge) besteht aus 31 mm Blech, der Außenkessel (2000 mm Durchmesser, 3100 mm Länge) aus 27 mm Blech.

Rohrwände. Auch bei der Lichtbogenschweißung ist ein plötzlicher Übergang von größeren auf kleinere Werkstoffquerschnitte in oder unmittelbar an der Naht unerwünscht, weil die Bemessung der Elektrode und die ihr angepaßte Stromstärke vom schwächeren Querschnitt abhängig und damit die Gefahr schlechten Einbrands gegeben ist. Man soll deshalb bestrebt sein, schroffe Werkstoffübergänge an der Schweißung zu vermeiden, was z. B. nach den Vorschlägen der Abb. 233 und 234 erreichbar ist. Die Rohrwand e eines Wärmeaustauschers der Abb. 233 ist bei a so ausgedreht, daß ein Anschlußbord bei b entsteht, der etwa der Blechdicke des Mantels c entspricht. Der

In der Darstellung der Abb. 234 I und II, wobei es sich um einen Kondensator handeln kann, wird die Rohrwand so eingestochen, daß eine Ringnut a und ein Flansch b entstehen. Letzter wird warm herangezogen. Desgleichen wird der Innenflansch b_1 herangezogen

Leichtmetallbehältern. Sollen die Rohre nicht wie bei *d* in Abb. 233 eingewalzt, sondern nach Abb. 211e eingeschweißt werden, dann werden zur besseren Wärmebindung konzentrische Ringnuten *d* um die Rohrlöcher in die Wand *a* eingefräst und ein Schweißbord *c* mit entsprechender Abschragung von *a* und Rohr *b* hergestellt.

Behälterberohrung. Nach einem patentierten Verfahren (Samkaberohrung) werden seit einigen Jahren Rohrslangen an beheizten Behältern in der Weise angebracht, daß, wie Abb. 235 darstellt, Heizschlangen *b* spiralförmig um die metallisch reine Behälterwand *a* gewickelt und an diese elektrisch angeheftet werden. Nach dem Einstemmen von Kupferkeilen *d*, die der Vergrößerung der Auflagefläche und besseren Wärmeübertragung von Rohr *b* nach *a* dienen sollen, werden die Rohrspiralen auf ihre ganze Länge beiderseits bei *c* angeschweißt. Bei Behältern aus Gußeisen oder Nichteisenmetallen wird die Berohrung mit Heiz-

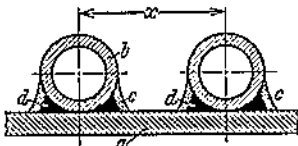


Abb. 235.
Berohrung stählerner Behälter.

schlangen so durchgeführt, daß diese mit geriffelten Kupferunterlagen (Abb. 236) gemeinsam gewickelt und dann geheftet werden. Diese Bauweise hat sich trotz ihrer hohen Gestehungskosten als sehr wirtschaftlich erwiesen und wird heute bereits in

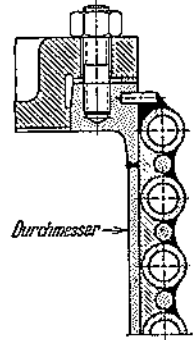


Abb. 236.
Berohrung von Behältern aus Gußeisen oder Nichteisenmetallen.

großem Umfange angewandt. Das Ausführungsbeispiel Abb. 237 stellt eine Destillationsblase mit aufgeschweißter Berohrung dar.

Dampfkesselschweißungen. Unter den Druckgefäßen nehmen die Dampfbehälter, insbesondere aber die feuerbeheizten Dampfkessel, eine Sonderstellung ein. Nachdem man mit der anfänglich nur als Ausbesserungsmittel angewandten Schweißung später auch im Großbehälterbau gute Erfahrungen gemacht hatte, konnte man unter Berücksichtigung aller sicherheitstechnischen Erwägungen auch dazu übergehen, die Schweißung als Verbindungsmittel im Dampfkesselbau zuzulassen. Wenngleich in der Anordnung und Ausführung von Schweißverbindungen zwischen dem Bau von Dampfkesseln und sonstigen Druck- und Großbehältern keine grundsätzlichen Unterschiede bestehen, so sind doch die Vorsicht und die Beschränkung der Anwendung der Schweißung im Kesselbau, die im Abschnitt III („Schweißung“) der Werkstoff- und Bauvorschriften für Landdampfkessel niedergelegt sind, begreiflich. Alle mit der Schweißung von Landdampfkesseln im Zusammenhang stehenden Momente sind in dem mit dem 21. 6. 1939 in Kraft getretenen neuen Erlaß enthalten.

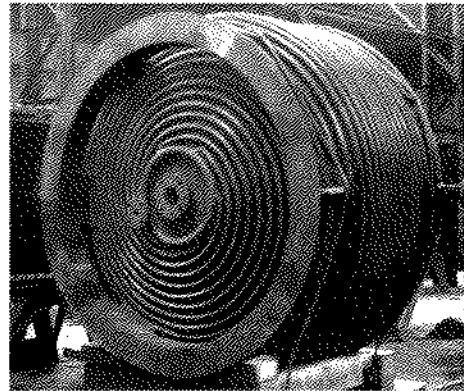


Abb. 237. Elektrisch geschweißte Berohrung einer Destillationsblase.

Nach diesen Vorschriften sind nur dann Schweißverbindungen zulässig, wenn sie den Betriebsbeanspruchungen genügen und durch für solche Arbeiten aus-

drücklich zugelassene Firmen und durch geprüfte Schweißer ausgeführt werden. Die Zulassung erfolgt durch den Reichswirtschaftsminister. Die von diesem für das Dampfkesselwesen eingesetzte Überwachungsstelle ist der Deutsche Dampfkesselausschuß; die Abnahme erfolgt über den Technischen Überwachungsverein (TÜV).

Bezüglich der Schweißverbindungen selbst ist im wesentlichen folgendes hervorzuheben: Sie dürfen nicht erheblich auf Biegung beansprucht werden. In der Regel sind überlappte doppelseitige Kehlnahtschweißungen zu vermeiden und für Längsnähte nur bis 10 mm Blechdicke, für Rundnähte nur bis 15 mm Blechdicke zulässig. Die Schweißnähte sind so anzuordnen, daß sie mit den Feuergasen möglichst nicht in unmittelbare Berührung kommen. Das bezieht sich z. B. auf Flammrohre, Siederohre und Feuerbüchsen. Bohrungen und Ausschnitte in der Schweißnaht und in ihrer Nähe sind möglichst zu vermeiden. Ferner enthalten die Vorschriften ausführliche Angaben über das Spannungsfrei- und Normalglühen geschweißter Kesselkonstruktionen. Von jeder Glühbehandlung kann u. a. abgesehen werden, wenn der Betriebsdruck 8 atü und der Baustoff eine Festigkeit von 42 kg/mm^2 nicht überschreitet, und wenn die Sicherheit von 4,25 nicht unterschritten wird. Unabhängig von der Art des Schweißverfahrens dürfen die Nähte nur mit bis zu 0,7 der Festigkeit des Bauwerkstoffs bewertet werden. Bei über $v = 0,5$ bewerteten Längsnähten ist Nachschweißen der ausgekreuzten Wurzel-seite vorgeschrieben. Darüber hinaus kann auf besonderen Antrag der Bewertungsfaktor 0,9 zugestanden werden, wenn durch eine bestimmte Schweißart oder die Verwendung besonderer Zusatzstoffe die Begründung für eine Höherbewertung nachgewiesen wird (Verfahrensprüfung).

Die Vorschriften erfassen auch Ausbesserungsschweißungen an bereits genehmigten Kesseln und bestimmen, daß derartige Arbeiten grundsätzlich nur im Einvernehmen mit dem zuständigen Sachverständigen des TÜV ausgeführt werden dürfen. Dieser entscheidet im Einzelfalle, inwieweit die Vorschriften anzuwenden sind bzw. von ihnen abgewichen werden darf.

Infolge der z. T. strengen Vorschriften, hauptsächlich insoweit sie sich auf das Glühen der Schweißverbindung erstrecken, sind der Anwendbarkeit des Schweißens in der Fertigung von Dampfkesseln verhältnismäßig enge Grenzen gezogen, und nur einige große Kesselschmiedeen sind in der Lage, allen Forderungen gerecht zu werden. Mit Rücksicht auf die bereits erwähnte weitgehende Übereinstimmung mit der Arbeitsdurchführung, wie sie im Großbehälterbau vorliegt, kann auf Einzelheiten hier verzichtet werden.

Ausbesserung von Dampfkesseln¹. Arbeiten dieser Art stellen schon wegen der meist beschränkten räumlichen Verhältnisse und der Bedingung, in jeder Körperlage schweißen zu können, besonders hohe Anforderungen an die Handfertigkeit, Umsicht und Gewissenhaftigkeit des Schweißers. Instandsetzungsarbeiten an Dampfkesseln dürfen nur unter Beaufsichtigung verantwortlicher Fachingenieure und, wie bereits gesagt, nur im Einverständnis mit den zuständigen amtlichen Überwachungsorganen (TÜV) durchgeführt werden.

Die an Dampfkesseln hauptsächlich vorkommenden Ausbesserungsarbeiten beziehen sich auf die Schweißung von Korrosionen (innere und äußere Anfressungen an allen Kesselteilen), auf abgezehrte und durch häufiges Verstemmen schadhafte gewordene Stemmkannten, Nietköpfe u. dgl. Zu den schwierigsten Arbeiten gehören die Ausbesserungen von Rissen und Brüchen an Nietlöchern, Flammrohren, Boden- und Flammrohrkrepfen, an Kesselmänteln, sowie das Einsetzen

¹ Siehe auch Horn: Die Schweißung von Dampfkesseln. Schmelzschweißung. 1931, S. 173...179.

von Flecken, wobei es sich um Land-, Schiffs-, Lokomobil- und Lokomotivkessel¹ handeln kann. Von der Schweißung alter Kessel, sowie solcher aus Schweißbleisen mit ermüdetem Werkstoff muß ganz allgemein Abstand genommen werden.

Korrosionen. Zu den verhältnismäßig leichten Schweißarbeiten an Dampfkesseln zählt die Ausbesserung von Korrosionen, sofern sie durch normale Auftragsschweißung erfolgen kann. Korrosionen sind muldenförmige, bisweilen sehr große Anfressungen, ähnlich Rostnarben, die sich entweder auf der Wasserseite des Kesselblechs befinden und von chemischen Bestandteilen verunreinigten Wassers oder auch von der Bildung galvanischer Ketten herrühren oder, wenn auch weniger, auf der Feuerseite der Flammrohre anzutreffen sind, wo ihr Ursprung meist auf größeren Schwefelgehalt der Rauchgase zurückzuführen ist. Die Anfressungen sind vor dem Schweißen gründlich von Rost, Kesselstein, Farbe und anderen Verunreinigungen zu befreien. Beim Schweißen der in der Nähe von Nieten und Nietnähten gelegenen Korrosionen ist das Leckwerden von Nieten und Stemmkannten infolge der Schweißwärme zu berücksichtigen, weshalb in solchen Fällen die Schweißarbeit häufig unterbrochen werden muß, um die Erwärmung der Nachbarzonen auf das geringste Maß zu beschränken. In besonders ungünstig gelagerten Fällen sind die Entfernung angrenzender Niete und das Wiedereinsetzen neuer Niete nicht zu umgehen. Sind die Anfressungen sehr umfangreich und tief, so wird der Auftragsschweißung vielfach das Einsetzen eines Flickstücks vorgezogen.

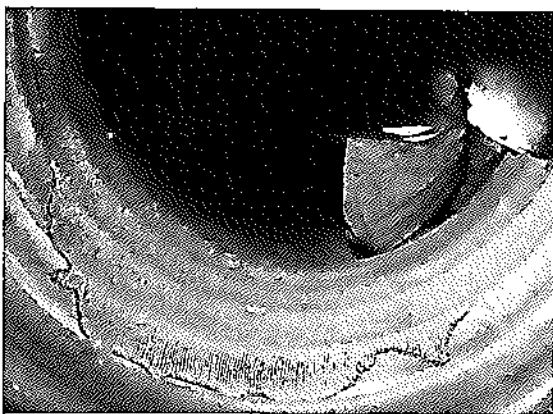


Abb. 238. Verschweißte Korrosionen an einem Kesselflamrohr.

Welchen Umfang Auftragsschweißungen an korrodierten Kesselteilen annehmen können, veranschaulicht die Abb. 238, die eine größere Auftragsschweißfläche an dem Wellrohr eines Zweiflamrohrkessels zeigt. Ausbesserungen solchen Umfangs müssen allerdings als außergewöhnlich bezeichnet werden und sollten nur im Notfalle ausgeführt werden. Hier sei noch besonders betont, daß aus korrosionstechnischen Gründen eine Glättung der Schweißflächen z. B. durch Schleifen nicht ratsam ist, da erfahrungsgemäß die Schweißhaut meist korrosionsbeständiger ist als die Walzhaut eines Bleches. Was außerdem den Übergang der Schweißränder zum Blech anbelangt, so sollte immer darauf geachtet werden, daß scharfe, d. h. plötzliche Übergänge vermieden bleiben, da sonst — wie Abb. 239 veranschaulicht — leicht Kerbwirkungen auftreten können, die zu neuen Rißbildungen Anlaß geben. Der Übergang von der Schweißoberfläche zu der des Kesselbleches soll, wie dies bei c angedeutet ist, allmählich verlaufen. In vorliegender Abbildung wurden Auftragsschweißungen an gewölbten, dazu noch

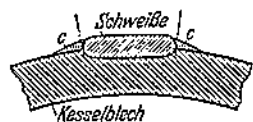


Abb. 239. Auftragschweißung.

¹ Für Schweißarbeiten an Lokomotivkesseln gelten die Bestimmungen der Reichsbahn „Vorläufige Vorschriften für geschweißte Fahrzeuge (Vogefa)“ mit Anhang für geschweißte Lokomotivkessel und -feuerbüchsen.

gewellten Flächen vorgenommen. Beim Schweißen ebener Flächen oder beim Auftragen auf glatte Flammrohre empfiehlt es sich, um die Schweißspannungen auf ein geringes Maß zu bringen, größere Flächen nicht mit parallel liegenden Raupen zu versehen, sondern diese feld-, d. h. abschnitts- und sprungweise, etwa rechtwinklig zueinander anzuordnen, ähnlich so, wie dies bei geriffelten Klinkerplatten der Fall ist.

Anrisse und Brüche. Für die Säuberung von zu schweißenden Rissen gilt das vorher Gesagte. Von Wichtigkeit ist immer ein genügend gründliches Aus-

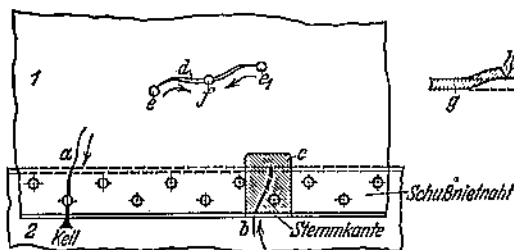


Abb. 240. Schweißen von Rissen.

kreuzen. Haarrisse werden festgestellt, indem man die beteiligten Flächen mit Öl oder Petroleum bestreicht und feines Schmirgel- oder Kreidepulver aufbringt, das in die Risse eindringt und nach Entfernung der Schicht mit einem Lappen den Verlauf des Risses sichtbar werden läßt. Die Tiefe der Auskreuzung des Risses richtet sich nach der Gestaltung des Meißelspans. Solange sich ein doppelter, also geteilter Span zeigt, ist der Auslauf des Risses nicht erreicht. Am häufigsten treten Risse an den Kremen von Flammrohren, Dömen, im Umbug (Kremen) von Kesselböden, in Rohrwandstegen und an Nietlöchern auf. Der Arbeitsgang beim Schweißen

von Rissen soll an Hand der Abb. 240 geschildert werden. Die beiden Blechschüsse 1 und 2 sind durch eine doppelreihige Nietnaht verbunden, und in Blech 1 soll bei *a* ein in Richtung der Stemmkannte verlaufender Riß aufgetreten sein. Er wird ausgekreuzt und in Pfeilrichtung, also an der eingespannten Stelle beginnend, verschweißt. Der vom Riß eingeschlossene Niet muß entfernt und neu eingezogen werden; gegebenenfalls kann in das Rißende ein Meißel oder Keil eingetrieben und der Riß vor der Schweißung erweitert werden.

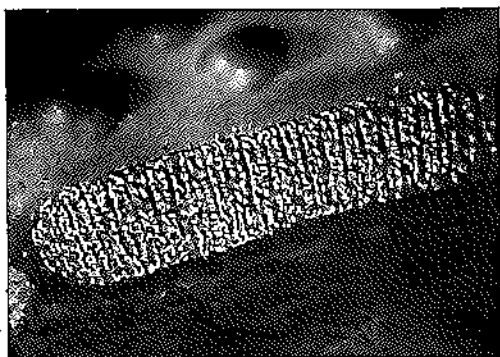


Abb. 241. Teil eines geschweißten Kremenrisses.

Liegt der Riß bei *b* im Blech 2, also unter der Blechüberlappung, und ist diese von der Gegenseite nicht zugänglich, so muß aus der Überlappung des Bleches 1 ein entsprechendes Stück herausgeschnitten und nach Ausbesserung des Risses *b* ein neuer Flicker *c* eingeschweißt werden. Bezüglich der Flickenschweißung sei auf das zu Abb. 247 Gesagte hingewiesen.

Der ungünstigste Fall ist bei *d* angedeutet, wo ein Riß ohne freies Ende, also im vollen Blech, verläuft. Hier gibt es im wesentlichen zwei Ausführungsmöglichkeiten. Die erste besteht darin, die Rißenden bei *e* und *e*₁ abzubohren und bei *f* etwa in der Mitte der Rißlänge einen Keil einzutreiben. Darauf wird von *e* und *e*₁ ausgehend auf den Keil zu geschweißt und zuletzt die von diesem hinterlassene Öffnung zugeschmolzen. Bei der zweiten Ausführung nach Skizze *g* wird der

Riß h mit einer Schweißflamme erhitzt und um ein geringes Maß nach der Schweißseite hin durchgedrückt und aufgetrieben. Nach beendeter Schweißung kann die etwa verbliebene Ausbeulung ausgerichtet werden. Den Ausschnitt aus einer längeren Schweißnaht eines geschweißten Krepfenrisses zeigt Abb. 241.

Eine Schweißarbeit von nicht gerade alltäglichem Umfange wurde in einem Großkraftwerk ausgeführt. Gelegentlich einer Kaltwasserdruckprobe an den seit 12 Jahren im Betriebe gewesenen 10 Wasserrohrkammerkesseln stellten sich Undichtheiten an den feuergeschweißten Ecknähten der Umlaufbleche der Kammerwände heraus. Da an allen Kesseln Stichproben sehr mangelhafte Feuerschweißung erkennen ließen, wurden alle Nähte ausgekreuzt, wie dies bei Rissen geschieht, und rund 800 m Schweißnaht hergestellt. Abb. 242 zeigt Ausschnitte aus den beiden vorderen Wasserkammern eines dieser Kessel. Eine Entlastung der feuergeschweißten Nähte durch die Stehbolzen c war nicht vorhanden, da die Umlaufbleche nicht zwischen den Kammerwänden lagen, sondern vor diesen, so daß die lange, störungsfreie Betriebsdauer der Kessel verwunderlich war. Das Bild zeigt bei a an der Kammer 2 die zur Schweißung durch Auskreuzen vorbereiteten Fugen und bei b das Aussehen bereits fertiggeschweißter Nähte. An der linken Kammer 1 ist außerdem die Anordnung der einzelnen Lagen erkennbar.

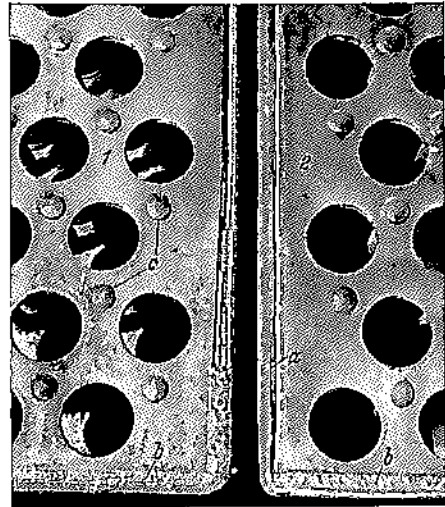


Abb. 242. Geschweißte Umlaufbleche an einem Wasserrohrkessel.

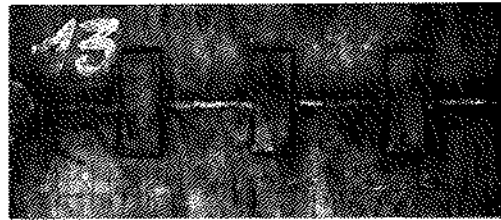


Abb. 243. Mit Laschen gesicherte Schweißnaht.

Laschensicherung. Der Wert einer durch Laschen gesicherten und damit vermeintlich entlasteten Schweißnaht ist viel umstritten, und man ist heute der Auffassung, daß sich die zusätzlichen Querspannungen, die durch die Summe der Einzelnähte der Laschen entstehen, recht ungünstig auswirken können. Deshalb ist man ganz allgemein von der Verstärkung der Naht durch Laschensicherung abgegangen. Nur der Vollständigkeit halber sei in Abb. 243 ein Abschnitt einer mit sog. Höhnschen Laschen (Querlaschen) gesicherten Naht vor Augen geführt. Demgegenüber sind Versteifungsklammern (Hochkantlaschen) an feuergeschweißten Wasserkammern häufig und mit bestem Erfolge angebracht worden. Die Anordnung der Klammern und ihrer Schweißnähte geht aus Abb. 244 hervor, während Abb. 245 eine praktische Ausführung wiedergibt.

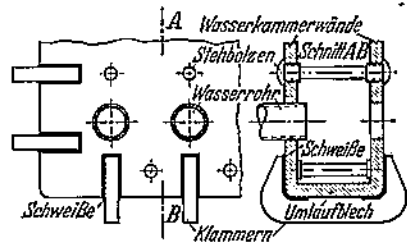


Abb. 244. Versteifungsklammern an Wasserkammern.

Einsetzen von Flicken. Wo sich eine unmittelbare Verschweißung tiefer und großflächiger Korrosionen nicht mehr lohnt, oder dort, wo Risse und Anbrüche durch die Einwirkung von Gasen oder von Wasser stark angefressenen Werkstoff erkennen lassen, werden Blechflicken eingesetzt. Aufgesetzte, d.h. überlappte Flicken

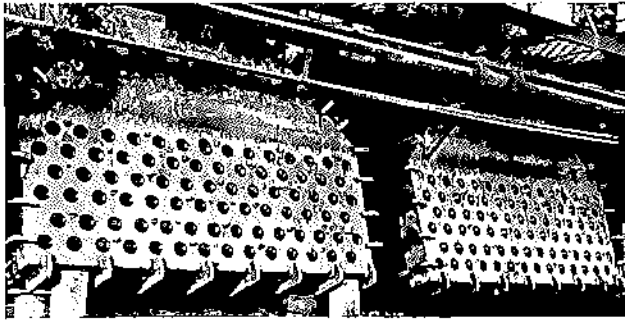


Abb. 245. Praktische Anwendung von Verstärkungsklammern.

gibt es bei Dampfkessel-schweißungen nicht. Für den Arbeitsgang ist die örtliche Lage des Flickens maßgebend, und die Schweißung wird um so schwieriger, je mehr Seiten des Flickens in das Blech einzuschweißen sind. Der schwierigste Fall wäre demnach das Einsetzen eines an vier Seiten einzu-

schweißenden Flickens, um so mehr dann, wenn

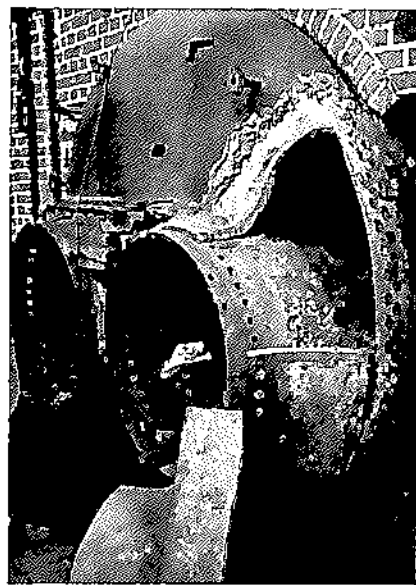


Abb. 246. Zur Schweißung vorbereiteter Dampfkesselboden.

er in einer ebenen Fläche liegt. Das Vorschauen eines einseitig geschweißten Flickens kommt im Kesselbau verhältnismäßig selten vor. Das Einsetzen eines Flickens mit Zweikantenschweißung geht aus Abb. 246 hervor. Das Bild zeigt den zur Schweißung vorbereiteten Zweiflammrohrkessel, an dem rechtsseitig ein Teil des vorderen schadhaften Bodens mit dem Schneidbrenner entfernt wurde. Die anteiligen Niete im Mantel und dessen Überlappung, sowie am vorderen Schusse des Flammrohrs sind ebenfalls entfernt. Ein neues, der Form des ausgeschnittenen Stückes gut angepaßtes Kesselblech (im Vordergrund des Bildes sichtbar) wird an den Schweißrändern abgeschrägt, wie dies auch an den Bodenrändern zu erkennen ist. Das eingepaßte Stück wird sorgfältig geheftet und von außen mit der erforderlichen Anzahl Lagen verschweißt, ohne daß in Anbetracht der freien Beweglichkeit des Körpers besondere Maßnahmen bezüglich der Wärmeableitung erforderlich sind. Die unter der Mantelüberlappung gelegenen Nahtstrecken werden vom Kesselinnern aus verschweißt, wie es überhaupt notwendig ist, das Innere der Schweißfuge mit einer Kappnaht zu überziehen. Nach voll-

endeter Schweißung werden die Nietnaht-überlappungen warm angerichtet, die Nietlöcher in die Flicken eingebohrt, neue Niete eingezogen und die Stammkante nachgestemmt. Für die Durchführung solcher Arbeiten bestehen — immer wieder sachgemäße Schweißung und folgerichtigen Arbeitsgang vorausgesetzt — keine sicherheitstechnischen Bedenken. Es muß jedoch erwähnt werden, daß alle Flicken, gleichgültig, ob eine oder alle vier

Seiten eingeschweißt werden müssen, stramm in die Öffnung einzupassen sind, damit die durch Schrumpfung der Schweiße eintretende Verkürzung des Bleches keine unzulässig hohen Zugspannungen in das Kesselblech hineinbringt.

Beim Einsetzen dreiseitig einzuschweißender Flicken verfährt man im Sinne der Abb. 247 I. Zunächst wird die Strecke a geschweißt, und darauf werden von b und c ausgehend die Schweißnähte b_1 und c_1 in Richtung der freien Blechkante ausgeführt. Hierbei ist es wichtig, keine scharfen Ecken, sondern stets Abrundungen (b und c) vorzusehen, damit Spannungsrisse verhütet werden. Sowohl hier als auch bei dem zweiseitig geschweißten Flicken der Abb. 246 ist an den freien Enden ein Blechlängenzuschlag zu geben, damit die fertiggestellte Schweißung maßhaltig ist.

Endlich zeigt Abb. 247 II den Arbeitsgang, wie er neben anderen Möglichkeiten beim Einsetzen eines vierseitig geschweißten Flickens üblich ist. Zur Bekämpfung der auftretenden Schweißspannungen hat sich oft ein Auspoltern der Flicken — wie bei d skizziert — als vorteilhaft erwiesen. In der Abb. 247 II ist das Stichmaß i der Auswölbung übertrieben gezeichnet; in der Praxis genügt auch bei größeren Flicken $i = \text{Blechdicke}$. Die Wölbung wird nach der leichter zugänglichen Seite, möglichst aber nach der Schweißseite hin verlegt. Kehrt der Flicken nach gänzlichem Erkalten der Schweißnähte nicht in die Ebene zurück, so ist ein Warmnachrichten erforderlich. Die Reihenfolge der Schweißnähte ist mit Buchstaben $e \dots h$ bezeichnet, wobei größere Einzellängen noch abschnittsweise geschweißt werden können.

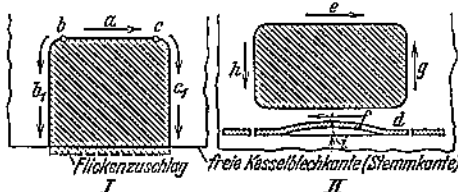


Abb. 247. Einsetzen von Flicken.

d) Maschinenbau.

Allgemeiner Maschinenbau. Im Behälter- und Kesselbau ersetzt die Schweißung vornehmlich das Nieten, im Maschinenbau außerdem vielfach den Guß und Schmiedestücke unter dem Schlagworte „Schweißen statt Gießen“. Jedoch werden heute noch vielfach abwegige Konstruktionen ausgeführt, die den schweißtechnischen Eigentümlichkeiten nicht gerecht werden und sich krampfhaft an genietete und gegossene Formen halten, von denen sie jedoch abweichen müssen, wenn technische und wirtschaftliche Vorzüge erzielt werden sollen. Die Vorteile der Schweißung gegenüber der Nietung sind: vielseitigere, ungezwungene Formgestaltung, Formschönheit; Fortfall der Überlappung und damit Gewichts- und Frachtersparnis; Fortfall der Konstruktionsschwächung durch Nietlöcher, die größere Werkstoffdicken bedingt; dauernde Dichtheit; glatte Oberfläche durch Fortfall der Nietköpfe; Geräuschfreiheit bei der Herstellung (wobei an Preßluftwerkzeuge zu erinnern ist); geringerer Preis u. a. Außerdem fällt die bei der Nietung bestehende Gefahr der Lockerung der Verbindung fort.

Wenn auch die höhere Korrosionsbeständigkeit des Gußeisens und sein oft ausschlaggebender Vorteil der Starrheit und damit geringer Eigenschwingung nicht zu verkennen ist, so wird die geschweißte Stahlkonstruktion, die häufig schwerer gehalten und mehr versteift werden muß, als hinsichtlich ihrer statischen oder dynamischen Beanspruchung erforderlich wäre, trotzdem bevorzugt, da sie gegenüber dem gegossenen Körper folgende Vorteile aufweist: bedeutende Gewichtersparnis; größere Festigkeit; erheblich größere Widerstandsfähigkeit gegen Bruch; Modellfortfall, besonders bei Einzelanfertigung; geringe

Bearbeitungszugabe; nachträgliche Änderungsmöglichkeit und nicht zuletzt die von gießereitechnischen Rücksichten unabhängige, freizügige Formgebung. Außerdem kann in besonderen Fällen an große Werkstoffquerschnitte ein kleinerer angeschlossen werden.

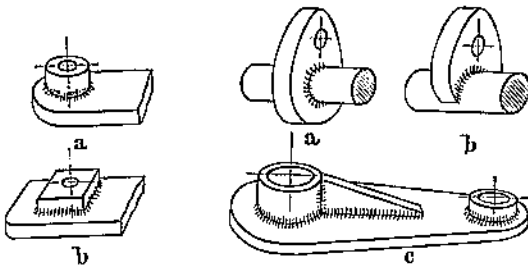


Abb. 248. Geschweißte Augen an Hebeln.

Abb. 249. Geschweißte Hebel und Kurbel.

Unter den einfachsten Maschinenelementen sind Hebel, Naben, Nocken, Stützteile, wie Füße und Pratten, Stangen, Kurbeln, Räder und Scheiben, Lager u. ä.

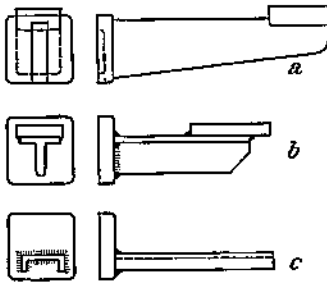


Abb. 250. Konsole, gegossen und geschweißt.

hervorzuheben, die großenteils aus Abfallwerkstoff zusammengeschweißt werden können. Der Konstruktionsgedanke für solche Gebilde kommt in den folgenden Bildern zum Ausdruck. So zeigt Abb. 248 auf Flacheisenhebel aufgeschweißte Augen, und zwar rund (a) und eckig (b). Bei a und b in Abb. 249 sind auf Wellen (z. B. Bremsgestänge) aufgeschweißte Nocken oder Hebel skizziert. In der gleichen Abbildung gibt c einen Hebel mit Augen und Rippenversteifung wieder, wie er z. B. für größere Handkurbeln im Hebezeugbau denkbar ist.

Zu den leichteren Schweißarbeiten im Maschinenbau zählt auch die Herstellung von Konsolen, wie eine solche in drei Ausführungsformen in Abb. 250 dargestellt ist. b und c sind geschweißte Ausführungen und der gegossenen a gegenübergestellt.

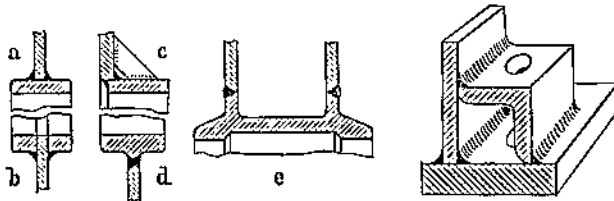


Abb. 251. Geschweißte Naben.

Abb. 252. Schraubenansatz an Maschinenständern und Stützen.

Einige aus Rundstahl hergestellte und mit dem Radkörper (Rad, Scheibe, Trommel usw.) durch Schweißung verbundene Naben sind in Abb. 251a bis d skizziert. Dabei ist in den ersten drei Darstellungen an Walzeisen gedacht und bei c außerdem an eine Rippenverstärkung. d und e können ebenso Stahlgußnaben sein, an die Stahlscheiben V- oder X-förmig angeschlossen werden. Mannigfach ist auch die Möglichkeit für die Ausbildung von Schraubenansätzen an Maschinenständern, Grundplatten u. a., wie dies als Beispiel für viele in Abb. 252 gezeigt ist.

¹ Eine reichhaltige Sammlung ausgeführter Schweißkonstruktionen ist zusammengestellt in: Händchen: Schweißkonstruktionen. Berlin: Springer, 1939.

Im Vorrichtungsbau, insbesondere bei der Herstellung von Bohrlehren, ist die Lichtbogenschweißung insofern ein willkommenes Hilfsmittel, als sie bei einfachster Formgebung die Verwendung selbst geringster Werkstoffabfälle gestattet. Zudem handelt es sich hier meist um Einzelanfertigungen bzw. um einmalige Herstellung, so daß durch Werkstoff- und Modellersparnis sowie erheblich geringere Bearbeitung auch Ersparnisse an Gestehungskosten zu erzielen sind. Eine gute schweißtechnische Konstruktion einer Bohrvorrichtung für größere Werkstücke zeigt Abb. 253.

Die eingangs erwähnten Vorzüge der geschweißten Blechkonstruktion im Vergleich zum Gußeisen kommen bei der Fertigung von Radschutzkästen und Radverdecken fast alle zur Auswirkung. Einen größeren geteilten Radschutzkasten für eine 25 t-Laufkatze bringt Abb. 254, bei der die Lagerbuchsen, die Kastenflanschen, Versteifungsrippen, Nocken usw. mit dem Lichtbogen an das Gehäuse angeschweißt sind.

Durch zweckmäßige Vereinigung von Blechen und Formstahl lassen sich Tragkonstruktionen, Aufspannroste, Spannbocke, Grundplatten und ähnliche Körper wirtschaftlich und vielgestaltig ausführen. Gerade bei solchen Arbeiten fallen neben Gewichtersparnis, Bruchicherheit, die bedeutende Ermäßigung der Be-

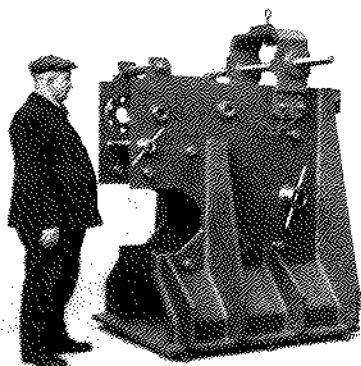


Abb. 253. Geschweißte Bohrvorrichtung.

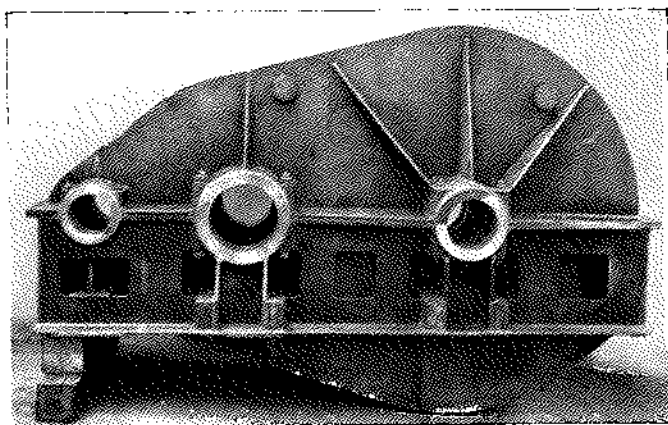


Abb. 254. Schutzkasten für Rädergetriebe.

arbeitungsflächen und der Fortfall der Modellanfertigung ins Gewicht. Hinzu kommt die bisher unerwähnte, mitunter aber ausschlaggebende, verkürzte Lieferzeit. Auch hier sollen nur einige Beispiele gebracht werden. Die in Abb. 255 angedeuteten Konstruktionseinzelheiten lassen erkennen, daß der Zusammenbau an Maschinengrundplatten sowohl unter Verwendung normaler Walzprofile als auch durch die Anordnung abgekannter Blechprofile gleichermaßen möglich ist. So ist bei der Konstruktion I (Abb. 255) nur Formstahl (U- und L-Eisen), bei

der nach II sowohl Formstahl wie gebogener Blechwerkstoff verwendet werden. Die Grundplatte eines Maschinensatzes (Abb. 256) verzichtet gänzlich auf die Verwendung von Formstahl. Die zu bearbeitenden Auflageflächen sind durch Kehlnähte aufgeschweißt. Leichte, durch Formstahl unverstärkte Grundplatten und Rahmen können noch dadurch vereinfacht werden, daß die Blechtafeln mit kleinem Radius abgekantet und nur die Rahmenecken eingeschweißt werden, wodurch die rings um die Platte verlaufenden Verbindungsnahte zwischen Seiten- und Deckenwänden fortfallen. Etwa erforderliche Versteifungen lassen sich durch Anschweißen

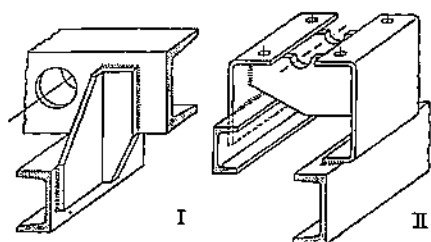


Abb. 255. Konstruktionseinzelheiten bei Grundplatten.

mit beliebiger Teilung angebrachter Winkel- oder Stegbleche erzielen. Zur Erhaltung der Winkligkeit und zur Erleichterung der Zusammenbauarbeit werden

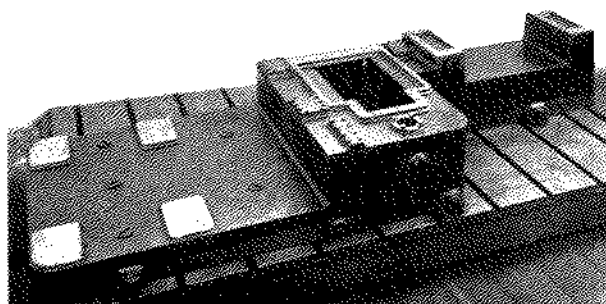


Abb. 256. Grundplatte für Maschinensatz.

solche und ähnliche Körper auf Spannplatten mit geeigneten Vorrichtungen vor allem während des Heftens festgespannt.

Die Herstellung von Rädern aller Art in geschweißten Stahlkonstruktionen wird praktisch nur dann erwogen, wenn Einzelfertigung vorliegt oder durch längere Lieferfristen bedingte Betriebsstörungen vermieden werden sollen. Im

übrigen wird die geschweißte Konstruktion mit der Massenerstellung gegossener Räder wirtschaftlich nicht in Wettbewerb treten können, vor allem dann nicht,

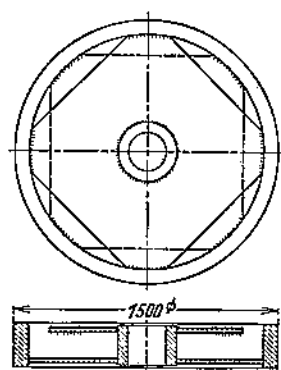


Abb. 257. Geschweißter Radkörper.

wenn es sich um kleinere Abmessungen handelt. Bei nicht zu hoher Beanspruchung des Rades können die Speichen durch Bleche ersetzt werden, die entweder ringsum oder — wie es in Abb. 257 der Fall ist — nur abschnittsweise mit dem Kranz und der Nabe verschweißt werden. Kranz und Nabe werden aus gewalzten Werkstoffen eingerollt und stumpfgeschweißt. Das Beispiel eines aus gewalztem Stahle geschweißten Zahnrad mit Verstärkungsrippen zeigt Abb. 258 im unbearbeiteten und bearbeiteten Zustande. Der Arbeitsgang ist dabei folgender: Zunächst wird die Scheibe *a* an die Nabe und dann die Scheibe *b* an die Nabe und die Scheibe *a* angeschweißt. Darauf wird das Ganze in den Radkranz eingepaßt und mit diesem durch eine Kehlnaht verbunden; zuletzt werden die sechs Stegrippen *c* eingesetzt und mit Scheibe, Kranz und Nabe verschweißt.

Ausbesserungen. Das ursprünglich vorherrschende Anwendungsgebiet der Schweißung war die Instandsetzung schadhafter Maschinenteile. Obgleich auch

heute noch die Ausbesserung durch Schweißung von großer Bedeutung ist, so tritt sie doch im Verhältnis zur Fertigung in der mengenmäßigen Anwendung zurück. Sie erstreckt sich auf die Instandsetzung von gerissenen, gebrochenen, abgenutzten und durch Verrosten geschwächten Maschinenkörpern aus den verschiedensten Metallen. Allgemein wird daher auf die verschiedenen zugehörigen Unterabschnitte

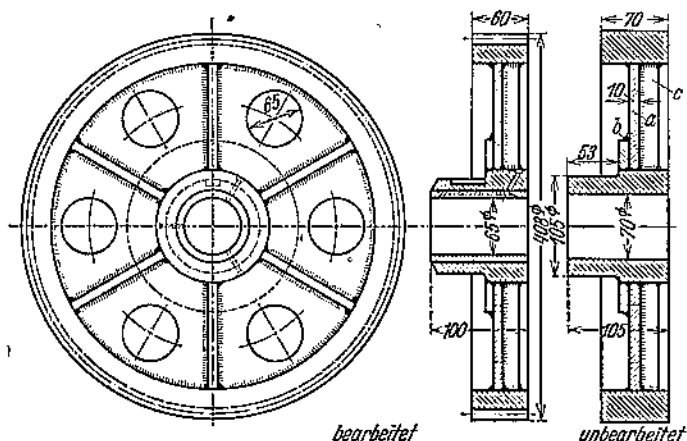


Abb. 258. Geschweißtes Zahnrad.

dieses Buches verwiesen. Hier soll nur die Ausbesserung von Stahlteilen durch Auftragsschweißung erwähnt werden, wobei nicht allein durch betriebsmäßige Beanspruchung anfallende Ausbesserungsarbeiten in Frage kommen, sondern auch solche, die auf Grund von Fertigungsfehlern bei spanabhebender Bearbeitung oder beim Schmieden und Pressen auftreten. So z. B. sind beim Fräsen oder Hobeln von Kurbelstangen, Kurbelwellen, Pleuelstangen und ähnlichen wertvollen Maschinenteilen entstandene Bearbeitungsfehler durch Auftragen von jeweils gut angepasstem Elektrodenwerkstoff zu beseitigen.

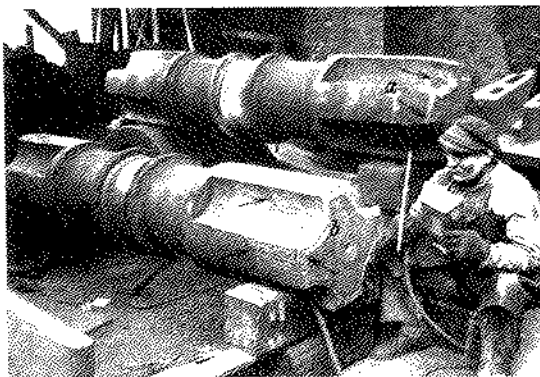


Abb. 259. Auftragsschweißung an Walzenzapfen.

Im Betriebe durch Verschleiß schadhaft gewordene Achsen, Wellen, Zapfen, Kulissen und andere Maschinenteile werden ebenfalls durch Auftragsschweißung ausgebessert. Häufig werden zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit besonders legierte Elektroden, beispielsweise solche mit hohem Mangan Gehalt, verwendet (siehe Abschnitt: „Die Schweißelektrode“). So zeigt Abb. 259 zwei Stahlwerkswalzen, die an den Stellen *a*, an den sog. Kleeblattzapfen, starken Verschleiß aufweisen. Die im Vordergrund des Bildes mit *b* bezeichnete Walze ist bereits, wie die Pfeile andeuten, durch Auftragsschweißung mit manganlegierten Elektroden ausgebessert und verschleißfester gemacht. Derartige Walzenzapfenabnutzungen treten

laufend auf, und häufig wird das Auftragen von 100 kg Elektrodenwerkstoff und mehr je Zapfen erforderlich. Da trotz der großen Schweißmasse an diesen Walzen schon in Anbetracht der meist großen Abmessungen ein geringes Verziehen des Körpers unschädlich ist, brauchen besondere Maßnahmen bei der Durchführung der Ausbesserung kaum getroffen zu werden. Dagegen ist beim Auftragen auf Wellen oder Zapfen, die durch sauberes Schlichten zu bearbeiten sind — soweit sie auf Grund ihrer betrieblichen Verhältnisse und ihrer etwaigen Sonderlegierung überhaupt schweißbar sind —, darauf zu achten, daß eine ein-

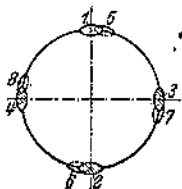


Abb. 260. Lagenverteilung beim Auftragen auf Wellen.

seitige Erhitzung, die ein radiales Verziehen herbeiführt, verhütet wird. Das wird durch richtige Reihenfolge in der Verteilung der Schweißraupen erreicht, wie es die Zahlenfolge der Abb. 260 angibt. Mit anderen Worten, es wird ein Verziehen infolge ungleichmäßiger Wärmeverteilung durch jeweils gegenüberliegend zu schweißende Raupen vermieden. Auftragsschweißungen an Wellen können nur in axialer Richtung, mithin längs der Welle und niemals radial, also quer zur Achse erfolgen, da die letzte Ausführungsart in der Praxis häufig Dauerbrüche zur Folge hatte. Ist ein Auftragen von Keilen, Keilflächen oder in Nuten notwendig, so muß mit,

größeren zeitlichen Unterbrechungen geschweißt werden, um eine zu große einseitige Wärmefaufnahme der Welle auszuschließen.

Eine mit hochmanganhaltigen (14 vH Mn) Elektroden, also mit einem besonders verschleißfesten Werkstoff ausgeführte Schweißung an einer Kettentrommel aus Manganhartstahl ist in Abb. 261 wiedergegeben. Die Schweißflächen sind durch Pfeile hervorgehoben.

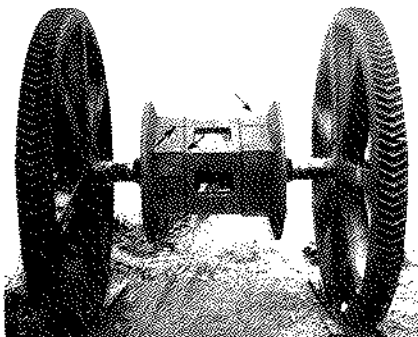


Abb. 261. Auftragsschweißung an einer Kettentrommel.

Kraftmaschinen. Die im allgemeinen Maschinenbau gesammelten Erfahrungen ermutigten den Ingenieur, die Elektroschweißung auch auf den Bau von Kraftmaschinen auszudehnen. Angesichts der vielseitigen Erfolge hat die geschweißte Maschinenkonstruktion das Gußeisen auf diesem Sondergebiete z. T. völlig verdrängt. Heute werden Maschinen auch von allergrößten Abmessungen in geschweißter Stahlbauweise ausgeführt. Der Zusammenbau geschieht auch hier durch Blech- und Formstahleinzerteile von mit-

unterrecht ansehnlichen Wanddicken. Die sich aufdrängende Frage, ob der gegossene Körper nicht billiger herzustellen ist und ein Verziehen der Schweißkonstruktion teure Nacharbeiten erfordert, kann dahingehend beantwortet werden, daß der geschweißte Gegenstand stets billiger wird. Das liegt daran, daß sich viel weniger Bearbeitungsflächen ergeben und bei richtigem Arbeitsgang, d. h. bei folgerichtiger Reihenfolge in der Ausführung der Schweißnähte eine Verwindung der Konstruktion praktisch so gut wie gar nicht vorkommt, während gegossene Körper von großen Abmessungen beim Erkalten oft recht störende Verwerfungen erfahren.

Das völlig geschweißte, mit Rippenversteifungen versehene Maschinengestell eines 250 PS diesel-elektrischen Maschinensatzes für einen Triebwagen bringt Abb. 262 im Rohzustand. Zu erwähnen ist, daß man auch die Schweißung größter Schiffsdieselmotoren erfolgreich durchgeführt hat.

Weniger Anwendung als im Explosionsmotorenbau findet die Schweißung im Dampfmaschinenbau. Doch sind hier die ersten Versuche gemacht worden, einzelne Maschinenelemente, wie Kreuzköpfe, Pleuelstangenköpfe, Pleuelstangen u. ä., aus geschweißten Stahlkonstruktionen anzufertigen, z. T. unter Verwendung von Trägerprofilen.

Die Tatsache, daß der Elektromaschinenbau von der Schweißtechnik den ausgiebigsten Gebrauch macht, ist u. a. wohl in dem Interesse an der Förderung der Elektroschweißung begründet. Man ist — wie im übrigen Maschinenbau, was verständlich ist — nur schrittweise vorgegangen und hat die an zunächst unwesentlichen Bauteilen ausgeführte Schweißung im Betriebe aus-

reichend beobachtet, bevor man auf Grund guter Erfolge gänzlich geschweißte Elektromaschinen unbedenklich bauen konnte. So wurden ursprünglich nur ruhende Maschinenteile, wie Grundrahmen, Gehäuse, Lager, und später erst auch umlaufende Teile, wie Lüfter und Läufer, geschweißt. Wie im Dieselmotorenbau war auch hier vorerst nur der Anreiz zur Ausführung mittelgroßer, geschweißter Einheiten gegeben, da die Herstellung kleinerer, geschweißter Maschinentypen keine wirtschaftlichen Vorteile erwarten ließ. Diese Vermutung traf jedoch nicht zu, und man schweißt heute nicht allein große und allergrößte Einheiten, sondern man hat bereits Wege beschritten, auch kleine Maschinen in Stahlkonstruktion zu bauen.

Eine Vorstellung von einem für den elektrischen Einbau fertigen, geschweißten Ständergehäuse einer größeren Dynamomaschine soll die Abb. 263 vermitteln. Schon bei flüchtiger Betrachtung sind neben gefälligem Aussehen die gute Versteifung und das geringe Gewicht des Körpers festzustellen.

Den Ständer einer noch größeren Einheit veranschaulicht die Abb. 264. Die Aussparungen, die der besseren Lüftung dienen und gleichzeitig eine Gewichtsersparnis bedeuten, sind mit dem Schneidbrenner ausgeführt worden.

Werkzeugmaschinen. Wenn die Schweißung im Werkzeugmaschinenbau anfänglich nur zögernd Eingang fand, so lag dies nicht allein an verschiedenen kon-

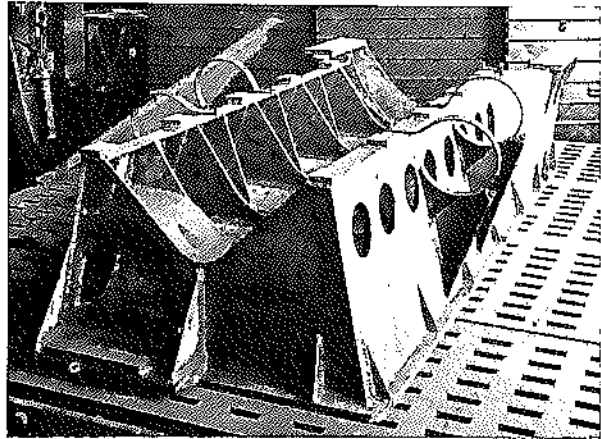


Abb. 262. Geschweißtes Dieselmotorengestell.

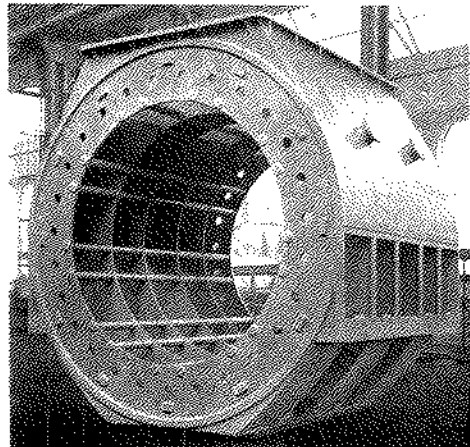


Abb. 263. Geschweißtes Dynamogehäuse.

struktiven Rücksichten, sondern es waren auch rein äußerliche Bedenken in der Formgestaltung maßgebend. Es war das Gefühl zu überwinden, daß abgerundete

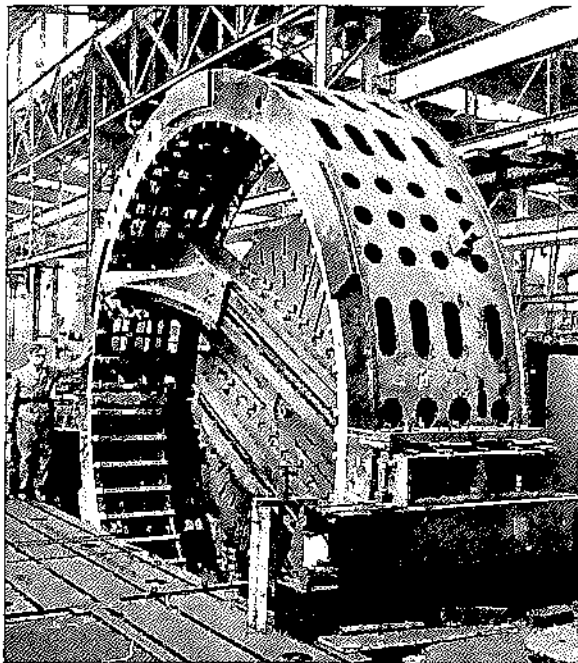


Abb. 264. Geschweißter Ständer einer Dynamo.

und geschweißte Übergänge gegossener Körper mehr ansprechen als die ebene, winklige und scharfe Begrenzung der geschweißten Stahlbauweise. Die geringsten Schwierigkeiten treten dort auf, wo auch vor der geschweißten Ausführung nicht Gußeisen, sondern Stahl — wenn auch genietet — verwendet wurde. Für die Gestaltung geschweißter Werkzeugmaschinen können verschiedene Grundsätze maßgebend sein, immer aber wird die Versteifung der Konstruktion gegen Schwingung im Vordergrund stehen. Der Querschnitt der Maschinenteile muß eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen Biegung und Verdrehung aufweisen, was auf verschiedene Art erreichbar ist. Es haben sich hauptsächlich drei Konstruktionsgedanken

durchgesetzt, und zwar die Platten-, Zellen- und Schalenbauweise. Die Plattenbauweise, die älteste unter ihnen, lehnt sich grundsätzlich an die

Gußkonstruktion an und kommt in den Abb. 268 und 269 zum Ausdruck. Bei der Zellenbauweise wird die Starrheit und Schwingungsfestigkeit der Konstruktion durch Aussteifung (meist Diagonalverstreben) erreicht, derart, daß Zellen, ähnlich den Bienenwaben angeordnet und dadurch die Werkstoffdicken wesentlich verringert werden (Abb. 265 und 266). Unter Schalenbauweise versteht man eine im Verhältnis zu den Körperabmessungen dünnwandige, durch Spanten und ähnliche Elemente ausgesteifte Blechkonstruktion, wie sie unter anderem bei Flugzeugrümpfen und -flügeln vorkommt. Das Maß der Versteifung ergibt sich aus dem Zusammenwirken der Spanten mit der raumbegrenzenden Schale. Im weiteren Sinne ist auch der Schiffskörper eine Schalenkonstruktion. In Abb. 265 handelt es sich um das Bett einer Schleifmaschine, dessen

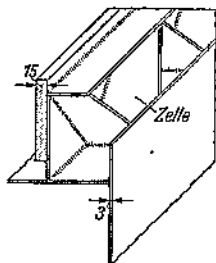


Abb. 265. Geschweißte Zellenkonstruktion eines Schleifmaschinenbetts.

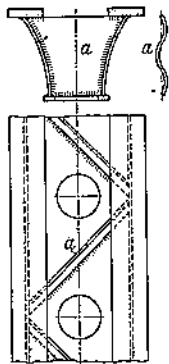


Abb. 266. Geschweißtes Drehbankbett (Diagonalverstrebung).

gibt sich aus dem Zusammenwirken der Spanten mit der raumbegrenzenden Schale. Im weiteren Sinne ist auch der Schiffskörper eine Schalenkonstruktion. In Abb. 265 handelt es sich um das Bett einer Schleifmaschine, dessen

Schwingungsfestigkeit und Starrheit durch eingeschweißte Zellen gewährleistet wird¹.

Die Konstruktion eines mit Diagonalverstreben versehenen Drehbankbettes zeigt Abb. 266 und Abb. 267 eine völlig geschweißte Ausführung ähnlicher Bauart, bei der Bett, Getriebekasten, Support und Reitstock geschweißte Stahlausführung sind. Lediglich für eine der Gleitflächen wird wegen des besseren Gleitens Guß beibehalten, doch ist man z. T. schon dazu übergegangen, auf die

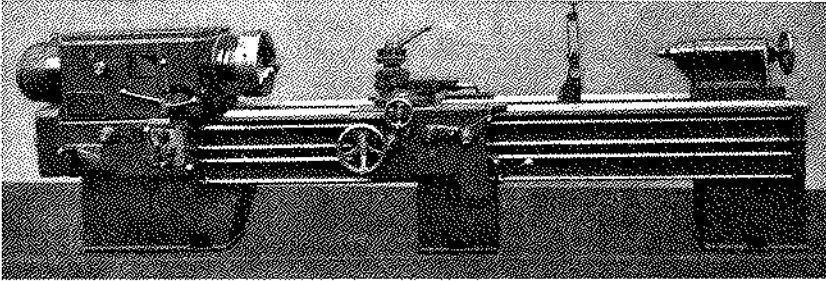


Abb. 267. Geschweißte Leitspindeldrehbank.

jeweils kleinere oder geeignetere Gleitfläche eine Gußschicht aufzuschweißen, um zur restlos geschweißten Ausführung zu kommen. Eine schwungradlose Blechschere für 6 m Schnittlänge bei 8 mm Blechdicke gibt Abb. 268 wieder, bei der

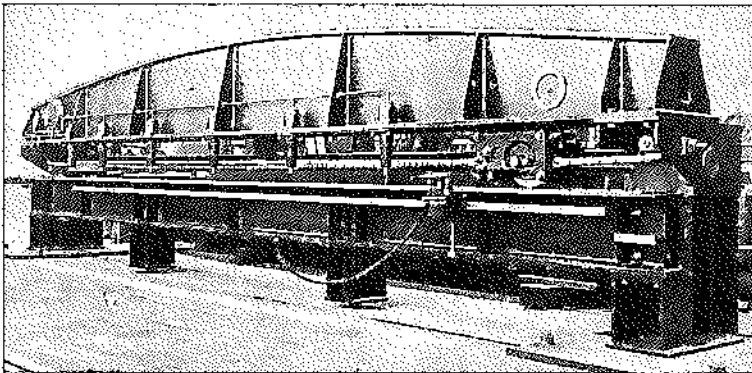


Abb. 268. Blechschere in geschweißter Stahlkonstruktion.

Durchbiegungen durch eingeschweißte Stegplatten ausgeschlossen werden, deren Anzahl, falls es wünschenswert erscheinen sollte, ohne nennenswerten Aufwand nachträglich erhöht werden kann. Solche nachträglichen Verbesserungen wären bei der Gußausführung nicht möglich.

Beim Bau sehr großer und schwerer Pressen bringt die Stahlkonstruktion recht erhebliche Gewichtsersparnisse. Auch sind infolge der höheren Festigkeit von Stahl bei bisweilen auftretenden Überlastungen Brüche nicht mehr zu erwarten.

¹ Sammlung von Beispielen: Krug: Der Stahlbau bei Werkzeugmaschinen. Werkstattstechnik u. Werksleiter 1937, S. 541 ff.

Fehlschläge sind auf unzureichende Bemessung und Aussteifung zurückzuführen. Abb. 269 zeigt noch einige Konstruktionsgedanken für den Ständer einer Exzenterpresse, denen lediglich die Verwendung von Blechausschnitten zugrunde liegt.

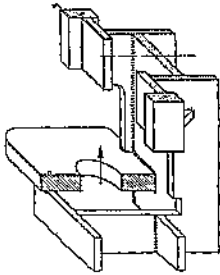


Abb. 269. Konstruktions-einzelheiten einer Exzenterpresse.

e) Fahrzeugbau.

Allgemeines. Im Vergleich zum genieteten Fahrzeug hat das geschweißte den unverkennbaren Vorzug größerer Starrheit und damit erhöhter Sicherheit gegen Stoßbeanspruchung. Die bei Dauerversuchen und gelegentlich von Zusammenstößen gesammelten Erfahrungen sind restlos zugunsten geschweißter Fahrzeuge ausgefallen. Während die genietete Ausführung durch Abscheren der Niete und durch Aufreißen von Nietlöchern zu Bruch geht, hielten die geschweißten Fahrzeuge selbst den stärksten Beanspruchungen stand, und es traten lediglich Verformungen in der Konstruktion ein, ohne daß die geschweißten Verbindungen sichtbare Beschädigungen erlitten.

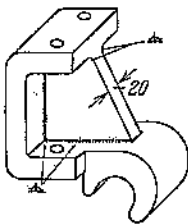


Abb. 270. Geschweißter Federbock.

Neben dieser ausschlaggebenden Tatsache ist der Vorteil der Verminderung des Eigengewichts der Fahrzeuge und dadurch erhöhter Nutzbelastung bei gleichen Betriebskosten der Anstoß gewesen, im Landfahrzeugbau von der Schweißung weitgehenden Gebrauch zu machen. Im Flugzeugbau hat die Lichtbogenschweißung im großen Umfange noch nicht Fuß zu fassen vermocht, da es sich dort meist um die Herstellung dünnwandiger Bauteile handelt, für die die Gas-, Arcatom- und die elektrische Widerstandsschweißung in Frage kommen.

Schienenlose Fahrzeuge. Das Anwendungsgebiet der Elektroschweißung im Straßenfahrzeugbau umfaßt alle Gefährte, gleichgültig, ob sie von Hand, durch Tiere oder motorisch betrieben werden. So werden Schub- und Sackkarren, Fahrgestelle für Maschinen und

Geräte, landwirtschaftliche Wagen, Leiter-, Tafel- und Tankwagen, Feuerwehrleitern, Personen- und Lastkraftwagen, Anhänger u. a. in geschweißter Ausführung hergestellt.

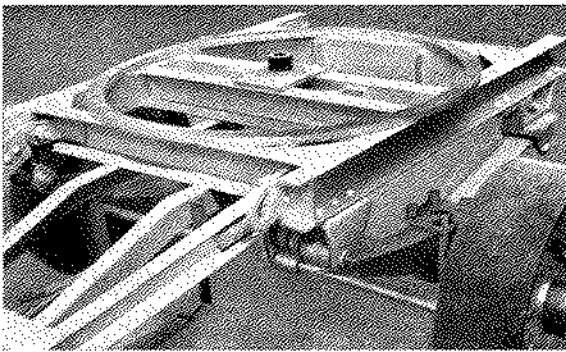


Abb. 271. Drehgestell eines Lastwagenanhängers.

An diesen Fahrzeugen werden, was die Einzelteile anbelangt, Federböcke, Bremswellen, Gestänge, Hinterachsbrücken, Kardanrohre, Achsrohre, Hebel aller Art, Scheinwerfer- und Bremszubehörteile, Bügel, Stützen, Kofferträger, Auspufftöpfe

und -leitungen, Räder u. a. geschweißt. Manche dieser Einzelteile werden allerdings — wie dies auch für Karosserieaufbauten zutrifft — unter Zuhilfenahme der Widerstandsschweißung hergestellt. Bedeutender ist die Anwendung der Lichtbogenschweißung bei der Herstellung von Fahrgestellen in Rohr-, Formstahl- oder Blechkonstruktion.

Als Beispiel eines geschweißten Einzelteiles ist der Federbock der Abb. 270 herausgegriffen. Im Gesenk gepreßte oder geschmiedete Körper dieser Form werden durch einen mit Kehlnaht angeschweißten Steg verstärkt und erhalten dadurch eine fast unbegrenzte Lebensdauer. Sind höherem Verschleiß unterworfenen Einzelteile vorhanden, so werden häufig auch Schweißung und Nietung vereinigt, wie dies beispielsweise bei dem Drehgestell eines Lastwagenanhängers, Abb. 271, zutrifft. Das Drehgestell selbst ist geschweißt, und die Beschlagteile sind angenietet, um sie erforderlichenfalls leicht auswechseln zu können.

Auch im Bau motorisch betriebener Feuerwehrlatern hat die Lichtbogenschweißung grundlegende Veränderungen gebracht. Die bisherigen Holzleitern wurden durch geschweißte Stahlleitern ersetzt, die neben geringem Gewicht bei gleicher Festigkeit den Vorzug größerer Widerstandsfähigkeit gegen Witterungseinflüsse, der Unverbrennlichkeit und der Erreichung größter Steighöhen besitzen. Die Rückansicht einer auf rund 40 m Steighöhe ausziehbaren, geschweißten Feuerwehirstahlleiter zeigt Abb. 272. Holme und Sprossen sind aus Blechhohlprofilen hergestellt, wie dies aus Abb. 273 ersichtlich ist. Die Holme bestehen aus zwei gepreßten Blechen, die π -förmig ausgebildet und mit einem dazwischenliegenden Stehblech gemeinsam verschweißt werden. Das Gewicht von Stehblech und Holm ist durch wechselweise Aussparungen um ein weiteres herabgemindert.

Die Sprossen werden als nahtlose Vierkantstahlrohre durch die Holmwandungen und den Steg hindurchgesteckt und beiderseitig verschweißt. Die Blechdicke der Holmensprossen beträgt 1...2 mm je nach Bauhöhe der Leiter. Für kleinere Leitern tritt an die Stelle der Vierkantstahlrohre für die Sprossen normales, also rundes Stahlrohr.

Schienenfahrzeuge. Auch bei an Schienen gebundenen Fahrzeugen kleinster und größter Bemessung und für die verschiedensten Beförderungszwecke dient die Schweißung als überlegener Ersatz für die Nietung, der gegenüber sie insbesondere den Vorzug glatter, geringste Anfrassungsmöglichkeiten bietender Flächen besitzt. Zudem ermöglichen die glatten Innenwände bei Greifern, Kippen, Selbstentladern usw. eine restlose Entladung des Beförderungsgutes. Erhöhte Bedeutung kommt hierbei auch der größeren Haltbarkeit zu, wenn es sich um schonungslos behandelte Kleinfahrzeuge, wie Muldenkipper, Grubenförderwagen, Seilbahnförderkübel usw. handelt.

Als Großfahrzeuge kommen die der Straßen- und Eisenbahn in Betracht.

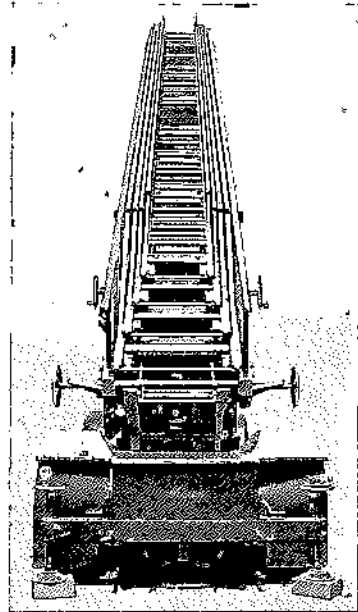


Abb. 272. Geschweißte Feuerwehirstahlleiter.

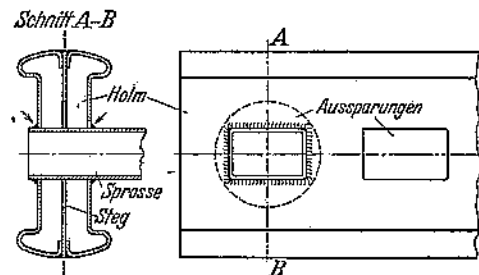


Abb. 273. Einzelheiten zur geschweißten Feuerwehirstahlleiter.

In richtiger Erkenntnis der Bedeutung der Schweißung im Fahrzeugbau hat die Reichsbahn als größtes technisches Unternehmen die Entwicklung der Lichtbogenschweißung außerordentlich gefördert und macht auch in ihren eigenen Betrieben von diesem Verfahren weitgehenden Gebrauch.

Während beim Bau von Straßenbahn-Motor- und -Anhängewagen z. Z. meist nur die Dreh- und Fahrgestellrahmen geschweißt werden, ist man bei Eisen-

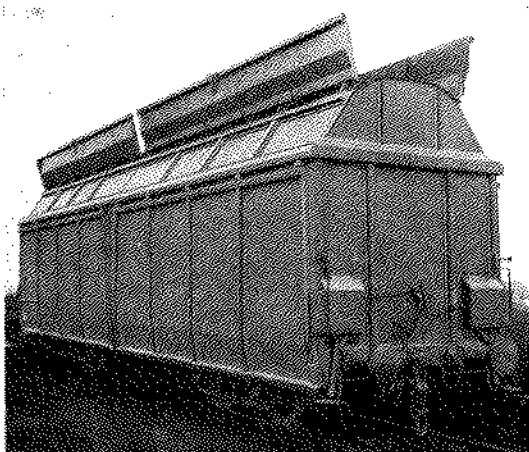


Abb. 274. Völlig geschweißter Großraum-Sattelwagen.

bahnfahrzeugen schon viel weitergegangen, indem man auch den Aufbau der Wagen, gleichviel, ob es sich um Personen- oder Güterwagen handelt, in völlig geschweißter Ausführung herstellt. Den Gesamtaufbau eines vollkommen geschweißten Großraumsattelwagens von 27,6 t Gewicht und mit 100 m³ Inhalt bringt Abb. 274. Neben gewöhnlichen Kohlenstoffstählen werden in den letzten Jahren auch Sonderstähle, z. B. Si-Baustähle, im Wagenbau verwendet.

Daß man zunächst gegenüber der Schweißung von Lokomotiven Zurückhaltung übte, ist verständlich. Aber nun, da sich

Probeausführungen bestens bewährt haben, hat die Schweißung auch in der Fertigung von Rahmen und Drehgestellen elektrischer Schnellzugslokomotiven Eingang

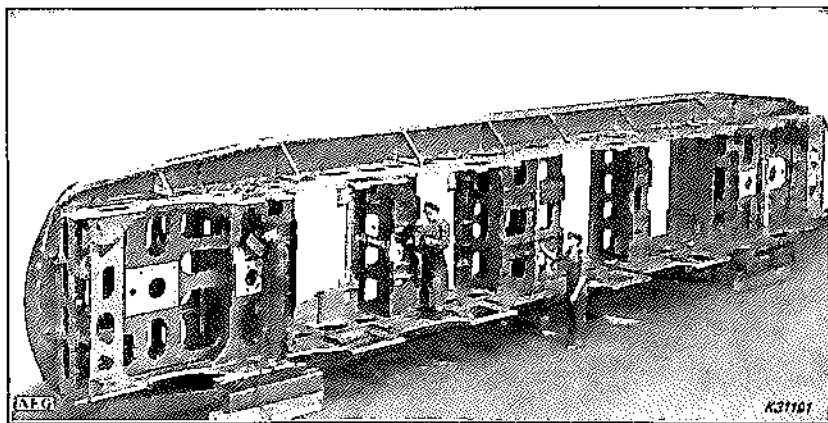


Abb. 275. Geschweißter Lokomotivrahmen.

gefunden. Den Zusammenbau des Rahmens einer 1 Do 1-Lokomotive E 18 durch Schweißung zeigt Abb. 275.

Schienenenschweißung¹. Unumstritten ist die Anwendung der Lichtbogenschweißung für Ausbesserungsarbeiten an Straßenbahnschienen, die fast ausschließ-

¹ Siehe auch Horn und Tewes: Elektrische Auftragsschweißung im Straßenbahnbetriebe: Elektroschweißung 1932 S. 113---115.

lich im Auftragen abgenutzter Stellen bestehen, während sich um die beste und billigste Schienenstoßschweißung alle Schweißverfahren bemühen, unter denen die Thermiterschweißung noch führt. Das gilt vor allem für die in die Straßendecke verlegten Rillenschienen, weniger für Eisenbahnschienen, die auf freiliegendem Oberbau beweglicher Stöße nicht entbehren können. Sie werden höchstens auf Brücken oder in Tunnels durch Stumpfschweißung zu längeren Strängen verbunden, wobei die Lichtbogenschweißung versuchsweise mit herangezogen wurde. Öfters findet diese Anwendung bei der Herstellung von Kreuzstücken, Herzstücken, Gabelungen und Weichen von Straßenbahngleisen, wo sie nicht als Stumpf-, sondern als Laschenverbindung auftritt.

Herzstücke und Kreuzungsanlagen im zeitgemäßen Straßenbahngleisbau haben nicht die in Abb. 276 mit *b* bezeichneten Rillentiefe von etwa 40 mm, wie es auf geraden Strecken bei normalem Profil meist der Fall ist, sondern die Rille wird so flach gehalten, daß das Maß *a* etwa 7...10 mm beträgt. Hierdurch wird beim Befahren der Radkranz des Straßenbahnwagens, also die eigentliche Fläche des Rades vom Fahrkopf abgehoben, und es läuft nur der Spurkranz auf dem Rillenboden. Damit wird die Flachrille innerhalb der Kreuzungen der Träger der gesamten rollenden Last und ermöglicht ein stoßfreies Überfahren der Fahrflächenunterbrechungen an den Schnittpunkten. Infolge des verhältnismäßig hohen spezifischen Flächen-drucks tritt sehr bald eine in ihrer Größe von verschiedenen Bedingungen abhängige Abnutzung der Rille auf. Diese wird durch Lichtbogenschweißung so weit wieder aufgefüllt, bis die vorgeschriebene Tiefe von etwa 7 mm in geraden Strängen bzw. 10 mm in Abzweigungen erreicht ist. Auch Fahrkopfschienenenden werden nach Überschreiten ihrer bestimmten Abnutzungsgrenze durch Auftragschweißung ausgebessert. Welche Bedeutung der Schienenauftragsschweißung zukommt, geht daraus hervor, daß eine große deutsche Straßenbahngesellschaft in 4 Jahren rund 30 km Auftragsschweißung allein an Rillenböden vorgenommen hat.

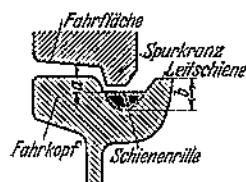


Abb. 276. Rillenschiene mit Spurkranzaufbau.

Bei der Durchführung der Auftragsschweißung ist vor allem darauf zu achten, daß die Stromstärken für die immer hochlegierten Elektroden nicht zu groß gewählt werden und eine richtige Arbeitsfolge sowie nicht zu rasches Schweißen eine den hohen Anforderungen gewachsene Fahrfläche gewährleisten. Zu rasches Arbeiten und hohe Stromstärke können Rißbildungen in der Schweißung oder am Übergang zur Folge haben; ferner wird dabei meist eine größere Porosität in der Schweißung unvermeidlich sein (s. Abb. 277). Während für das Rillenbodenauftragen harte Schweißungen erwünscht sind, werden für die Fahrköpfe und Leitschienen Elektroden verwendet, die weniger eine harte als eine verschleißfeste Schweißung ergeben, um Ausbrechungen im Schienenstrang und vorzeitige Abnutzung des Radwerkstoffes zu vermeiden.



a = richtige Stromstärke

b = zu hohe Stromstärke

Abb. 277. Geschweißte Rillenprofile an Straßenbahnschienen, un bearbeitet.

f) Schiffbau.

Ausbesserungsarbeiten. Im Schiffbau hat die Schweißung verhältnismäßig frühzeitig Eingang gefunden, zunächst vor allem bei Ausbesserungsarbeiten an maschinentechnischen Teilen. Es wurden Winden, Spills, Maschinenrahmen und -gehäuse, Rohrleitungen, Entlüfter, die Kesselanlagen, Behälter für Öl und Trinkwasser, ausgelaufene Wellen, Pleuelstangen, Propeller u. a. unter Zuhilfenahme der Schweißung instand gesetzt, Gegenstände, die in den entsprechenden Unterabschnitten dieses Buches erwähnt wurden.

Gelegentlich von Seeschäden oder beim Auflaufen auf Grund griff man später auch für schiffsbautechnische Teile zur Schweißung und besserte z. B. Steven und Ruder oder den Schiffskörper selbst aus durch das Schweißen gerissener oder gebrochener Bodenversteifungen, Kielbleche, Spanten, Auf- und Einbauten usw. Binnen- und Seeschiffbau, Handels- und Kriegsschiffbau nutzen die Vorteile des billigsten und raschesten Ausbesserungsverfahrens, nämlich der Schweißung, im großen Umfang aus.

Ein nicht mehr fortzudenkendes, ideales Hilfsmittel ist das Schweißen bei Schiffsumbauten, z. B. bei Verlängerungen an Schiffsrümpfen, worüber auch dem der Schweißtechnik Fernstehenden durch Wochenschaufilme öfter und in anschaulicher Weise Eindrücke vermittelt werden.

Geschweißte Einzelteile (Neubau). Daß auf Grund der guten Erfahrungen, die man im Schiffbau mit der Ausbesserungsschweißung und den z. T. bereits geschweißten Konstruktionen bei Seeschäden machte, sehr bald auch die Schweißung neuer Konstruktionsteile in Frage kam, versteht sich von selbst. So wurde die Schweißung in ständig steigendem Maße im Bau von Steven, Gegenpropellern, Rudern, Pollern, Maschinen- und Windenfundamenten, Schiebebalken, Masten, Bootsdavits, Deckstützen, Oberlichten und sonstigen Innen- und Deckaufbauten angewandt. Dabei sind Gewichtersparnisse im ganzen gesehen bis zu 20 vH, im einzelnen bis zu 50 vH zu verzeichnen, Werte, die, abgesehen vom Flugzeugbau, für kein Fahrzeug von so einschneidender Bedeutung sind als gerade für das Schiff.

Da die Ablösung des Nietens durch Schweißen nur allmählich erfolgen konnte, traf man zunächst hauptsächlich im Schiffbau beide Verbindungsverfahren noch häufig nebeneinander an. Diese Mischverbindung wurde inzwischen, besonders im Kriegsschiffbau, fast gänzlich verlassen.

Der in Abb. 278 im Längs- und Querschnitt skizzierte Doppelpoller ist aus 9 Einzelstahlteilen zusammengeschweißt. An die beiden Stützen der gepreßten

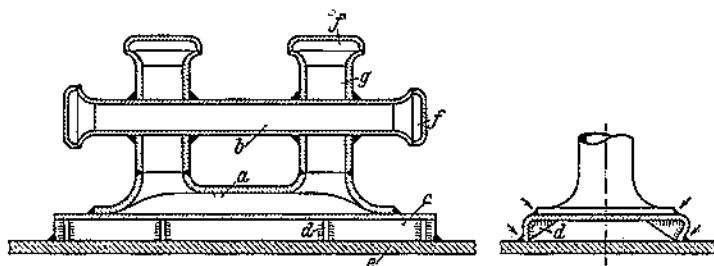


Abb. 278. Geschweißter Stahldoppelpoller.

Platte *a* werden zwei nach oben aufgeweitete Stahlrohre *g* angesetzt und mit der Platte verschweißt. Das Rohr *b* wird in entsprechende Löcher der Rohre *g* eingesteckt und ebenfalls beiderseitig durch Kehlnähte verbunden. Die vier an-

geschweißten Kappen / vervollständigen den Poller, dessen Fuß *a* durch Kehlschweißung ringsum mit dem seitlich offenen, U-förmigen Sockel *c* verbunden wird. Auch dieser durch Winkel *d* verstärkte Sockel *c* wird entlang den Längsseiten an das Deck *e* unmittelbar angeschweißt.

Einen in allen seinen Teilen geschweißten, demnach gänzlich nietlosen Mast mit Ladebaumstuhl und Radbolzen für einen 40 t-Ladebaum bringt Abb. 279. Die Gefälligkeit seiner Form und die Einfachheit der Versteifungen sind hervortretende Merkmale der Schweißkonstruktion, die auch in Abb. 280 zum Ausdruck kommen, wo es sich um eine Deckstütze für etwa 35 t Bruchlast handelt. Sie besteht aus einem Stahlrohr *a* mit angeschweißter Kopfkonstruktion *b* und Fußkonstruktion *c*, beide ohne die Verwendung von Formstahl aus Blechen hergestellt. Die Blechstege des Kopfes *b* sind unmittelbar an das Deckblech *d* angeschweißt, wodurch eine weitere Gewichtsverminderung erreicht wird.

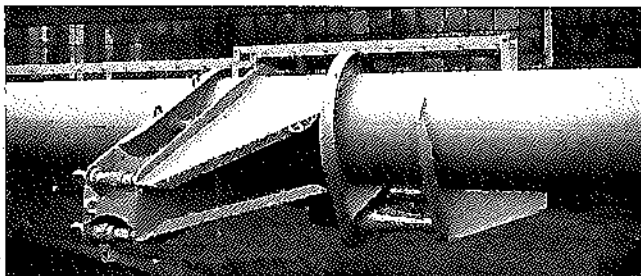


Abb. 279. Geschweißter Schiffsstahlmast.

Geschweißte Binnenschiffe. Neben Motorbooten, Schleppern und Pontons stehen auch Fracht- und Personendampfer in geschweißter Ausführung seit Jahren im Verkehr und haben sich bestens bewährt. Selbst die Außenhaut vieler dieser Schiffe ist geschweißt. Bevor man sich allerdings hierzu entschloß, erstreckte sich die Anwendung der Schweißung auf den Bau von Bodenwrangen, Spanten, Deckbalken, Längs- und Querschotten usw. Besonders letzteren kommt noch jetzt erhöhte Bedeutung zu, da durch ihre geschweißte Versteifungskonstruktion — auch im Seeschiffbau — außerordentliche Gewichtsersparnisse erzielt werden.

Einige Beispiele der hauptsächlichsten Schottenwandversteifungen sind in Abb. 281 skizziert, die eine Verwandtschaft mit Abb. 217 erkennen läßt. Die Verstärkung besteht bei *a*, *b* und *c* aus Blechstreifen oder Flacheisen, die unmittelbar an die Schottenwand hochkantig angeschweißt sind. Da es sich hierbei nur um Festigkeits- und nicht um Dichtigkeitsverbindungen handelt, werden die Kehlnähte unterbrochen ausgeführt, und zwar entweder wechselweise (Zick-Zack-Schweißung) mit kleiner oder großer Zwischenteilung (*t* und *t*₁), im Sinne von *a* und *b*, oder als Parallelnähte, wie bei *c* angedeutet. Letztere werden beispielsweise dann bevorzugt, wenn in dieser Weise versteifte Blechwände auf Biegung beansprucht werden. Erforderlichenfalls kann das Flacheisen durch einen an einem Schenkel an die

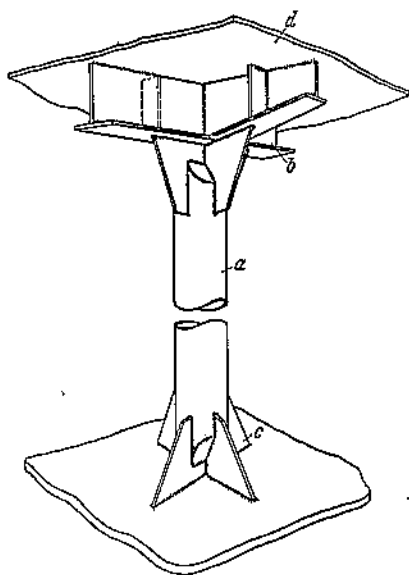


Abb. 280. Deckstütze mit geschweißter Kopf- und Fußkonstruktion.

Einige Beispiele der hauptsächlichsten Schottenwandversteifungen sind in Abb. 281 skizziert, die eine Verwandtschaft mit Abb. 217 erkennen läßt. Die Verstärkung besteht bei *a*, *b* und *c* aus Blechstreifen oder Flacheisen, die unmittelbar an die Schottenwand hochkantig angeschweißt sind. Da es sich hierbei nur um Festigkeits- und nicht um Dichtigkeitsverbindungen handelt, werden die Kehlnähte unterbrochen ausgeführt, und zwar entweder wechselweise (Zick-Zack-Schweißung) mit kleiner oder großer Zwischenteilung (*t* und *t*₁), im Sinne von *a* und *b*, oder als Parallelnähte, wie bei *c* angedeutet. Letztere werden beispielsweise dann bevorzugt, wenn in dieser Weise versteifte Blechwände auf Biegung beansprucht werden. Erforderlichenfalls kann das Flacheisen durch einen an einem Schenkel an die

Schottwand stumpf angeschweißten Winkel d ersetzt werden. Außer diesen kommen die Konstruktionsarten e und f weniger für Binnenschiffe als für die meist viel größeren Seeschiffe in Frage. Von den vorigen Formen weichen sie durch an den Steg angeschweißte Blechflanschen ab, die meist fischbauchartig zugeschnitten sind.

Die sich daraus ergebende Querschnittsform, die der jeweiligen örtlichen Beanspruchung der Konstruktion angepaßt ist, kann in Walzprofilen nicht hergestellt werden.

Den Übergang vom genieteten zum geschweißten Schiff und die Anwendung gemischter Verbindungen führt Abb. 282, das Kollisionsschott eines Motorschiffes, vor Augen. Spanten, Außenhaut, Bodenkonstruktion und Deckrahmen sind hier noch genietet, die Schottwand selbst ist bei a und b aus drei Blechschüssen zusammengeschweißt (Stumpfnähte) und bei c ringsum durch Kehlnaht mit dem Schifferumpf verbunden. Diese vollen, nicht unterbrochenen Schweißnähte c sind sog. Dichtigkeitsnähte und doppelseitig ausgeführt. Die auf der Schottwand mit Kreide vermerkten römischen Zahlen

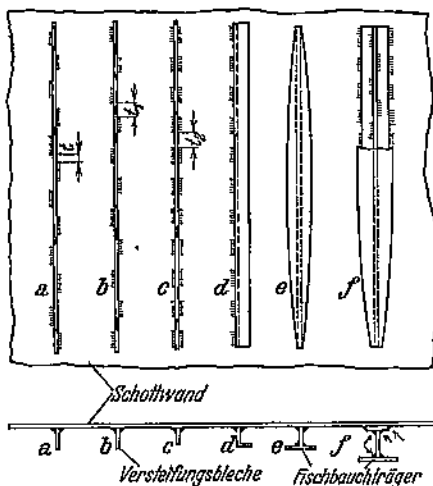


Abb. 281. An Schottwände angeschweißte Versteifungsbleche und -träger.

sind Anweisungen für den Schweißer, in welcher Reihenfolge und mit welchen Teilungen (t und t_1 , Abb. 281) die unterbrochenen Nahtstrecken an den sechs Versteifungsblechen d anzubringen sind. Auch die im Bilde gut erkennbaren Quer-

versteifungen e sind durch unterbrochene Kehlnähte mit dem Schott verbunden.

Ähnliche Gewichtserparnisse und dauerhafte Dichtigkeit sind mit geschweißten Decknähten zu erzielen, da die für die Nietung erforderlichen Innenlaschen fortfallen. Dabei werden die Blechschüsse durch Schrauben an den Deckbalken festgehalten und erst nach Fertigstellung der Nähte im Querverbande mit diesen vernietet.



Abb. 282. Geschweißtes Kollisionsschott eines Motorschiffes.

Unter anderen Wasserfahrzeugen werden auch Motortankboote meist ganz geschweißt. Einen Teil eines solchen zeigt Abb. 283. Sie gibt ein Beispiel dafür, wie Abschnitte eines Schiffes in der Werftwerkstätte auf geeigneten Spannrosten bequem hergestellt und dann auf der Helling zusammengebaut werden können. Das Tankboot hat eine Länge von 40 m, bei 6,5 m Breite und 2,2 m Höhe. Die Lade-

fähigkeit beträgt 250 t und das Gewicht der in der Werkstätte geschweißten Einzelteile etwa 10 t.

Nennenswerte Konstruktions- und Bauerleichterung bietet die Schweißung außerdem bei verwickelten Durchdringungen und Anschlüssen, z. B. bei Schrauben- und Wellentunnels, Wellenböcken, Stevenrohren, bei Kielwannen und Schwertkasten für Segeljachten, wo mitunter der Zusammenbau durch Schweißung kieloben erfolgt.

Nach einem patentierten Verfahren werden die Seitenwände und der Boden von Schuten zusammenhängend in einer Ebene und an diese die Versteifungen fertig angeschweißt. Darauf biegt man die Seitenwände kalt hoch und fügt Heck und

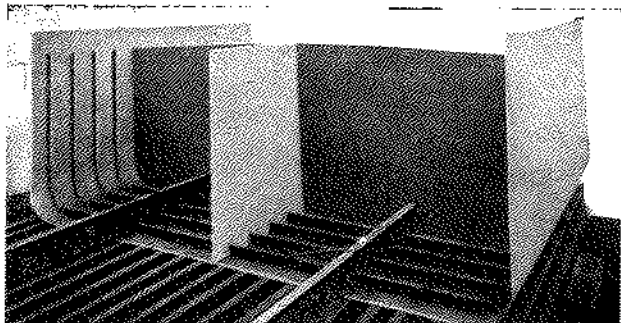


Abb. 283. Teil eines ganz geschweißten Motortankboots.

Bug durch Schweißung mit dem Schiffskörper zusammen. Auf diese Weise ergeben sich fast nur waagerechte Nähte und ein schneller Zusammenbau des Schiffes.

Geschweißte Seeschiffe. Zahlreiche der angeführten Beispiele lassen sich mit mehr oder weniger Abweichungen auch auf den Bau von Seeschiffen übertragen, die in ihrer Vielgestaltigkeit als Handels- und Kriegsfahrzeuge der Schweißung unerschöpfliche Anwendungsmöglichkeiten bieten, soweit nicht einschränkende Bestimmungen der Versicherungsgesellschaften im Handelsschiffbau nur das Schweißen bestimmter Einzelteile gestatten. Die Vorschriften des Germanischen Lloyd haben im Hinblick auf die bahnbrechenden Erfolge mit geschweißten Marinefahrzeugen erfreulicherweise Erleichterungen gebracht, die eine umfangreichere Einführung der Schweißung im Handelsschiffbau erwarten lassen.

Das erste ganz geschweißte Schiff, das den obigen Vorschriften entspricht, war ein Motorölfahrzeug von 45 m Länge. Die Gewichtersparnis betrug rund 30 vH. Angesichts der bei solchen Fahrzeugen neben allen anderen bestehenden Forderungen notwendigen zuverlässigen Öldichtheit sind die Vorteile der Schweißung gegenüber der Nietung besonders auffällig.

Zur Erleichterung der Schweißung und des Zusammenbaus werden die Schotten, gleich welcher Größe, ob für Fracht-, Fahrgast- oder Kriegsschiffe, auf Richtplatten hergestellt und als fertiger Teil in die Schiffsrümpfe eingebaut und eingeschweißt. Das Aufspannen von Schottwänden mit Spannbügeln auf Richtplatten und das Anschweißen von Versteifungen veranschaulicht Abb. 284. In den dicken Richtplatten sind Löcher angebracht, die die Spannbügel aufnehmen. Diese drücken die hier bereits zu verjüngten T-Profilen zusammengeschweißten Versteifungsträger gegen die durch Stumpfnähte verbundenen Schottenwandchüsse und sichern ihre Lage bis zur Vollendung der Zick-Zack-Kehlnähte.

Den Hauptsant eines geschweißten Ölfahrzeugs zeigt Abb. 285. Bodenwangen, Spanten, Schotten, Deck, Deckbalken und die Außenhaut sind geschweißt und die Nähte durch die genormten Zeichen angedeutet. Schotten und Spanten sind mit der Außenhaut durch doppelseitige Kehlnähte vereinigt. Nur die Verbindungen des Mittellängsschotts mit dem Kiel (unten Mitte) und die am Stringerwinkel (Längsspannen, oben rechts) sind genietet.

Die unter sich verschweißten Plattengänge einer geschweißten Außenhaut laufen nicht längs- (waagrecht), sondern querschiffs (senkrecht) vom Kiel bis zum



Abb. 254. Schweißen eines Schotts auf der Spannplatte.

Deckstringerwinkel und sind schußweise jedesmal auf einen Spant oder ein Schott gestoßen, so daß die Außenhaut-V-Nähte mit den Kehlnähten der Spanten und Schotten eine versteifte T-Verbindung darstellen. Die durch den Fortfall der Überlappungen, Winkelleisenversteifungen und Nieten erzielte Gewichtsverminderung ist hierbei recht erheblich und die Gefahr eines Leckwerdens

gänzlich vermieden. Außerdem haben längere Zeit in See gestandene Schiffe die Annahme, daß die Schweißnähte korrosionsbeständig seien, vollauf bestätigt. Die Deckbeplattung größerer Schiffe ist meist mit genieteten Längsnähten versehen, und nur die Quernähte werden geschweißt. Dabei werden zur Verhütung zu großer Spannungen die Plattenstöße erst nach dem Schweißen genietet. Allerdings sind in vereinzelten anderen Fällen auch größere Flächen der Beplattung ganz geschweißt worden.

Infolge der erdrückenden Bedingungen des Versailler Diktats, die Deutschland nur den Bau von Schlachtschiffen bis 10000 t und von Kreuzern bis 6000 t Wasserverdrängung gestatteten, wurde mit Ende des ersten Weltkrieges die Schweißung im Kriegsschiffbau zu einem besonders wertvollen Verfahren, da sie allein eine ausschlaggebende Gewichtsverminderung und damit eine Erhöhung der Bestückung bei gleicher Tonnage und Bauabmessung ermöglichte. Darüber hinaus hat die Schweißung Bauweisen geschaffen, die genietet nie durchführbar waren. Aus naheliegenden Gründen kann an dieser Stelle auf besondere und wertvolle Einzelheiten im Kriegsschiffbau nicht näher eingegangen werden, doch mögen einige Hinweise den Weg, den man beschritt, aufzeichnen. Als hervorstechendes Beispiel mag der Bau von Torpedobooten nach dem reinen Längsspantensystem angeführt sein, der seit Jahren erfolglos angestrebt und nur nach weitgehender Anwendung der

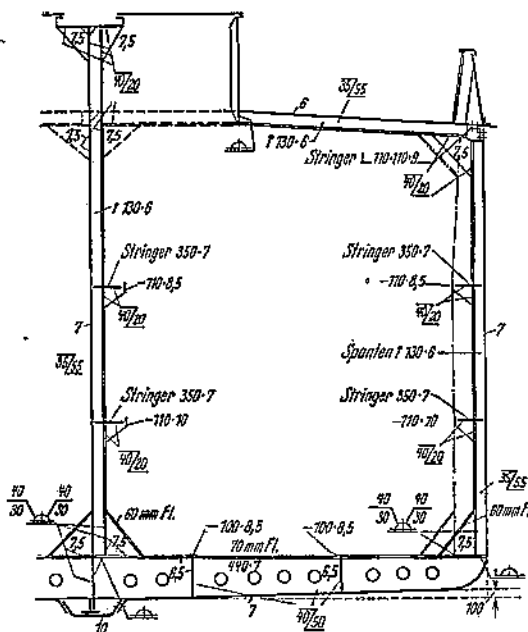


Abb. 256. Geschweißter Hauptspant eines Ölfahrzeugs.

weisen geschaffen, die genietet nie durchführbar waren. Aus naheliegenden Gründen kann an dieser Stelle auf besondere und wertvolle Einzelheiten im Kriegsschiffbau nicht näher eingegangen werden, doch mögen einige Hinweise den Weg, den man beschritt, aufzeichnen. Als hervorstechendes Beispiel mag der Bau von Torpedobooten nach dem reinen Längsspantensystem angeführt sein, der seit Jahren erfolglos angestrebt und nur nach weitgehender Anwendung der

Schweißung Wirklichkeit wurde. Die hervorragende Bedeutung der Schweißung im Kriegsschiffbau kam dann auch schnell zur praktischen Auswirkung, und nach gut verlaufenen Versuchen mit einem geschweißten Boot wurden die Ergebnisse auf den Bau weiterer Torpedoboote, auf Kreuzer, Schlachtschiffe und U-Boote übertragen.

Als Beispiel für viele andere sollen die Abb. 286 und 287 gelten¹. Wichtige Konstruktionseinzelheiten, und zwar die Bodenwange und der Spant eines geschweißten Torpedoboots, sind in Abb. 286 dargestellt. Die gesamte Konstruktion ist in allen ihren Teilen geschweißt. Zum besseren Verständnis sind die durch die Schottenwände durchgesteckten und mit diesen ringsum verschweißten Längsbänder in Skizze A herausgezeichnet. Bei *a* sind die Kehlnähte an den Schotten, bei *b* die abschnittweisen Schweißnähte an der Außenhaut angeordnet. Die Kon-

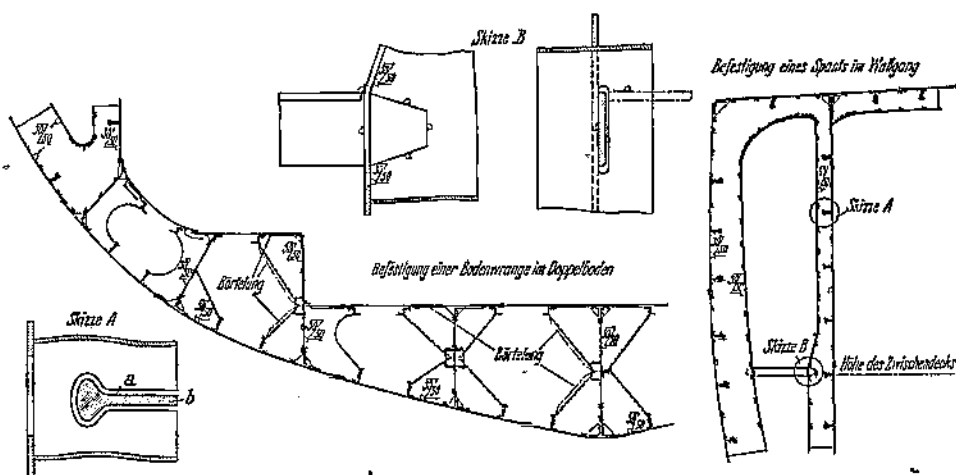


Abb. 286. Bodenwange und Spant eines Torpedoboots, geschweißt.

struktion entspricht der vorhin geschilderten Längsspanntenbauweise. Das Schott eines Panzerkreuzers zeigt Abb. 287. Es ist im Sinne der Abb. 281e und f (siehe auch Schnitte A...A und B...B) durch Fischbauchträger versteift. Bei dünneren Schottenblechen wird außerdem die Versteifung des Bördelstoßes D...D ausgenutzt.

Die zur Aufnahme der Beplattung dienenden Decksbalkenfelder von Kriegsschiffen werden aus Längs- und Querbalken hergestellt, die aus Blech- τ -Trägern mit unterbrochenen Kehlnähten bestehen. Die Deckbeplankung wird über Kopf durch Heftschweißung befestigt.

Je nach Abmessungen und Art der Kriegsfahrzeuge ergibt die Schweißung eine mehr oder weniger größere Gewichtsersparnis, die z. B. bei Panzerkreuzern den ansehnlichen Betrag von 18...25 vH ausmacht. Wie weit die Ersparnis bei Kriegsschiffeinzelteilen gehen kann, geht aus einem Bericht über den Bau des Kreuzers „New Orleans“ (USA.) hervor, der 180 m lang und 19 m breit ist und einen Tiefgang von 6,9 m hat. Der Steven dieses fast ganz geschweißten Schiffes ergab in geschweißter Ausführung (gegenüber Stahlguß) eine Gewichtsersparnis

¹ Siehe auch Lottmann: Schiffbau. Band 5 der ausgewählten Schweißkonstruktionen VDI-Verlag 1933, dem diese Bilder entnommen sind.

von 62,3 vH und eine Kostenverminderung um 46 vH. Um sich über die Bedeutung der Schweißung im Kriegsschiffbau eine richtige Vorstellung machen zu können,

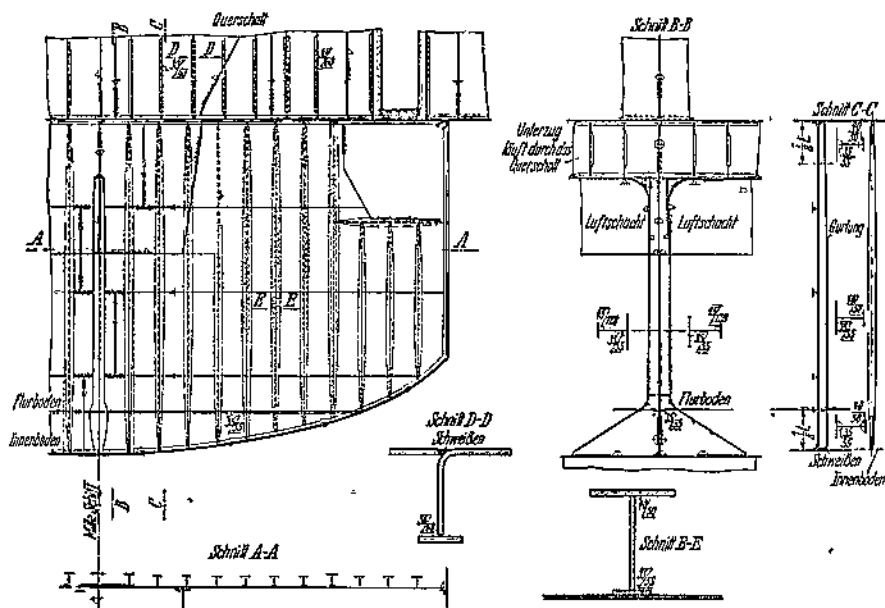


Abb. 287. Geschweißtes Querschott eines Schlachtschiffs.

sei nur erwähnt, daß Schweißnahtlängen von 600...800 km an einzelnen Schiffen durchaus keine Seltenheit sind.

g) Stahl-, Stahloch- und Brückenbau.

Allgemeines über Stahlbauschweißung. Ebenso wie im Maschinen- und Schiffbau hat die Schweißung auch auf den Stahlbau großen Einfluß gewonnen. Nicht nur die konstruktive Durchbildung der Bauteile als solcher, sondern auch die praktische Ausführung der Bauwerke ist grundlegend gewandelt worden. Sowohl in der Werkstatt als auch auf der Baustelle mußten neue Wege beschritten werden, um die Vorteile des Schweißens zur Auswirkung kommen zu lassen.

Ausgehend von der Konstruktionsarbeit im Büro erkennt man die Vereinfachung der Berechnung der Verbindungen und ihre klare übersichtliche Darstellung durch Schweißzeichen in den Werkstattzeichnungen. Die Schweißtechnik gibt dem Konstrukteur ein Mittel an die Hand, besser als bisher die äußeren Formen der Bauglieder den in ihnen wirkenden Kräften weitgehend anzupassen. Hierdurch und durch die Anwendung des Schweißens überhaupt ist es möglich, das Eigengewicht des Bauwerkes herabzumindern.

Infolge der Vereinfachung der Bauglieder ist der Zusammenbau in der Werkstatt ebenfalls vereinfacht worden, obwohl mitunter besondere, der Eigenart der Schweißung angepaßte Vorrichtungen und Arbeitsweisen nötig sind. Trotzdem kann beim Zusammenbau und bei gewissen Bauarten auf Schraubenverbindungen nicht verzichtet werden. Durch Vereinigung dieser beiden Verbindungsmittel lassen sich auch schwierige Konstruktionen überbrücken. Für die Frage der Anwendung der Schweißung im Stahlbau sind neben der Gewichtsersparnis selbstverständlich die Gestehungskosten von ausschlaggebender Bedeutung.

Förderanlagen. Die Fachwerkkonstruktionen von Dreh-, Schwenk- und Laufkränen, von Baggern und Verladebrücken und ähnlichen Förderanlagen werden trotz oft stärkster dynamischer Beanspruchung häufig völlig geschweißt.

Die Anwendung der Schweißtechnik im Großbaggerbau veranschaulicht Abb. 288, wobei es sich um den größten, und zwar völlig geschweißten Bagger Europas handelt, von dessen außergewöhnlichen Abmessungen und Leistungen man sich nur an Hand einiger Zahlen eine Vorstellung zu machen vermag. Die 40 Eimer des Doppeltor-Schwenkbaggers nehmen je 1100 l Inhalt auf. Die Gesamtleistung beträgt 1400 m³ je Stunde. Die Gesamtabtragungshöhe beträgt 50 m bei 50° Schnittwinkel. Das Fahrgestell läuft auf zehn vierachsigen Drehgestellen mit 80 Rädern. Die Baulänge des Fahrzeugs beträgt 17 m, die Gesamtbaulänge 75 m.

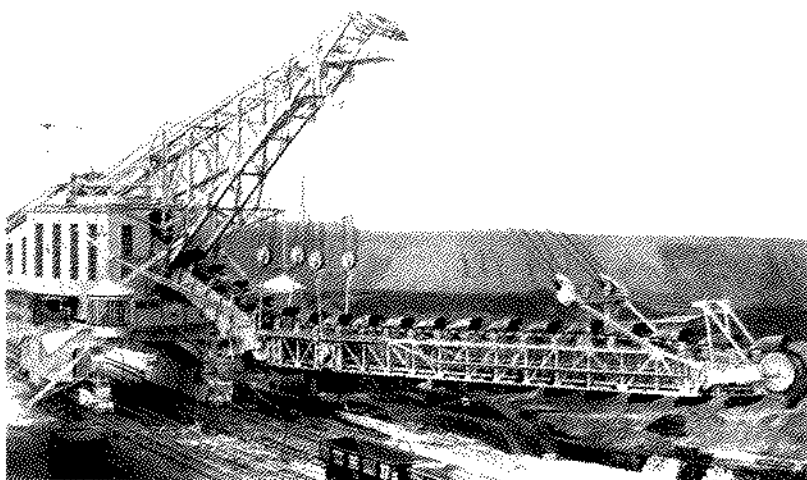


Abb. 288. Geschweißter Doppeltor-Schwenkbagger.

Der zweistielige Rahmen, der den Bagger aufnimmt und nach neuestem Grundsatz ausgebildet ist, das Fachwerk der beiden Ausleger, das Maschinenhaus, der Führerstand, die Baggereimer usw. sind geschweißt.

Fachwerke. Die Anpassung der Konstruktion an die Eigenart der Schweißung kommt am deutlichsten in der Ausbildung der Profile und Anschlüsse zum Ausdruck. Bei genieteten Konstruktionen war der Winkel zum Bilden eines zusammengesetzten Querschnittes unerlässlich. Die geschweißte Verbindung bedarf seiner nicht mehr oder nur als selbständigen Stabquerschnitts. Die erforderlichen Stabquerschnitte werden aus unter sich durch Schweißung verbundenen Walz- und Flachstählen entwickelt. Die häufige Anwendung von Halbprofilen ist eine Eigenart der geschweißten Konstruktionen. In Abb. 289 a...k sind einige schweißgerechte Profile zusammengestellt, wie sie sich aus der Verbindung zwischen Blechen, zwischen Formstahl oder zwischen Blechen und Formstahl ergeben. Die Einfachheit der Profile erübrigt weitere Erläuterungen.

Durch die Anordnung solcher oder ähnlicher Querschnitte, insbesondere von einseitigen T-Profilen, ist häufig die Möglichkeit gegeben, Stabverbindungen ohne Knotenbleche herzustellen, wodurch die statischen Voraussetzungen (gelenkige Knotenpunkte) besser erfüllt und Nebenspannungen durch Knotenbleche ver-

mieden werden können. Aber nicht nur die Stabquerschnitte an sich, sondern auch die Ausbildung von Laschen, Bindeblechen, Pfettenbefestigungen u. a. werden der Schweißung angepaßt. Die in den letzten Jahren ausgeführten geschweißten

Bauwerke lassen hinsichtlich ihrer allgemeinen Durchbildung bereits eine völlige Umstellung auf die Anforderungen der Schweißung erkennen.

Als Beispiel sei der vollständig geschweißte Fachwerkbinder der Abb. 290 gebracht, dessen Stäbe durchweg doppelwandig ausgeführt sind. Der gedrückte Obergurt hat einen Querschnitt aus Flachstahl mit Druckplatte und angeschweißten Bindeblechen. Die übrigen Stäbe bestehen aus Walzstahl, an die die Bindebleche ebenfalls angeschweißt sind. Die spärliche Verwendung von Knotenblechen kann als eine

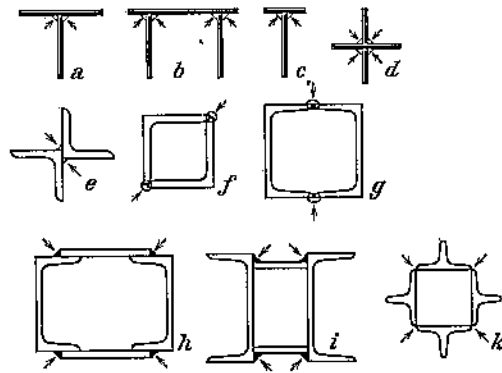


Abb. 289. Durch Schweißung entstandene Konstruktionsprofile.

Folge der geschweißten Konstruktion angesehen werden. Die Abbildung veranschaulicht die Binderkonstruktion während einer Probelastung.

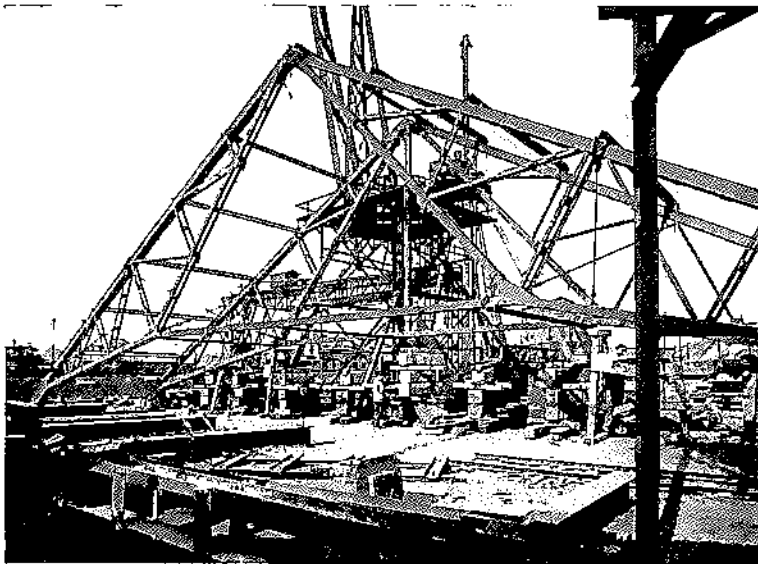


Abb. 290. Schweißkonstruktion eines Fachwerkbinders (Probelastung).

Vollwandkonstruktionen. Eine auffällige Umstellung lassen geschweißte vollwandige Konstruktionen erkennen, die wesentlich vereinfacht worden sind und bei denen die Schweißung mit besonderem Vorteil eingeführt wurde. Verschiedene geschweißte Rahmenecken sind in den Abb. 291...293 dargestellt. Bei der in Abb. 291 veranschaulichten Rahmenecke ist der Oberflansch des Walzstahl-

riegels *a* über den Querschnitt des Stiels *b* hinweggeführt und mit diesem ringsum verschweißt. Die Vorteile des geschweißten Profils kommen besonders in Abb. 292 zum Ausdruck, wo Stiel *a* und Riegel *b* in ihrem Querschnitte dem Kräfteverlauf angepaßt und mit einem abgerundeten Einsatzstück *f* gestoßen sind. Der Stoß der Stäbe wird im vorliegenden Falle durch je zwei Laschen *c* gedeckt und die Gurtlaschen *d* um das Einsatzstück herumgeführt. Eine zusätzliche Versteifung des Einsatzstückes *f* wird durch beiderseits eingeschweißte und radial angeordnete Versteifungsbleche *e* erzielt.

Die Rahmenecke nach Abb. 293 ist insofern bemerkenswert, als ein zwischen die abgeschrägten Profile gestecktes Blech *a* auf der Oberseite um etwa doppelte Blechdicke herausragt, so daß die beiden Flanschen der Träger an dieses durch Kehlnaht angeschlossen werden können.

Das Anbringen der Kehlnähte an den unteren Flanschen wird durch Abschrägung des überstehenden Bleches *a* erleichtert. Der Versteifung der Rahmenecke dient das an die unteren Trägerflanschen angeschweißte Blech *b*. Solche und ähnliche geschweißte Vollwandrahmenkonstruktionen haben sich nicht allein im Industrie-, Wohn- und

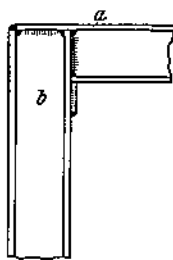


Abb. 291.

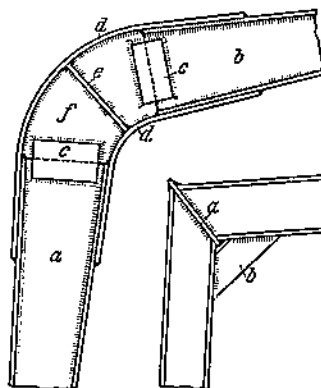


Abb. 292.

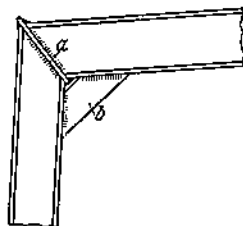


Abb. 293.

Geschweißte Rahmenecken.

Stahlskelettbau. Auch aus dem Gebiete des Stahlskelettbaus können hier nur wenige für die Schweißtechnik sinnfällige Konstruktionseinzelheiten gebracht werden. Die durch die Anwendung der Schweiß-

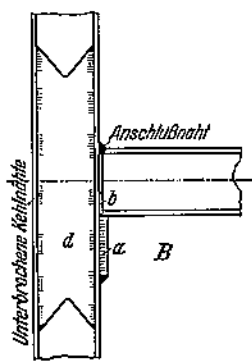
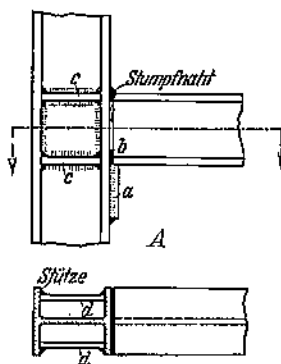


Abb. 294. Anschluß von Deckenträgern an Geschoßbaustützen.

ung z. T. auffällig vereinfachte Anschlußmöglichkeit der Deckenträger an die Geschoßbaustützen kommt in der Abb. 294 zur Geltung. In den meisten Fällen genügt das Aufschweißen einer Knagge aus Stahlblech (*a* in Abb. A und B). Um eine gute waagerechte Auflagerung des Trägers auf der Stütze zu erreichen, werden Druckstücke *b* vorgesehen; der Oberflansch des Trägers wird mit der Stütze durch Stumpfnäht verbunden. Um die Stützen zur Aufnahme der Momente im Knotenpunktsbereich steifer zu machen, werden waagerechte und senkrechte Rippen *c* und *d* in die Stützenprofile eingeschweißt. Eine besonders günstige Form der Stielversteifung zeigt Abb. B bei *d*.

Noch steifere Verbindungen von Deckenträgern und Stützen erhält man durch unmittelbares Verschweißen des Trägers mit dem Stützenflansch. Je nach dem Grade der Einspannung liegen für sehr starre Verbindungen nur geschweißte Ausführungen vor, während für weniger starre Verbindungen Schweißung und Schraubenverbindung gemeinsam angewendet werden. Um die mitunter nicht einfache Baustellenschweißung zu vermeiden, zieht man vielfach in solchen Fällen in den Deckenträgern, Stützen usw. die Schraubenverbindungen vor. Die in den Wänden liegenden Bauglieder, z. B. Wandriegel, werden mit den Stützen durch Kehlschweißungen verbunden.

Eine wesentliche Umstellung ergab die Schweißung in der Auflagerung von eingespannten Pendelstützen. Dem Konstrukteur sind hier die mannigfachsten Baumöglichkeiten gegeben, wobei die geringen Bauhöhen und die damit verbundene

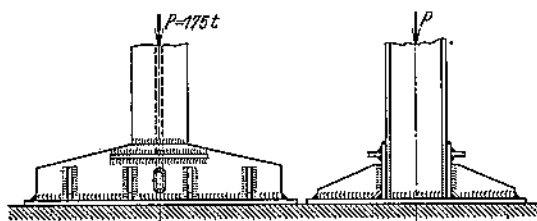


Abb. 205. Geschweißter Stützenfuß.

Gewichtersparnis besonders hervorzuheben sind. Der in Abb. 295 dargestellte Stützenfuß besteht aus einem Peiner Normalprofil, das die Last auf die Fußplatte überträgt. Diese wird auf Biegung und Abscheren beansprucht, weshalb es nötig ist, sie durch Fuß- und Kragbleche zu versteifen. In genieteter Ausführung wiegt der gleiche Stützenfuß von gleicher Festigkeit 730 kg, in geschweißter Ausführung nur 390 kg; außerdem ist die geschweißte Konstruktion in der Bauhöhe um 150 mm niedriger gehalten, was die Vorteile der Schweißung gegenüber der Nietung erhärtet. Es sei noch erwähnt, daß auch die Trägerroste und Verankerungen der Stützenfüße geschweißt werden können¹.

Allgemeines über Brückenbau. Im Hinblick darauf, daß im Brückenbau neben den statischen erhebliche dynamische Beanspruchungen zu berücksichtigen sind, ist es verständlich, daß man zunächst nur mit Zurückhaltung an die Anwendung der Schweißung heranging. Außerdem ergaben sich infolge der damals noch vorgeschriebenen niedrigen Spannungen für Schweißverbindungen Schwierigkeiten, die auftretenden Kräfte durch Schweißnähte folgerichtig aufzunehmen. Aus diesen Gründen wurden anfänglich lediglich Querträger, Längsträger, Schlinger- und Windverbände, Fußwege und Geländer geschweißt, während die Hauptträger und ihre Knotenpunkte in genieteter Ausführung hergestellt wurden. Die günstigen Erfahrungen, die man mit der Schweißung im allgemeinen Stahlbau gemacht hat, die Entwicklung der Schweißung als solcher und des Elektrodenwerkstoffs führten bald zu vollständig geschweißten Brückenkonstruktionen, von denen im In- und Auslande eine größere Anzahl zu verzeichnen ist.

Fachwerkbrücken. Zur Ausnutzung der Vorteile, die durch die Schweißung geboten werden, ist eine ihr angepaßte zweckmäßige Durchbildung der Hauptträgerstäbe bei Fachwerkbrücken von besonderer Bedeutung. Gleich genieteten Konstruktionen werden sowohl einwandige Querschnitte als auch doppelwandige Kastenquerschnitte in Schweißkonstruktion ausgeführt. Die einwandigen Querschnitte sind bei kleineren und mittleren Brücken am Platze, da sie neben einfacher Herstellung auch eine günstige Ausbildung der Knotenpunkte mit den verschiedenen Stabanschlüssen ermöglichen. Für die Stabanschlüsse werden fast durchweg einfache

¹ Eine Sammlung von Konstruktionsbeispielen findet sich in: Der praktische Stahlbau von A. Gregor, Band 4, geschweißte Stahlbauten. Berlin: Verlag R. Kiepert, 1932.

Bleche benutzt, wenn nötig bis zu einer Dicke von 30 mm, so daß ohne weiteres der erforderliche Querschnitt erreichbar ist. Bei kleineren Brücken mit einwandigem Querschnitt ist auch die Verwendung halbiertes π - oder π P-Träger, die zu diesem Zwecke besonders gewalzt werden, angebracht, sofern eine Ausnutzung des vorhandenen Querschnittes gewährleistet ist. Bei nicht so hohen Anschlußkräften und zweckentsprechender Bemessung der Stäbe ist es häufig — wie im Stahlhochbau — möglich, ohne Knotenbleche auszukommen. Sind die erforderlichen Schweißnahtlängen größer als der zur Verfügung stehende Steg des Gurtstabes, so kann auf Knotenbleche nicht verzichtet werden. Ihre Anordnung kann auf verschiedenste Weise erfolgen. Entweder werden die Gurtstäbe an ein Knotenblech — ähnlich wie beim Nieten — angeschlossen, und das Blech wird an den Steg der Gurtstäbe angeschweißt, oder man läßt die Füllstäbe auf den Steg des Ober- bzw. Untergrundes auflaufen, schweißt sie auf diesen, soweit die örtlichen Verhältnisse es gestatten, fest und verlängert den Steg durch ein angeschweißtes Blech, um die noch fehlenden Längen der Anschlußkehlnähte unterzubringen. Den auffälligen Gegensatz zwischen einer genieteten und einer geschweißten Fachwerkkonstruktion zeigt Abb. 296. Die Ein-

The drawing consists of two parts, A and B, illustrating different bridge joint constructions. Part A shows a riveted joint where a central vertical member (labeled I 55) is connected to two diagonal members (labeled I 226) using a horizontal plate (labeled Bl. 30 mm). The joint is secured with numerous rivets. Dimensions include a height of 740 mm, a width of 100 mm, and a plate thickness of 10 mm. Part B shows a welded joint where a central vertical member (labeled I 55) is connected to two diagonal members (labeled I 226) using a horizontal plate (labeled Bl. 30 mm). The joint is secured with welds. Dimensions include a height of 500 mm, a width of 320 mm, and a plate thickness of 10 mm.

Abb. 296. Genieteter und geschweißter Knotenpunkt im Brückenbau.

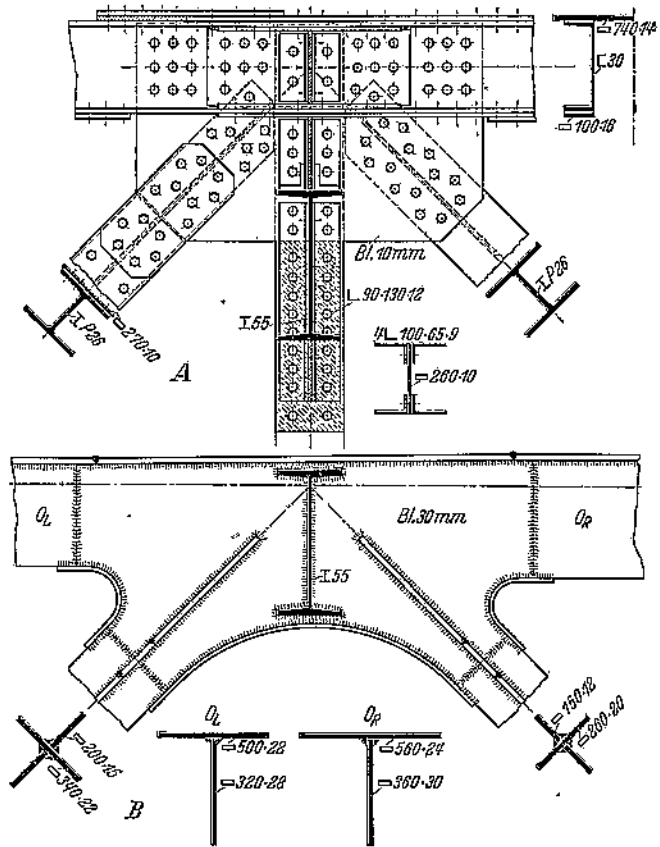


Abb. 296. Genieteteter und geschweißter Knotenpunkt im Brückenbau.

fachheit des geschweißten Knotenpunktes ist unverkennbar. Das Bild zeigt, daß der kastenförmige Querschnitt des Obergurtes in der geschweißten Ausführung durch einen einwandigen T-Querschnitt ersetzt worden ist. Im Gegensatz zur genieteten Ausführung liegt das Knotenblech in der Ebene des Steges des Obergurtes und wird mit diesem durch eine v- bzw. x-Naht verbunden. Ebenso stoßen die Haupttragbleche der Füllstäbe stumpf gegen das Knotenblech. Auch die Kopfplatte des Obergurtes ist mit der Kopfplatte des Knotenbleches stumpf gestoßen. Die eigenartige Form des Knotenbleches ist gewählt worden, um eine möglichst gute Spannungsverteilung im Anschluß zu erzielen. Zur Versteifung und zur Verhütung des Aufreißen der Stumpfnähte sind noch Flacheisen hochkant um den Rand des Knotenbleches herumgelegt.

Wie bereits angedeutet, bietet das Schweißen der Fahrbahn kaum noch Schwierigkeiten. Die meist vollwandigen Querträger werden nach den gleichen Gesichtspunkten hergestellt, die für vollwandige Brücken entscheidend sind, hierauf wird noch eingegangen. Der Anschluß der Längsträger, für die meist Walzprofile verwendet werden, an die Querträger wird ebenfalls durch Kehlnähte an den Stegen und Flanschen hergestellt, wobei der Längsträger zweckmäßig auf einer angeschweißten Auflagerknagge oder auf einem Aufлагewinkel ruht (s. Abb. 297). Auch bei durchlaufenden Längsträgern ergeben sich keine

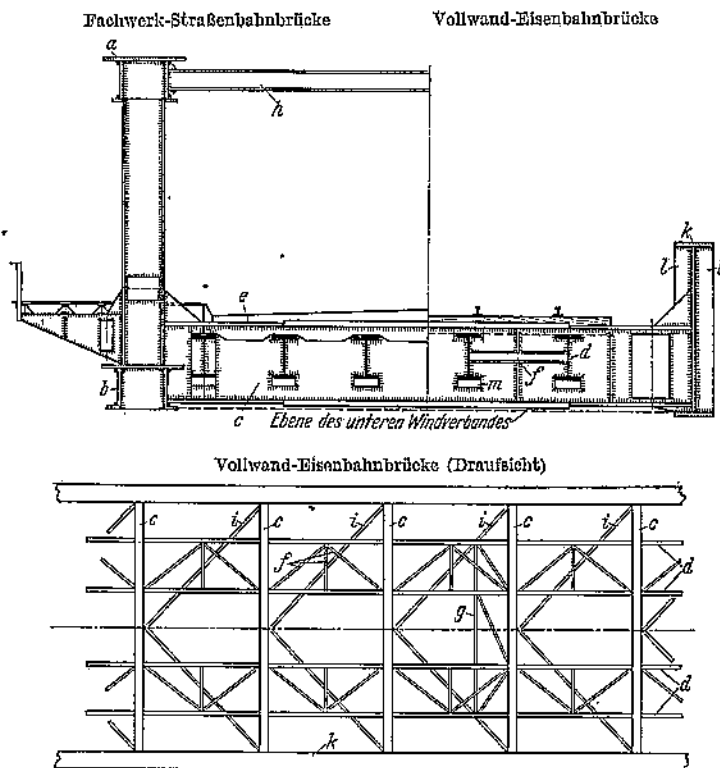


Abb. 297. Darstellung geschweißter Brücken.

a = Hauptträger Obergurt; b = Hauptträger Untergurt; c = Querträger; d = Längsträger; e = Buckelbleche; f = Schlingerverband; g = Bremsverband; h = oberer Windverband; i = unterer Windverband; k = vollwandiger Hauptträger; l = Versteifungsbleche; m = Auflagerbleche.

Konstruktionsschwierigkeiten. Wind-, Schlinger- und Bremsverbände sind ohne weiteres schweißgerecht ausführbar. Dasselbe gilt auch für die seitlich auskragenden Fußwege mit Geländern, Rohrleitungen usw. Sofern die Fahrbahndecke bei Straßenbrücken nicht aus Eisenbeton besteht, ist das Anschweißen der Belageisen oder der Buckelbleche gleichfalls vorteilhaft. Bei Eisenbahnbrücken mit durchgehender Bettung werden die Buckelbleche und bei offenen Brücken die Schwellenbefestigung auf den Längsträgern schon seit längerer Zeit geschweißt.

Vollwandbrücken. Wie in anderen Konstruktionseinzelheiten hat die Schweißung auch die Ausbildung der Hauptträger von Vollwandbrücken erheblich beeinflusst. Einige Konstruktionsmöglichkeiten sind in Abb. 298 skizziert. Die weniger günstige, anfänglich übliche Art des Anschweißens der Gurtwinkel an

die Stegbleche und Gurtplatten ist heute gänzlich verlassen worden. Gurtplatten werden unmittelbar an den Steg ohne Zwischenglieder angeschweißt, und zwar entweder im Sinne von I (Doppelkehlnaht) oder von II (K-Naht). III wird nur selten angewandt, was auch für IV gilt, wo eine Verstärkung des Gurttes durch angeschweißte Lamellen (eine oder mehrere) angedeutet ist. Die in der rechten Bildhälfte vorstehende Lamelle wird man immer dann vorsehen, wenn Überkopfschweißungen vermieden werden sollen. Eine weitere Ausführung ist die, daß man halbierte Normalprofile, Peiner- oder Halbprofile beiderseits stumpf an ein Stegblech von gleicher Dicke wie die Profilstege anschweißt und dadurch die zur Erlangung des erforderlichen Trägheits- und Widerstandsmomentes notwendige Höhe erzielt, wie dies bei VI dargestellt ist. Außerdem werden heute sog. Nasenprofile (V) verwendet, die das Verziehen der Gurtplatten beim Schweißen verhindern sollen.

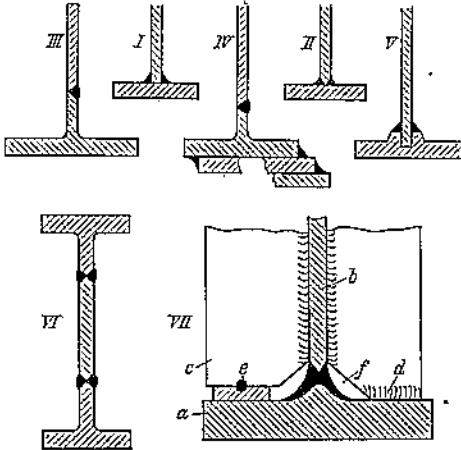


Abb. 298. Geschweißte Träger.

die zur Erlangung des erforderlichen Trägheits- und Widerstandsmomentes notwendige Höhe erzielt, wie dies bei VI dargestellt ist. Außerdem werden heute sog. Nasenprofile (V) verwendet, die das Verziehen der Gurtplatten beim Schweißen verhindern sollen.

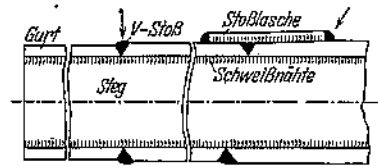


Abb. 299. Gurtplattenstöße.

Während man früher entsprechend der Momentenlinie des Trägers die Gurtplatten aufeinander packte, hat man sich der Eigenart der Schweißung angepaßt

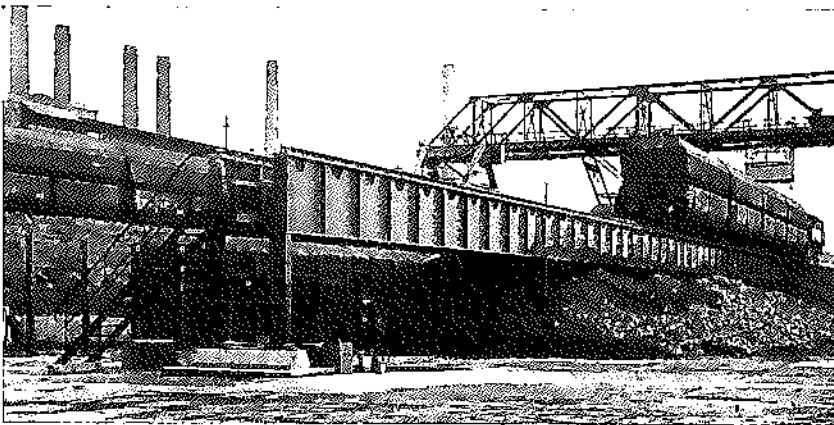


Abb. 300. Gänzlich geschweißte Vollwandbrücke,

und verwendet häufig nur eine dickere Gurtplatte, die entsprechend dem Momentenverlauf in Längen verschiedener Dicke unterteilt und unter sich stumpf verschweißt werden, wobei nötigenfalls Laschenverstärkungen vorgesehen werden können, s. Abb. 299.

Die Bauweise einer der ersten gänzlich geschweißten Vollwandbrücken zeigt Abb. 300. Die auf der Kohlenabsturzbrücke stehenden Großraumwagen sind ebenfalls geschweißt worden. Die Hauptträger der Brücke, die zugleich Schienenauflager sind, bestehen aus einem Stahlblech mit je einer oberen und unteren Gurtplatte. Von Auflager zu Auflager sind die Träger durch Versteifungsbleche in zehn gleiche Felder unterteilt. Die Versteifungsbleche sind mit durchlaufenden Kehlnähten an die Gurte und Stegbleche angeschweißt. Der gedrückte Obergurt ist in jedem Einzelfeld nochmals gegen den Steg abgesteift, um sein Verwinden zu verhindern. Bemerkenswert ist noch die Konstruktion der Auflager, besonders die Rahmenkonstruktion des im Bilde deutlich sichtbaren Endauflagers. Da rechtwinklig zur Kraftrichtung liegende Stirnkehlnähte in Zugstäben die Dauerfestigkeit herabsetzen, sollen möglichst immer (bes. im Brückenbau) die Aussteifungen *c* in Abb. 298 VII nur mit dem Stegblech *b* durch Kehlnähte verbunden werden, nicht aber mit der Gurtung *a*, wie bei *d* gezeigt. Vielmehr wird zweckmäßig, nach Schweißen von *b*, zwischen Zuggurt *a* und Aussteifung *c* ein Plättchen stramm eingepaßt und bei *e* geheftet, nicht aber starr verbunden.

Außerdem werden die Versteifungsbleche *c* an beiden Gurtungen (an der Hauptkehlnaht) abgeschrägt (*f*), und damit wird eine Anhäufung von sich schneidenden Nähten an dieser Stelle

vermieden. Die Ausführung *d* ist nur bei Druckgurten ratsam, d. h. hier kann das Blech *c* mit dem Gurt *a* unmittelbar verschweißt werden.

Brückenverstärkung. Die ständig steigenden Verkehrsbeanspruchungen machen häufig die Verstärkung genieteter Brücken, die diesen Beanspruchungen nicht mehr gewachsen sind, notwendig. Man hat daher die mit der Schweißung gemachten Erfahrungen auch auf die Verstärkung von Brücken übertragen. Die Verstärkung einer genieteten Diagonale durch das Aufschwei-

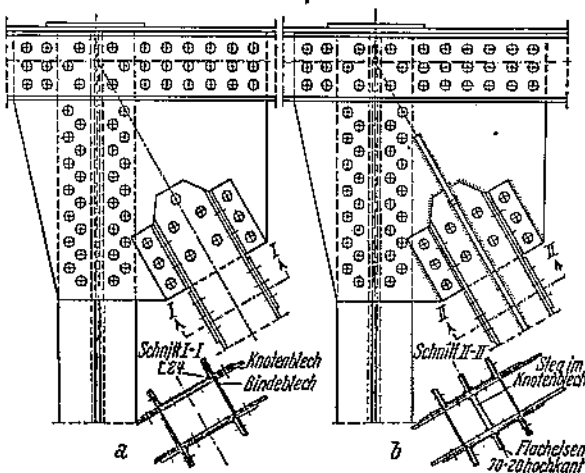


Abb. 301. Brückenverstärkung durch Schweißung.

Ben von Hochkantflachstahl bringt Abb. 301. In *a* ist der ursprüngliche Zustand der genieteten Konstruktion, in *b* ihr Aussehen nach angebrachter Verstärkung dargestellt.

4. Die Schweißung von Stahlguß.

Werkstoffeigenschaften. Stahlguß (Stahlformguß) ist ein im Martin-, Tiegel-, Elektroöfen oder in der Birne erschmolzener und in Formen vergossener Werkstoff, dessen Zusammensetzung je nach dem Zwecke, dem er zu dienen hat, in weiten Grenzen schwankt. Im allgemeinen enthält er 0,1...0,8 vH Kohlenstoff, 0,2...0,4 vH Silizium, 0,2...0,8 vH Mangan und stets unter 0,08 vH Phosphor und unter 0,03 vH Schwefel. Die Zugfestigkeit beträgt bei Normalgüte 38 bis 60 kg/mm², die Dehnung 8...20 vH. Man unterscheidet zwischen Stahlguß für Motoren- und Dynamogehäuse mit geringem Kohlenstoffgehalt (0,1...0,15 vH), solchem für den allgemeinen Maschinen- und Schiffbau mit mittlerem Kohlenstoff-

gehalt ($0,25 \cdots 0,3 \text{ vH}$) und hartem Stahlguß ($0,6 \cdots 0,8 \text{ vH Kohlenstoff}$), wie er für hochbeanspruchte oder starkem Verschleiß unterworfenen Maschinenteile in Frage kommt.

Elektroden. Aus vorgenannter Aufzählung geht hervor, daß für die Schweißung von Stahlguß je nach seinem Kohlenstoffgehalt bzw. seiner Festigkeit verschiedene Elektroden zu verwenden sind. Während für den am leichtesten schweißbaren Stahlguß geringen und mittleren Kohlenstoffgehalts bzw. entsprechender Festigkeit (Stg 38) die normalen Flußstahlelektroden im allgemeinen ausreichend sind, müssen für Stahlguß von hoher Festigkeit (Stg 45 $\cdots$ 60) Sonderelektroden verwendet werden.

Schweißverfahren. Das Anwendungsgebiet der Stahlgußschweißung umfaßt vor allem Ausbesserungsarbeiten, wie z. B. die Schweißung von Lunkern, Spannungsrissen, das Ausfüllen von Fehlstellen und Auftragen von Verschleißstellen, weniger die Verbindung von Formstücken unter sich und die Verschweißung von Stahlguß mit gewalztem oder gezogenem Stahl. Der grundsätzliche Unterschied zwischen Stahlguß und Gußeisen besteht darin, daß erster Kohlenstoff nur in gebundener Form und in erheblich geringerer Menge enthält als Gußeisen, bei dem der weitaus größte Teil des Kohlenstoffs in Form von Graphit ausgeschieden ist. Obwohl Stahlguß nur schwer blasen- und lunkerfrei zu gießen ist, macht seine Schweißung grundsätzlich keine Schwierigkeiten; sie unterscheidet sich von der des gewalzten Stahles so gut wie gar nicht. Die Vorbereitungsarbeiten entsprechen den bei der Stahlschweißung üblichen, d. h. Risse müssen durch Auskreuzen oder Ausbrennen, Lunker durch Freilegen für den Lichtbogen zugänglich gemacht werden. Dabei ist sorgfältig darauf zu achten, daß alle Fremdkörper, hauptsächlich Formsand, aus den freigelegten Stellen entfernt werden.

Für das zur Anwendung kommende Schweißverfahren, ob Kohle- oder Metalllichtbogen, sind das Ausmaß der Arbeit maßgebend und daneben die jeweiligen Betriebsverhältnisse. In der Stahlgießerei selbst wird für die Ausbesserung von Lunkern mitunter auch der Kohlelichtbogen herangezogen. Da außerdem, wie in allen anderen Gußkörpern, mit vorhandenen Gußspannungen gerechnet werden muß, wird, wenn eine Bearbeitung mit dem Kohlebogen vorliegt, eine dem eigentlichen Schweißvorgang vorausgehende Vorwärmung des Stahlgußkörpers nicht immer zu vermeiden sein. Bei der Ausbesserung von Lunkern mit dem Kohlelichtbogen werden meist normale Rundstahlstäbe als Zusatzwerkstoff eingeschmolzen. Sie haben bis zu 15 mm Durchmesser. Die Stromstärke kann 400 A und mehr erreichen bei einer Lichtbogenlänge von bis zu 100 mm, wodurch besonders kurze Schweißzeiten erzielt werden. Die durch das Schweißen entstandenen zusätzlichen Spannungen werden durch ein Spannungsfreiglühen oder Normalglühen aufgehoben, wobei dem Ausglühen mitunter auch noch die Aufgabe zufällt, harte Übergangszonen zwischen Schweiße und Grundwerkstoff zu beseitigen.

Außerhalb der Stahlgießerei kommt praktisch nur die Metalllichtbogenschweißung in Frage, weil die für das Ausglühen erforderlichen Einrichtungen nur selten

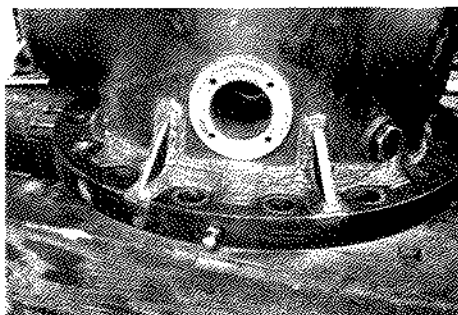


Abb. 302. Geschweißtes Stahlgußgehäuse.

vorhanden sind. Der Fortfall des Ausglühens bedingt besondere Vorsichtsmaßnahmen zur Vermeidung neuer Spannungen, hauptsächlich durch Anwendung verhältnismäßig niedriger Stromstärken und demgemäß dünnerer Elektroden.

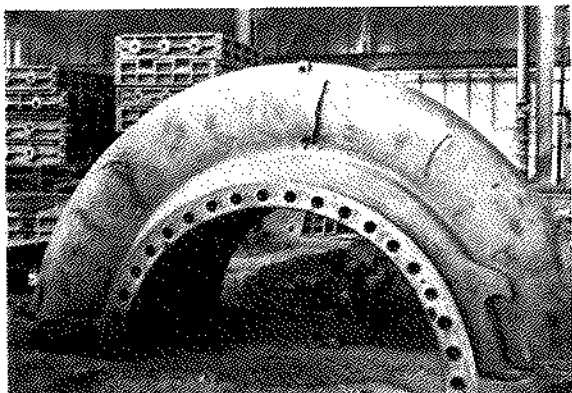


Abb. 303. Oberteil eines Spiralpumpengehäuses vor der Schweißung.

Bilde deutlich sichtbare, ringsum verschweißte Rippen verstärkt. — Abb. 302 zeigt das Oberteil eines großen Spiralpumpengehäuses, an dem drei Risse fertig zum Schweißen ausgekreuzt sind. Nach der Schweißung wurde das Gehäuse auf 50 at abgedrückt. Schwierigkeiten haben sich im Betriebe nicht ergeben.

5. Die Schweißung von Sonderstählen.

Allgemeines. Unsere bisherigen Betrachtungen bezogen sich nur auf gewöhnliche Bau- oder Konstruktionsstähle, sog. unlegierte Kohlenstoffstähle, die als Normalstähle (Regelstähle) anzusehen sind (St 00.11...St 44.11). Die darüberliegenden sog. hochfesten Baustähle (St 48.11...St 70.11) verursachen mancherlei Schwierigkeiten und sind nicht so gut schweißbar, und zwar um so weniger, je höher der Kohlenstoffgehalt liegt. Aus Zweckmäßigkeitsgründen sollen — obwohl es strenggenommen nicht ganz richtig ist — diese Baustoffe in der Gruppe der Sonderstähle behandelt werden.

Kohlenstoffstähle höherer Festigkeit. Die Grenze für leichtes und gutes Schweißen von Baustählen liegt bei St 42. Schon St 48 kann Schwierigkeiten verursachen, und es ist dann die Verwendung geeignet legierter Schweißdrähte für die Gütewerte der Schweiße bestimmend. Die Stähle St 60.11 sind, so merkwürdig das zunächst erscheinen mag, schwerer schweißbar als St 70.11. Dabei ist nicht allein die geeignete Legierung der Drähte von Bedeutung, sondern auch die mit dem Gehalt an Kohlenstoff steigende Wärmeempfindlichkeit des Baustahls und die damit verbundene Gefahr starker Überhitzung. Ein weiterer Umstand, der die Schweißung solcher Stähle vielfach ausschließt, ist die im Übergang zwischen Schweiße und Mutterwerkstoff infolge von Spannungsanhäufungen oder auf Grund von Ausscheidungshärtung auftretende Rißbildung, die einmal, voraussichtlich durch besondere niedrig gekohlte Schweißdrähte, welche genügende Festigkeit bei guter Dehnung gewährleisten, aufgehoben werden kann, zum anderen durch Vorwärmung der zu schweißenden Konstruktion. Die Schwierigkeiten steigern sich außerdem mit der Werkstoffdicke. In dieser Richtung ist die Entwicklung z. Z. noch stark im Flusse. So werden bereits Stähle von 120...140 kg/mm² Festigkeit mit Erfolg geschweißt, wobei allerdings die richtige Wärmebehandlung (Ab-

Unterbrochenes und abgesetztes Schweißen ermöglichen ein Niedrighalten von Temperatur und Spannung.

Schweißbeispiele. Da die Ausbesserung von Lunkern nichts Besonderes zeigt, wird auf die Wiedergabe entsprechender Bilder verzichtet. Die Abb. 302 zeigt ein Stahlgußgehäuse, dessen etwa 50 mm dicker Flansch auf die Hälfte seines Umfanges angerissen war. Der ausgekreuzte Riß wurde mit Stahlelektroden ausgeschweißt und der Flansch mit dem Gehäuse durch im

schrecken in Öl u. a.), sowie die sorgfältige Auswahl der Elektroden von großer Bedeutung sind.

Allgemeines über legierte Stähle. Bisher war nur von Kohlenstoffstählen die Rede. Mit den wachsenden Anforderungen an Maschinen und technische Bauwerke steigerten sich in gleicher Weise die Anforderungen an die Werkstoffe. Da die normalen Kohlenstoffstähle nicht mehr alle Bedingungen erfüllen konnten, mußte man Sonderstähle, sog. legierte Stähle, erzeugen. Von den zahllosen Anforderungen, die an legierte Stähle gestellt werden, sind vom schweißtechnischen Standpunkt aus folgende bedeutsam: geringe Wärmeausdehnungszahl, gutes oder schlechtes Wärmeleitvermögen, Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit (Rostsicherheit), Hitzebeständigkeit (Zunderfestigkeit), Warmfestigkeit, hohe Verformbarkeit u. a. m.

Wenn auch die Kohlenstoffstähle niemals völlig frei von dritten und weiteren Begleitern, wie z. B. Silizium, Mangan, Phosphor und Schwefel sind, so ist doch der Anteil dieser Elemente an der Legierung praktisch so gering, daß er die Eigenschaften der Stähle auch hinsichtlich ihrer Schweißbarkeit nur unwesentlich beeinflußt. Unter legierten Stählen sind deshalb Werkstoffe zu verstehen, die über dieses Maß weit hinaus größere, stark wechselnde Mengen an zwei, drei oder mehr Elementen als Zusätze enthalten. Als solche sind hervorzuheben: Silizium, Mangan, Chrom, Nickel, Vanadin, Wolfram, Kupfer, Molybdän, Titan, Uran, Tantal und Niob.

Einfluß der Zusätze auf den Stahl und seine Schweißbarkeit. Wie der Kohlenstoff haben auch die übrigen Legierungselemente meist die Eigenschaft, mit wachsendem Gehalt die Festigkeit des Stahls zu steigern und die Schweißbarkeit zu verringern.

Daß sich ein mit sorgfältiger Schmelzföhrung erzeugter Stahl an und für sich schweißtechnisch am günstigsten verhält, ist unzweifelhaft. Gegenüber dem Siemens-Martin-Verfahren ist diese metallurgische Bedingung beim Thomasverfahren nur schwer zu erfüllen, weshalb Thomasstahl meist ungünstigere Schweiß Eigenschaften besitzt.

Sind schon bei gewöhnlichen Kohlenstoffstählen die verunreinigenden Begleiter Schwefel und Phosphor immer unerwünscht, so trifft dies in noch größerem Maße für die legierten Stähle zu. So ist die Begrenzung des Schwefelgehalts deshalb von erhöhter Bedeutung, weil er durch einen ausgesprochen trägen Schmelzfluß noch mehr als Silizium ungenügendes Ausgaren und Porenanfälligkeit bewirkt. Die Porenbildung beschränkt sich bei höherem Schwefelgehalt nicht allein auf die runden Oberflächenporen, vielmehr reichen diese oft tief in den Querschnitt der Schweiße hinein. Außerdem macht die Neigung des Schwefels zur Rotbrüchigkeit die Schweiße stark anfällig für Warmrisse. Durch höheren Phosphorgehalt wird zwar eine unmittelbare Beeinträchtigung der Schweißbarkeit kaum nachweisbar sein, jedoch wirkt sich die ihm eigentümliche Kaltsprödigkeit insofern ungünstig aus, als er die Ursache von Längsrissen, vor allem neben der Naht, und sogar von Querrissen in der Schweiße selbst sein kann.

Ein Gehalt von 0,8...1,2 vH Silizium erhöht die Festigkeit (Si-Baustähle). Sein ungünstiger Einfluß auf die Schweiß Eigenschaften des Stahls ist unverkennbar; er bewirkt, wie Schwefel, einen trägen Fluß und behindert das Ausgaren der Schweiße, womit mehr oder weniger große ovale Gasblasen und Oberflächenporen im Schweißquerschnitt vorhanden sind. Ein höherer Siliziumgehalt läßt im allgemeinen Rückschlüsse auf die Schmelzföhrung des Stahls zu, der gegenüber „unberuhigtem“ in solchem Falle „beruhigt“ vergossen wurde, d. h. der beruhigte Stahl wurde erst vergossen, nachdem einer völligen Desoxydation eine Zugabe

an Silizium und Aluminium gefolgt war, während bei einer Desoxydation durch Mangan allein ein unberuhigter Stahl entsteht. Stähle bis zu St. 50 werden normalerweise unberuhigt (also „unsiliziert“), Sorten über St. 50 stets beruhigt, also siliziert, vergossen. Daraus erklärt sich die oft scheinbar unbegründete deutliche Abweichung im Schweißverhalten der Stähle fast gleicher Festigkeit unter sich. Höher silizierter Stahl (1,5...4,2 vH Si), wegen seiner günstigen magnetischen Eigenschaften für Umspanner- und Dynamobleche gebräuchlich, ist als nicht schweißbar anzusprechen. Dieser Stahl ist außerordentlich dickflüssig und neigt zu erheblicher Poren- und Rißanfälligkeit.

Mangan hat desoxydierende Wirkung. Ein Gehalt von 0,8...2,0 vH erhöht die Streckgrenze. Manganstähle dieser Zusammensetzung ergeben gute Schweißen, wie ja ganz allgemein mit zunehmendem Mangangehalt in gewissem Sinne die Schweißbarkeit gefördert wird. Allerdings darf dabei eine mitunter ausschlaggebende Rißempfindlichkeit nicht außer acht gelassen werden, besonders dann, wenn der Reinheitsgrad des Schmelzbades auf ungenügende Desoxydation schließen läßt, was durch einen trägen Fluß und starkes Spratzen zum Ausdruck kommt. Die von der Abkühlungsgeschwindigkeit abhängige Härte höher manganhaltiger Stähle wächst mit der Dauer der Abkühlung und läßt sich überdies auch durch Kalthämmern steigern. Niedriggekohlte Manganstähle, mit 0,1...0,2 vH C und mit über 1 vH Mn, werden hauptsächlich als Konstruktionswerkstoff im Flugzeugbau verwendet und, da es sich hier nur um geringe Werkstoffdicken handelt, ausschließlich autogen geschweißt. Hochgekohlte Manganstähle (mit 0,4 bis 1,0 vH C) werden nur bei der Auftragsschweißung angewandt.

Größere Anteile an Mangan (10...15 vH) liefern einen verschleißfesten austenitischen Manganhartstahl. Seine Verschleißfestigkeit liegt wesentlich höher als auf Grund seiner Härte zu erwarten wäre. Größere Anteile an Mangan erschweren die Schweißbarkeit, da diese Legierungen im rotwarmen Zustande sehr brüchig sind, und sich durch Schrumpfspannungen leicht Risse bilden. Auch diese Stähle werden nur für verschleißfeste Auftragsschweißung benutzt, wobei darauf zu achten ist, daß das Werkstück nicht zu warm wird, da das Mangan im Lichtbogen leicht oxydiert und gern große Poren hinterläßt. Deshalb dürfen immer nur kurze Raupen aufgetragen werden, die, um eine Aufhärtung der Schweiße zu gewährleisten, gut zu hämmern sind. Gegebenenfalls ist die Schweiße beschleunigt abzukühlen, um das austenitische Gefüge, dem die günstigen Eigenschaften dieser Legierung zu verdanken sind, bestehen zu lassen.

Ein Zusatz an Chrom steigert die Korrosionsbeständigkeit. Reine Chromstähle sind durchweg sehr schlecht schweißbar, und zwar nimmt die Schweißbarkeit mit steigendem Chromgehalt rasch ab, weil sich nichtschmelzbare Oxyde und Schlacken bilden, die z. T. in der Schweiße abgelagert werden, z. T. auch auf der Oberfläche des Schmelzbades die Durchführung der Schweißung stören. Für die Schweißbarkeit von Chromstählen ist ihr Gehalt an Kohlenstoff ausschlaggebend. Die Grenzen der Eisen-Chrom-Legierungen, bei denen nach Erwärnung und normaler Abkühlung keine nennenswerten Härtesteigerungen eintreten, liegen etwa wie folgt:

0,10 vH Kohlenstoff bei	~17 vH Chrom
0,25 vH	„ ~24 vH „
0,45 vH	„ ~30 vH „

Chromstähle mit weniger Kohlenstoff oder mehr Chrom als angegeben haben ferritisches Gefüge. Zwischenliegende Analysen ergeben martensitische Stähle, die lufthärtend sind, weshalb sie beim Schweißen (über 800°) sehr spröde werden.

Nachbehandlung durch Glühen bei 700...800° ist nur von geringerem Einfluß auf die Zähigkeit und Festigkeit der Schweiße.

Sehr gefördert wird die Schweißbarkeit durch Zusatz von Nickel. Es genügen schon einige Prozente dieses Metalls, um die sonst sehr schwer oder gar nicht schweißbaren Legierungen gut schweißbar zu machen, während dies von reinen Nickelstählen nicht ohne weiteres behauptet werden kann. Stähle vorgenannter Art zählen zur Gruppe der rostsicheren, unmagnetischen Chrom-Nickel-Stähle (bis 20 vH Chrom und bis 12 vH Nickel).

Ausschließlich mit Vanadin legierte Stähle kommen fast nur im Kesselbau (0,2 vH Vanadin) und bei hochbeanspruchten Schmiedestücken vor. Der geringe Gehalt an Vanadin beeinflusst die Schweißbarkeit kaum merklich. Die Schweißen von Vanadinstählen müssen meist normalisiert werden. Das gilt auch für Molybdän- und Silizium-Mangan-Chrom-Stähle. Man läßt dann die Stähle bis auf Schwarzwärme kalt werden und erhitzt sie wieder auf etwa 830°, um sie dann ganz allmählich an der Luft erkalten zu lassen. Die Glühtemperatur darf jedoch nicht überschritten werden, weil sonst ein grobkörniges Gefüge entsteht.

Geringe Zusätze an Wolfram (1...1,5 vH) steigern die Härte und Verschleißfestigkeit des Stahls ohne Einbuße an Zähigkeit. Stähle dieser Art spielen als Elektrodenwerkstoff bei verschleißfester Auftragsschweißung eine Rolle.

Kupfer wird den Baustählen bis zu 0,7 vH zur Erhöhung der Witterungsbeständigkeit zugegeben. Der geringe Kupfergehalt verursacht praktisch keine besonderen schweißtechnischen Schwierigkeiten.

Das Schweißen von Armcoeisen. Mitunter ist ein möglichst reines Eisen als Baustoff erwünscht. Ein solches ist unter dem Namen Armcoeisen bekanntgeworden (abgekürzt aus American Rolling Mill Co. in Middletown-Ohio, in Deutschland von den Vereinigten Stahlwerken hergestellt) mit 0,015 vH C, 0,005 vH Si, 0,028 vH Mn, 0,006 vH P und 0,03 vH S. Armcoeisen ist witterungsbeständig und unter Beobachtung einiger Vorsichtsmaßregeln leicht und sehr gut schweißbar. Es ergibt einen guten Einbrand, gute Bindung und Dichte, verformbare Nähte von hoher Dehnung. Armcoeisen wird mit dem Minuspol an der Elektrode und mit praktisch noch erreichbar kürzestem Lichtbogen geschweißt, um Veränderungen des Metalls auszuschließen und die Witterungsbeständigkeit zu erhalten. Aus diesem Grunde dürfen Armcoelektroden (es handelt sich um Armcodraht derselben Beschaffenheit) nur im blanken Zustande verschweißt werden, da bei getauchten Stäben die Gefahr des Einschlusses von Schlackeninseln besteht, womit ebenfalls eine Verminderung der Witterungsbeständigkeit verknüpft ist. Die beim Schweißen sich bildende Zunderschicht läßt sich leicht entfernen. Das Gefüge der Schweiße und deren Übergang ist vom Grundwerkstoff kaum zu unterscheiden.

Das Schweißen von St 52. Die Schwierigkeiten bei dem hochwertigen Baustahl St 52 beruhen vor allem darauf, daß ursprünglich etwa zwei Dutzend Stähle gleicher Bezeichnung mit stark wechselnden Analysen im Handel waren. Die Zusammensetzungen schwankten in weiten Grenzen zwischen 0,09...0,22 Kohlenstoff, 0,25...1,1 Silizium, 0,75...1,65 Mangan, neben geringen Mengen an Kupfer und auch Chrom und Molybdän. Die Frage der Schweißung von St 52 ist als praktisch gelöst anzusehen, nachdem eine gewisse Stetigkeit in den Legierungen erreicht wurde und diesem Sonderzweck angepaßte Elektroden in den Handel kamen. Jetzt liegen hauptsächlich drei Grundarten der St 52-Legierungen vor, und zwar Chrom-Kupfer-, Silizium-Mangan- und Molybdän-Stähle. Hierbei darf ein Gehalt von 0,2 vH C, 0,6 vH Si, 1,2 vH Mn und 0,55 vH Cu nicht überschritten werden. Außerdem ist noch ein zusätzlicher Gehalt von 0,4 vH Mn oder 0,4 vH Cr oder 0,2 vH Mo zulässig. Die Praxis hat gelehrt, daß die Verwendung

getauchter Elektroden nicht unbedingt erforderlich ist, sondern auch mit nackten Sonderelektroden (z. B. Seelendraht mit bis zu 2 vH Mangan) einwandfreie Schweißungen erreichbar sind. St 52 ist im gewissen Sinne sogar gut schweißbar, wenn auf seine Wärmeempfindlichkeit Rücksicht genommen wird. Die Festigkeit der Schweiße erreicht oder übertrifft die des Grundwerkstoffs.

Sonderstahlarten (metallographisch unterschieden). Man hat in der Hauptsache zwischen perlitischen, martensitischen und austenitischen Stählen zu unterscheiden, die sich beim Schweißen grundverschieden verhalten.

Unter perlitischen Stählen versteht man Stähle mit Legierungsbestandteilen in geringen prozentualen Anteilen, so daß sich der Gefügebau des Stahls und die Umwandlungstemperaturen nicht wesentlich von denen unlegierter Stähle unterscheiden. Der Hauptgefügebestandteil ist Perlit, der beim Abschrecken, d. h. beim raschen Erkalten der Schweiße, in Martensit übergeht. Die durch die Luftabkühlung entstandene Härte und Festigkeit kann durch Weichglühen bei 600 bis 750° (je nach Legierung) herabgemindert werden. Solche Stähle sind gut schweißbar, sofern geeignete Schweißdrähte zur Verwendung gelangen. Häufig wird diesem Schweißdraht Nickel an Stelle von Mangan zugesetzt, da es wie Mangan wirkt, aber restlos in der Schweiße verbleibt und nicht oxydiert.

Erheblich anders verhalten sich martensitische Stähle, deren Zusatz an verschiedenen Legierungselementen so groß ist, daß sie auch bei sehr langsamem Erkalten harte und spröde, ja sogar glasharte Schweißen ergeben, die durch Glühen kaum oder überhaupt nicht zu beeinflussen sind. Schweißen dieser Art dürfen statisch nur sehr wenig und dynamisch gar nicht beansprucht werden, da stoß- oder schlagartige Beanspruchungen, oft schon geringe Biegung genügen, um die Verbindung zu zerstören. Daraus erklärt es sich, daß martensitische Stähle für Verbindungsschweißungen ungeeignet sind und aus der Gruppe der schweißbaren legierten Stähle im engeren Sinne ausscheiden müssen. Dagegen wird, wie früher betont, die Auftragsschweißung von mit Chrom bzw. Wolfram legierten martensitischen Stählen für hohe Härte oder Verschleißfestigkeit angewandt, weil es bei dieser Schweißung nicht auf ein hohes Arbeitsvermögen, sondern gerade auf Härte und Verschleißfestigkeit ankommt.

Die austenitischen Stähle sind noch höher legiert, meist mit Chrom, Nickel, Molybdän oder Wolfram, wodurch die Umwandlung in Perlit ganz unterdrückt wird. Diese Stähle bestehen sowohl bei gewöhnlicher wie bei hoher Temperatur aus Austenit (Mischkristallen) und sind meist unmagnetisch und rostfrei. Auch bei Abkühlung aus hoher Temperatur bleiben sie zäh und werden nicht hart. Hierher gehören z. B. der verschleißfeste Manganstahl (1,2 vH C und 15 vH Mn) und verschiedene Chrom-Nickelstähle. Austenitische Stähle eignen sich sehr gut zur Schweißung, wenn mit nur mäßigen Stromstärken gearbeitet wird.

Die Schweißung säurefester, nichtrostender und hitzebeständiger Stähle. Bei diesen Stählen handelt es sich in der Mehrzahl der Fälle um Eisen-Chrom- oder Eisen-Chrom-Nickel-Legierungen mit stark wechselnden Mengen an diesen Elementen. Bei warmfesten Stählen wird Nickel häufig auch durch Molybdän und Chrom durch Kupfer ersetzt. Tabelle 19 gibt, nach metallographischen Gesichtspunkten geordnet, einen zusammenfassenden Überblick über die in Deutschland gebräuchlichen korrosionsbeständigen Chrom-Nickel- und Chromstähle.

Unter den nichtrostenden Stählen kommt schweißtechnisch vor allem die austenitische Gruppe in Betracht, deren Hauptvertreter der V 2 A-Stahl ist. Ihm ähnlich sind SAS- und einige z. T. molybdänlegierte Remanit-Stähle mit bis zu 0,1 vH Kohlenstoff. Die austenitischen Stähle besitzen die anderthalbfache Wärmeausdehnung und nur $\frac{1}{4} \dots \frac{1}{2}$ der Wärmeleitfähigkeit des Flußstahls. Des-

halb macht die Schweißung dieser Stähle besondere Maßnahmen erforderlich, weil durch Wärmestauung weit höhere Spannungen und Verwerfungen auftreten als bei unlegierten Stählen. Auf Grund des geringen Wärmeleitvermögens werden solche Stähle mit geringer Stromstärke (10...20 vH weniger als bei Stahl) und mit nicht zu dicken Elektroden geschweißt.

Tabelle 19.

Gefüge	C vH	Cr vH	Ni vH	Mn vH
Austenitisch	Spuren bis 0,40	18...22	8 ...10	0,3... 6,0
Austenitisch	0,10...0,40	10...26	15 ...80	0,3... 2,0
Austenitisch-ferritisch	Spuren bis 0,20	14...18	0 ... 2	6 ...10
Halbferritisch	Spuren bis 0,20	13...18	—	0,3... 0,6
Ferritisch	0,05...0,40	25...32	0 ... 5	0,3... 0,6
Martensitisch	0,15...0,45	13...18	0,5... 2	0,2... 0,8

Eine wesentliche Forderung, die man noch an die Schweiße solcher Stähle stellen muß, ist das Verhalten bei Korrosionsbeanspruchung. Um ungleiche Korrosionsbeständigkeit auszuschließen, ist gleiche Beschaffenheit von Werkstoff und Schweißdraht Bedingung, wenn nicht in Sonderfällen, um Abbrandverluste auszugleichen, ein Zusatz an ausbrennenden Stoffen erforderlich ist, z. B. bewährt sich häufig ein geringer Silizium- oder Manganzusatz, der einen guten Fluß und einen Schutz gegen die Oxydation des für die Korrosionseigenschaften wichtigen Chloms bildet. Außerdem verhindern solche Zusätze die starke Lufthärtung mancher Stähle. Auch Zusätze von Kobalt, Wolfram, Molybdän, Vanadin, Titan, Aluminium usw. sind vorteilhaft. Für die Legierungen der Remanite z. B. ist ein besonderer mit „Thermanit“ bezeichneter Schweißdraht im Handel. Im einzelnen hierauf einzugehen, ist unmöglich. Man richte sich bezüglich der Schweißbedingungen und der Zusatzdrähte nach den Anweisungen der Lieferwerke.

Um der durch die Wärmestauung im schlechtleitenden Stahl auftretenden Verwerfung des Werkstücks zu begegnen, ist eine gute Einspannung des Schweißstücks unerlässlich. Dünnere Bleche werden in einer Lage, dickere in zwei und mehr Lagen geschweißt, wobei die Abschrägung der Bleche sowohl v- wie x-förmig sein kann und schon bei 3 mm Blechdicke notwendig ist.

Die Schweiße austenitischer Stähle ist zäh und sehr gut verformbar. Mit steigendem Kohlenstoffgehalt nimmt die Korrosionsbeständigkeit ab. Bereits bei über 0,07 vH Kohlenstoffgehalt erleiden die Legierungen zwischen 290 und 840° Gefügeumwandlungen, wobei ein Teil des Kohlenstoffs in Eisenkarbid oder Eisen-Chrom-Karbid verwandelt wird. Die Karbide verursachen Stellen niedrigen Potentials, lagern sich an den Korngrenzen ab und rufen infolge der elektrolytischen Wirkungen (Lokalelemente) rasche Korrosion hervor, die z. T. auch auf den Verlust des Grundwerkstoffs an Chrom zurückzuführen ist. Zur Beseitigung der Karbide, d. h. zu ihrer Auflösung im Metall, ist ein nochmaliges Erwärmen der Schweiße bzw. des gesamten Werkstücks und darauffolgendes Abschrecken in Wasser notwendig.

V 2 A N-Stähle werden vergütet, indem sie auf 1100...1150° erhitzt und abgeschreckt werden, V 2 A E- und V 2 A S-Stähle auf 930...980° erhitzt mit nachfolgendem Abschrecken in Wasser. Das Vergüten muß sich auf den geschweißten Körper insgesamt erstrecken, was besonders bei dünnen Blechkonstruktionen und bei Körpern von großen Ausmaßen oft gar nicht durchführbar ist, weil sehr große Glühöfen notwendig sind. Nach langwierigen Versuchen ist es der Firma Krupp gelungen, Extrastähle, und zwar den V 2 A E- und V 4 A E-Stahl (Titan-

legierungen) herzustellen, die einer Vergütung der Schweiße durch Wärmenachbehandlung überhaupt nicht mehr bedürfen. Bei allen austenitischen Stählen (erkennbar an dem Buchstaben A in der Bezeichnung; z. B. V 2A) wird im Gegensatz zu anderen Stählen durch Abschrecken eine Härteverminderung hervorgerufen. Der beim Schweißen von Cr-Ni-Stählen in der Umgebung der Schweiße auftretende Korngrenzenzerfall (interkristalline Korrosion) wurde durch eine starke Verminderung des Kohlenstoffanteils und durch einen geringen Zusatz an Titan oder durch Wärmenachbehandlung der Schweiße oberhalb der Rekristallisationstemperatur und unterhalb der Lösungstemperatur für Karbide unterbunden. Bei den älteren VA-Stählen zeigte sich nämlich, daß zwar die Schweiße als solche meist korrosionsfest war, aber in einiger Entfernung beiderseits nach kurzer Zeit ein Brüchigwerden einsetzte, was darauf zurückzuführen war, daß dem Stahl Erwärmungen auf $400 \cdots 600^\circ$ besonders gefährlich wurden, gleichgültig ob man ihn schnell oder langsam abkühlte. Diese Wärmezone in dem der Schweiße benachbarten Werkstoff zu vermeiden, ist ausgeschlossen, weshalb eine Wärmenachbehandlung, die auch die Korrosion nur verzögerte und nicht aufhob, unerlässlich war. In den neuen Extrastählen ist der Kohlenstoffgehalt auf ein so geringes Maß gebracht, daß die Ausscheidung von Karbiden ausgeschlossen ist.

Beim Schweißen der Stähle der halferritischen Legierungsgruppe tritt neben einer Härtesteigerung der zu vergütenden Stähle noch eine starke Kornvergrößerung auf, die mit steigendem Ferritanteil zunimmt. Die mit dem Kornwachstum verbundene Sprödigkeit läßt sich durch Wärmenachbehandlung nicht mehr rückgängig machen, weshalb von einer Schweißung dieser Stähle meist abzusehen ist.

Auch die martensitische Gruppe der nichtrostenden Stähle (VIM, V3M usw., M = Zeichen für Martensit) eignet sich nicht zur Schweißung, da sie eine Umwandlung des gesamten Gefüges und daher eine außerordentliche Härtezunahme erfährt. Nicht nachbehandelte Schweißen brechen bei geringster Biegebeanspruchung. Eine Vergütung (Abkühlen in Luft oder Öl und Anlassen) bleibt von geringem Erfolge. Es kann zwar in der Schweiße die Festigkeit des Grundwerkstoffs, aber nicht entfernt seine Dehnung erreicht werden. Glücklicherweise liegt die Notwendigkeit bzw. der Wunsch, martensitische Chrom-Nickel-Stähle zu schweißen, in Anbetracht ihrer andersgearteten Verwendbarkeit in der Praxis nur sehr vereinzelt vor.

Da die ferritische Stahlgruppe keine Gefügeveränderung durchmacht, tritt durch Wärmebehandlung, also auch durch Schweißen, keine wesentliche Beeinflussung ein. Zur Reihe dieser Stähle zählen die hochlegierten ferritischen hitzebeständigen Legierungen (z. B. Ferrotherm, Nichrotherm, Nialit [Guß]). Bei hoher Temperatur gleichen sich die Eigenschaften des Grundwerkstoffs und der Schweiße annähernd aus. Feuerbeständige Stähle dieser Art haben nur sehr geringen Zunderverlust. Die Höhe der Legierungsbestandteile richtet sich nach dem Grade der Beanspruchung (zwischen 1100 und 1300°) und bewegt sich zwischen $15 \cdots 25$ vH Chrom neben steigenden Mengen an Nickel ($18 \cdots 70$ vH). Für die Schweißung von hochhitzebeständigen Stählen gilt im allgemeinen das bezüglich niedriger legierter Chrom-Nickel-Stähle und das im folgenden Absatz Ausgeführte.

Außer den zunderbeständigen Eisen-Chrom- und Eisen-Chrom-Nickel-Legierungen ist noch ein anderer hitzebeständiger Stahl zu erwähnen, der neben $6 \cdots 22$ vH Chrom $0,5 \cdots 4$ vH Aluminium enthält und unter der Bezeichnung Sicromal in den Handel kommt. Bei höherem Aluminiumgehalt der Chrom-Aluminium-Stähle besteht die Zunderschicht größtenteils aus Tonerde (Aluminiumoxyd, Al_2O_3), die einen hohen elektrischen Widerstand und einen Schmelzpunkt von

etwa 2050° besitzt, weshalb sie zweckmäßig vor Beginn der Schweißung an den Schmelzrändern durch Feilen oder Schmirgeln zu entfernen ist. Da der Schmelzpunkt der Sicromale tiefer liegt als der des weichen Kohlenstoffstahls, wird eine um etwa 15 vH größere Abschmelzgeschwindigkeit der Elektrode und damit eine höhere Schweißgeschwindigkeit erreicht. Von großer Wichtigkeit für eine dichte Schweißung ist die Zusammensetzung der Umhüllungsmasse, die stark eisenoxydhaltige saure Schlacke enthalten muß, um wirksam zu sein. Mit Rücksicht auf die Empfindlichkeit solcher Stähle gegen Wärmespannungen ist es, um Rißbildungen zu vermeiden, meist notwendig, Legierungen mit höherem Aluminiumgehalt auf 200...400° vorzuwärmen. Die verbleibenden Schweißspannungen werden auch hier durch Ausglühen und allerdings langsames Erkaltenlassen beseitigt. Auf Grund praktischer Erfahrungen kann behauptet werden, daß sich Sicromal-Elektroden in keinem Falle eignen; der Werkstoff wird deshalb fast ausschließlich mit Chromnickelstahl-Elektroden (austenitisch) z. B. mit V 2 A-Stäben geschweißt.

Da sich äußerliche Unterschiede im Aussehen geschweißter Sonderstahlkonstruktionen gegenüber gewöhnlichen nicht feststellen lassen, wird hier von der Wiedergabe von Bildern abgesehen.

Auftragsschweißung mit Hartmetallen. Neben dem austenitischen Manganstahl oder dem Chrom-Manganstahl, neben wolframlegierten Stählen u. a., die als gezogene Elektroden geliefert und vor allem dort als Auftragswerkstoff verwendet werden, wo es weniger auf Härte (bis zu 250 Brinellhärte) als auf hohe Verschleißfestigkeit ankommt, sind Hartmetallelektroden sehr in Aufnahme gekommen. Streng genommen gehören auch diese Metalle nicht in diesen Abschnitt, da sie nur wenig oder gar kein Eisen enthalten. Soweit es sich nicht um Schneidmetalle (Widia, Volomit, Miramant, Böhlerit usw.) handelt, sondern um solche, die als Auftragswerkstoff eine bedeutende Rolle spielen, müssen jedoch grundsätzliche Fragen an dieser Stelle behandelt werden. Dabei ist schon jetzt hervorzuheben, daß Verbindungsschweißungen dieser Werkstoffe nicht möglich sind.

Hartmetallarten. Die Hartmetalle können wie folgt gruppiert werden: 1. in gegossene Stäbe aus Chrom-Mangan-Eisen-Legierungen, 2. in Stellite und stellitartige Legierungen, die ebenfalls als gegossene Stäbe geliefert werden, 3. in gegossene Karbidhartmetalle und 4. in gesinterte Karbidhartmetalle.

Hartlegierungen der 1. Gruppe sind der Schweißung der oben erwähnten Chrom-Manganstahlelektroden sehr ähnlich. Bekannte Auftragselektroden dieser Art sind: Stoodit, Hacerome und Diawald.

Die der 2. Gruppe angehörenden Stellite sind auf der Grundlage Kobalt-Chrom-Wolfram legiert und enthalten etwa 0,1...2,5 vH C, 35...65 vH Co, 25...33 vH Cr, 4...25 vH W, 0...10 vH Fe und geringe Mengen Mn und Si. Zuschläge an Ni sollen Kobalt ersetzen; andere, wie Mn, Mo, Ta, Ti und Va, ersetzen Wolfram. Diese Stäbe (sie können ebenfalls nur gegossen hergestellt werden) lassen sich auf Stahl beliebiger Festigkeit aufschweißen. Hartmetalle dieser Legierungsgruppe sind z. B. Stellit, Percit, Caedit, Celsit, Durit, Tizit-Akrit und Real.

Die gegossenen Karbidhartmetalle der 3. Gruppe bestehen hauptsächlich aus ungesättigten Karbiden des Wolframs und Molybdäns. Sie sind seltener mit Cr, Ti, Ta und Zr als Ersatz für Wolfram und Molybdän legiert. Fe, Ni und Co werden zur Verminderung der Sprödigkeit zugesetzt.

Die der 4. Gruppe zugeordneten Hartmetalle bestehen aus gesättigten und gesinterten Karbiden des Wolframs, Titans, Tantals und Molybdäns oder aus Mischungen dieser Karbide. Ihnen werden niedrigschmelzende Bindemittel, wie Co, Ni und Fe, beilegiert. Schweißtechnisch sind die Wolframkarbide

von großer Bedeutung. Zu ihnen gehören Verdur und Borod, die in dünnen oft umhüllten Stahlblechröhren eingesintert sind.

Endlich ist noch eine Abart dieser Karbide zu erwähnen; es sind dies reine Wolframkarbide in Pulver- oder Körnerform, die infolge ihres sehr hohen Schmelzpunktes (etwa 2500°) nur mit dem Kohlelichtbogen aufgeschweißt werden können. Hartmetalle dieser Art sind unter der Bezeichnung Carbon und Blackor bekannt geworden.

Als Composite Rod sind 5...10 mm dicke Schweißstäbe entwickelt worden, in deren aus Chrom-Mangan-Eisen (Diaweld, Stoodit) bestehenden Grundmasse granuliertes Wolfram (von 1...2 mm Körnung) eingeschmolzen ist.

Anwendung und Verschweißung der Hartmetalle. Die Anwendungsmöglichkeit des Auftragschweißens mit Hartmetallelektroden ist außerordentlich umfangreich. So werden Manganhartstähle auf Brecherbacken, Greifeimer, auf Baggerschneiden u. ä. aufgetragen. Chrom-Manganstahlelektroden können auch auf Gußeisen aufgeschweißt werden. Für die richtige Wahl der Elektrodenart, bzw. der Hartmetallart und für den jeweils besonderen Zweck der Auftragschweißung, sind mancherlei Forderungen bestimmend, weshalb die Schweißung nicht immer leicht ist. Entscheidend ist, ob Kalt- oder Warmhärte, ob besonderer Widerstand gegen Schlag- oder gegen Korrosionsbeanspruchung, gegen mechanische Abnutzung usw. verlangt wird. Um nur einige wichtige Anwendungsbeispiele herauszugreifen, seien genannt: Die Auftragungen auf Walzwerksführungen, Kratzer und Schuhe von Koksaustrückmaschinen in Kokereien, auf Kranzangengreiferspitzten (für Warmblöcke), Picken von Schrämmaschinen, auf Pflugscharen, Messer und Warmscheren aller Art, auf Rotay-, Kern- und Fischschwanzbohrer, Baggereimer, Kopierschablonen, auf Gesenkkanten, Transportschnecken, Ventilstösseldorne und die Panzerung von Ventilsitzen. Von Wichtigkeit ist auch die unmittelbare Auftragung von Schneiden auf Drehstähle und Messer.

Hinsichtlich des Verschweißens dieser Elektroden sind einige grundsätzliche Maßnahmen herauszustellen. Alle Elektroden, ob nackt oder ummantelt (meist handelt es sich um umhüllte Stäbe) sind am Pluspol zu verschweißen; die vom Lieferer angegebenen Stromstärken sind einzuhalten. Es muß sich gerade ein guter Fluß ergeben, zu hoher Strom ist schädlich. Beim Verschweißen von Stelltiten und gegossenen Karbidstäben ist es immer ratsam, in mehreren dünnen und nicht in wenigen dicken Lagen aufzutragen. Ein starkes Aufschmelzen des Grundwerkstoffs wie beim Verbindungsschweißen ist schädlich. Damit ähnelt die erste Auftragung mehr einer Hartlötung. Sehr wichtig ist die Wärmehaltung des Werkstücks, das mitunter, um Spannungsrisse zu vermeiden, zwischen Schamottesteinen gleichmäßig auf 300...500° erhitzt und während des Schweißens auf dieser Temperatur gehalten wird. Da die aufgetragenen Schichten eine hohe Naturhärte aufweisen, die auch bei höheren Temperaturen erhalten bleibt und ein langsames Erkalten höhere Härte und ein feineres Korn bewirkt, sollen die Werkstücke sofort nach dem Schweißen in warmem Sand oder in warmer Asche erkalten.

Gesinterte Hartmetalle ergeben in der Auftragsschweiße Härten, die der Härte des Diamants sehr nahe kommen; sie sind infolge ihrer Sprödigkeit empfindlich gegen Schlag und Stoß und können für derart beanspruchte Werkstücke nicht verwendet werden.

Körniges Wolframkarbid wird entweder auf die Flächen des Werkstücks unmittelbar aufgelegt oder in entsprechende Vertiefungen eingesetzt und mit dem Kohlelichtbogen aufgeschweißt. Bei Kronenbohrern z. B. können diese Karbidbröckchen bis Erbsengröße haben; sie lösen sich im Mutterwerkstoff auf, und die

eingebetteten Karbidkörner stehen über die überschliflenen Auftragsflächen etwas vor. Für die Wiederherstellung von Steinbearbeitungswerkzeugen ist dieses Verfahren erfolgreich eingeführt.

6. Die Schweißung plattierter Bleche¹.

Allgemeines. Unter plattierten Blechen versteht man einen Verbundwerkstoff, der durch Warmaufwalzen unter sich verschiedener Metalle entsteht und wobei zwischen Grundwerkstoff und Plattierungsmetall eine feste Preßschweißverbindung erreicht wird. Demnach besteht keine Verwandtschaft zwischen diesem Verfahren und dem dünnen galvanischen Überziehen von Blechen mit Nichteisenmetallen.

Der Grundwerkstoff kann entweder Stahl (bis zu 80 kg/mm^2 Festigkeit, selten über 60 mm dick) sein, dessen ein- oder zweiseitige Decke (Plattierungsschicht) aus einem Nichteisenmetall, wie Kupfer, Monelmetall, Nickel, Chrom-Nickel-Stahl, Aluminium u. a. besteht, oder er besteht selbst aus einem Nichteisenmetall, auf das andere Metalle ein- oder zweiseitig warm aufgewalzt werden, z. B. Silber auf Kupfer, Leichtmetall-Legierungen auf Reinaluminium usw. Die Bemessung der Plattierungsdicke ist von deren Beanspruchung auf Korrosion und Verschleiß abhängig. Sie beträgt im allgemeinen 10 vH der Gesamtdicke, mitunter aber auch weniger oder mehr. Bei höherer Festigkeit lassen sich aus diesen Verbundwerkstoffen Behälter und Apparate für die chemische Industrie herstellen, die früher aus Nichteisenmetallen allein, hauptsächlich aus Kupfer und Nickel, gefertigt werden mußten. Hierdurch werden devisa-belastete Metalle in großem Umfange eingespart.

Vorbereitung zum Schweißen. Da mit Rücksicht auf die Korrosionsbeständigkeit die Plattierung an keiner Stelle eine Unterbrechung erfahren darf, kommt als Verbindungsverfahren fast ausschließlich das Schweißen in Frage. In Anbetracht des Vorhandenseins zweier, in ihren Eigenschaften grundverschiedener Werkstoffe müssen die Blechkanten besonders sorgfältig, am besten durch Hobeln vorbereitet werden, wobei ein Verschrammen und jede sonstige Beschädigung der Decker Oberfläche zu vermeiden ist.

Der bei dünnen Blechen übliche π -Stoß (Abb. 304) — Bördelnähte kommen praktisch nur selten vor — wird entsprechend Abb. 304 I vorbereitet, d. h. die Kanten werden mit geringem Spalt zusammengelegt, bei doppelseitiger Plattierung im Sinne von II. Um ein Einschmelzen des Plattierungsmetall in den Stahlkern und Zwischenlegierungen zu verhüten, ist es oft zweckmäßig, die Deckschicht beiderseits um einige Millimeter abzarbeiten, und zwar auf eine Breite, die von der Blechdicke und von der Art des Metalles abhängig ist. Abschrägung und Vorbereitung der Kanten dicker Bleche entsprechen dem früher zu Abb. 164 Gesagten.

Neben anderen Möglichkeiten, wie U- und X-Nähten, werden die bei III und IV skizzierten Vorbereitungen bevorzugt, wobei die Abschrägungswinkel α und α' mit

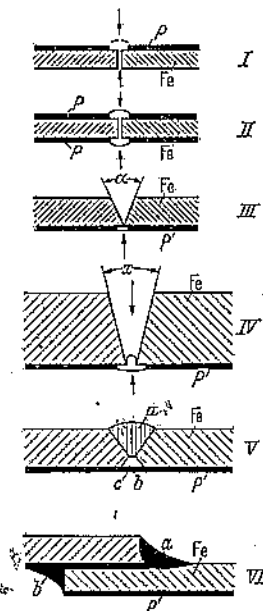


Abb. 304. Vorbereitung plattierter Bleche zum Schweißen.

¹ Siehe auch Horn: Das Schweißen von Kupfer und Messing. 3. Aufl., herausgegeben vom Deutschen Kupferinstitut, Berlin.

denen der Abb. 163 und Abb. 164 übereinstimmen. Eck- und Kantennähte werden entsprechend Abb. 305 I und II zugerichtet. Dabei ist b die Stahlschweiße und a die der jeweiligen Plattierungsschicht P entsprechende Metallschicht.

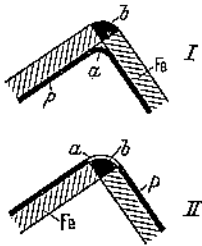


Abb. 305. Eck- oder Kantennähte an plattierten Blechen.

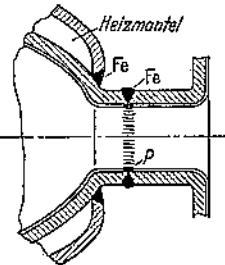


Abb. 306. Anordnung der Schweißnähte an plattierten Behältern.

Das Schweißen der Bleche. Als Grundsatz muß gelten, daß stets zuerst die Stahlseite und erst dann die Plattierungsschicht zu schweißen ist. Für die Schweißung des Stahlkerns gelten die bekannten Grundsätze hinsichtlich Stromstärke, Elektrodenart und -dicke, Lagenzahl usw., für die Plattierung das später Angeführte. Bevor die Gegenseite, also die Plattierungsschicht aufgetragen wird, ist der beim Schweißen der Stahlseite durchgeschmolzene Werkstoff im Nahtscheidel (Wurzel) durch Behauen oder Schleifen zu entfernen; nicht durchgeschweißte Wurzelstellen sind von der Gegenseite aus nachzuschweißen. Die für das Auftragen der Decke bestimmte Stahloberfläche ist von Zunder, Schlacken, Metallspritzern usw. sorgfältig zu befreien, da sonst im Nichteisenmetall leicht Poren und Risse auftreten können. Die aufgetragenen Metallschichten müssen dicht sein, weil sonst infolge von Elementbildung (z. B. Kupfer-Eisen) Korrosion auftreten kann. Poren sind auszukreuzen und von neuem zu verschweißen. Besondere Aufmerksamkeit verlangt die Nickelplattierung, die mit Eisen nicht legiert werden darf. Rißbildung in der Nickelauflage wird am besten durch Vorwärmen des Stahlbleches vermieden.

Durch das Ab- und Ausschleifen der Schweißnaht soll die Dicke des Grundwerkstoffs möglichst nicht geschwächt werden, d. h. es darf nur so viel von der Schweiße abgearbeitet werden, wie es eine dichte Decklage verlangt. Um Zwischenlegierungen in der Decklage auszuschließen, kann jedoch auch nach Abb. 304 V verfahren werden, indem man nach Schweißen von a (Stahlseite) die Gegenseite bei b etwas ausfräst und erst eine Grundraupe b z. B. mit Nickel aufträgt und dann erst die eigentliche Decklage c in einer zweiten Lage aufbringt.

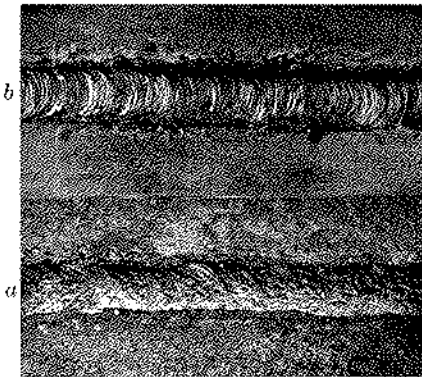


Abb. 307. Aussehen der Schweißnähte an kupferplattiertem Stahlblech.

Hinsichtlich der Schweißnahtgüte an Verbundblechen kann als feststehend gelten, daß eine Zugfestigkeit von rund 90 vH des Mutterwerkstoffes praktisch immer erreichbar ist und die Verbindung anschließende Verformungsarbeiten schadlos aufzunehmen vermag. Ein Beispiel der konstruktiven Ausbildung von Behälterstützen und die Anordnung der Schweißnähte zeigt Abb. 306. Überlappnähte sollen nur in zwingenden Fällen vorgesehen und, wenn unvermeidlich, im Sinne von Abb. 304 VI geschweißt werden, derart, daß die Stahlseite mit einer Kehlnaht a aus Stahl, die Plattierungsseite P mit einer Kehlnaht b aus dem gleichen Metall angeschlossen wird. Das beiderseitige Aussehen der Nähte an plattiertem Kupferblech zeigt Abb. 307. Dabei handelt es

sich um ein 5 mm Stahlblech, das einseitig mit 1 mm Kupfer plattiert ist. *a* veranschaulicht die Stahlseite, *b* die Kupferseite. Den auf Stahl und Kupfer geätzten Makroschliff dieser Schweißnaht zeigt Abb. 308. Weder die Stahl- noch die Kupferseite wurden nachbehandelt.

7. Die Schweißung von Gußeisen.

Schweißverfahren. Grundsätzlich sind zwei verschiedene Gußeisenschweißverfahren zu unterscheiden, und zwar die Kaltschweißung und die Warmschweißung. Erste ist nur elektrisch, letzte sowohl als Gas- wie als Elektroschweißung durchführbar. Eine eigentliche Gaskaltschweißung gibt es nicht, da eine sachgemäße Schweiße auf diesem Wege nicht erzielbar ist. Als Sonderart der elektrischen Warmschweißung kann noch die Halbwarmschweißung genannt werden, die praktisch weniger von Bedeutung ist. Kalt- und Warmschweißung ergänzen sich vielfach gegenseitig, doch hat die Kaltschweißung erhebliche Mängel.



Abb. 308. Makroschliff einer Schweißnaht an kupferplattiertem Stahlblech.

Anwendungsgrenzen. Alle Gußeisenschweißverfahren sind Ausbesserungsmittel. Die Konstruktionsschweißung an Gußkörpern hat sich bisher noch nicht eingeführt, obwohl sie häufig bei verwickelten Konstruktionen wirtschaftlich anwendbar wäre. Die Fälle, in denen Gußeisen überhaupt nicht schweißbar ist, sind selten; sie beschränken sich ausschließlich auf durch innere Oxydation zersetzten Guß, d. h. auf Körper, die längere Zeit der Einwirkung von Flammen, von überhitztem Dampf oder auch dem Einflusse von Wasser ausgesetzt waren. Diese als Brand- oder Faulguß bezeichneten Körper lassen sich weder mit der Gebläseflamme noch mit dem Lichtbogen verflüssigen und zerbröckeln in der Wärme oft wie trockener Ton.

Zur Wahl des Schweißverfahrens. Die Entscheidung, welches Schweißverfahren für diese oder jene Ausbesserung wegen des geringsten Kostenaufwands und des besten Erfolges zu bevorzugen ist, ist durchaus nicht leicht; eine falsche Einteilung des Arbeitsgangs ist nur zu oft als Grund für eine mißlungene Schweißung anzusprechen. Bei der elektrischen Gußschweißung soll man nach Möglichkeit die Warmschweißung bevorzugen. Zur Kaltschweißung sollte man sich nur dann entschließen, wenn die Warmschweißung aus triftigen Gründen, die von Ausbau-, Beförderungs-, Gewichts-, Kosten- und anderen Verhältnissen abhängen, nicht anwendbar ist. Die Kaltschweißung ist ein ausgesprochenes Behelfsmittel, auf das gänzlich zu verzichten aber nicht gut möglich ist, da es oft der einzige Weg ist, der zur Erhaltung beschädigter Gußstücke beschritten werden kann. Während des Schweißens nicht wendbare Gußkörper mit großen Bruchflächen¹, ferner solche, die das Einschmelzen größerer Gußmengen oder auch den Ersatz größerer fehlender Teile notwendig machen, werden zweckmäßig, wenn nicht zwangsläufig warmgeschweißt.

a) Die Kaltschweißung.

Allgemeines. Die Kaltschweißung umfaßt vor allem die Ausbesserung von Werkstücken, die weder gut druckdicht sein müssen, noch höhere Festigkeitsbeanspruchungen auszuhalten haben. Beispielsweise werden Risse und Brüche

¹ Siehe Horn: Die Schweißung schwerer Gußkörper. Techn. Zbl. 1930 Heft 4.

an Platten, Hebeln, Seilscheiben, Schwung- und Zahnrädern, Gehäusen, Fundamentrahmen, Maschinenständern usw. meistens kalt geschweißt. Der große Vorzug der Kaltschweißung liegt darin, daß das Werkstück in jeder beliebigen Lage geschweißt werden kann, sofern nur die schadhafte Stelle für den Elektrodenhalter zugänglich ist. Demnach kann auch in senkrechter Lage, ja sogar gut über Kopf geschweißt werden; denn es wird nicht Gußeisen eingeschmolzen, wie bei der Gas- und elektrischen Wärmeschweißung, sondern Stahl. Bei sämtlichen Gußeisenkaltschweißungen werden Stahlelektroden (meist umhüllt) verwendet, wenn nicht besondere Anforderungen ein Löten mit Nichteisenmetall bedingen, wovon noch später die Rede ist. Versuche, für die Kaltschweißung auch Gußeisenelektroden zu benutzen, sind gescheitert, weil die erhitzten Elektroden leicht abbrechen und in großen Tropfen abfließen, ohne sich mit dem noch zu kalten Mutterwerkstoff zu verbinden, und weil außerdem sehr harte Schweißen entstehen (weißes Roheisen). Auch alle Anstrengungen, hochnickelhaltige Gußstäbe für die Gußeisenkaltschweißung nutzbar zu machen, waren erfolglos. Weil nun eine innige Verbindung zwischen Stahl und Gußeisen nur schwer und nicht immer erzielbar ist, ist die Kaltschweißung nicht als vollkommen anzusehen. Es sind Hilfsmittel erforderlich, die eine einigermaßen ausreichende Festigkeit und Dichtigkeit der Schweiße ergeben. Die Undichtigkeiten, als Folge dieser mangelhaften Abbindung, sind immer beiderseits der Schweiße entlang den Übergangsrändern anzutreffen, während die Stahlschweiße an sich dicht ist. Nach vorigem können also Gußkörper, von denen im Betriebe Dichtigkeit verlangt wird, z. B. Pumpen-, Dampfmaschinen-, Explosionsmotor- oder Kompressorzylinder, Behälter usw., selten kalt geschweißt werden.

Erklärung der harten Schweißränder. Die Kaltschweißung ist an den Übergangsrändern zum Werkstück meist so hart, daß eine Bearbeitung nur durch Schleifen möglich ist. Die Entstehung dieser Härte soll an Hand der Abb. 309 kurz besprochen werden. Die die Zonen 1, 2 und 3 umfassende Linse entspreche dem Querschnitt einer auf das Gußstück 6 aufgetragenen Stahlraupe. Im Kopfe

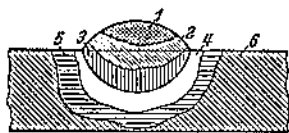


Abb. 309. Gußeisenkaltschweißung.

dieser Raupe bei 1 ist in einem von der Größe der Fläche und der Höhe der Schweißstromstärke abhängigen Umfang ein Werkstoff anzutreffen, der etwa dem der Elektrode entspricht; es handelt sich in Zone 1 demnach um weichen Stahl. In Zone 2 wird durch Kohlenstoffaufnahme aus dem Gußeisen (vergaster Graphit) eine etwas härtere, aber immer noch gut bearbeitbare Stahlschicht vorliegen, während in Zone 3 ein durch größere Kohlenstoffaufnahme hart gewordener spröder Stahl praktisch kaum zu vermeiden ist. Weitaus am härtesten ist jedoch die Übergangszone 4, in der ein abgeschrecktes weißes Gußeisen (Hartguß) gebildet wird, das infolge seiner Sprödigkeit während des Erhaltens der Schweiße leicht zu Rißbildung führen kann. Endlich zeigt die Zone 5 einen durch Wärmewirkung umgewandelten Grauguß und 6 den nicht beeinflussten Grundwerkstoff.

Es soll in dünnen Lagen geschweißt werden, um die harten Zonen und die weiter aufliegenden immer wieder auszuglühen. Dabei muß man mit geringer Stromstärke arbeiten, da infolge der verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten der einzelnen Schichten leicht Spannungen und Haarrisse entstehen, die dann die bereits erwähnte Undichtigkeit zur Folge haben. Eine bessere Bindung, weniger spröde und dichtere Schweißen erhält man, wenn an Stelle der Stahlelektroden solche aus Monelmetall eingeschmolzen werden. Dabei bleiben die Übergangsränder meist bearbeitbar (s. auch „Schweißvorgang“).

Vorbereitung der Arbeitsstücke. Die Vorbereitungen der Arbeitsstücke zur Schweißung, wie wir sie beim Stahlschweißen kennengelernt haben, sind für Gußschweißungen unzulänglich. Würde man die V-förmige Mulde einfach mit im Lichtbogen niedergeschmolzenen Stahlelektroden auffüllen, dann würde in der Mehrzahl der Fälle die eingeschmolzene Schicht mit Hammer und Meißel in langen Stücken mühelos herausgeschlagen werden können, ein Beweis für schlechte Verbindung an den Übergangsrändern zum Guß. Um sich dagegen zu schützen, greift man zu einem allerdings zeitraubenden und etwas umständlichen Hilfsmittel, zum sog. Stiftverfahren, welches darauf beruht, die beiden Bruchränder mit versetzten Gewindestiften (Stahlstiften, ähnlich Stiftschrauben) zu versehen. Diese Stifte sind dann die Grundpfeiler einer Brücke, die durch den aufgetragenen, von der Schweißelektrode abgeschmolzenen Stahl gebildet wird. Der Stahl stellt also in der Hauptsache eine Verbindung mit den Stahlstiften her, während zwischen ihm und den Rändern des Gusses meist nur eine mangelhafte Verbindung besteht.

Die Art der Anordnung der Stifte richtet sich nach dem Aussehen der Bruchfläche, nach der Werkstoffdicke und dem Grade der gewünschten Festigkeit. Selbstverständlich ist es sehr wichtig, mit den Abmessungen der Stifte nicht zu weit zu gehen, damit der Werkstoffquerschnitt nicht unnütz weitere Schwächungen erfährt. Abb. 310 I...III veranschaulicht das Anbringen und Verteilen der Stifte bei Schweißungen an Werkstücken bis zu 30 mm Wanddicke.

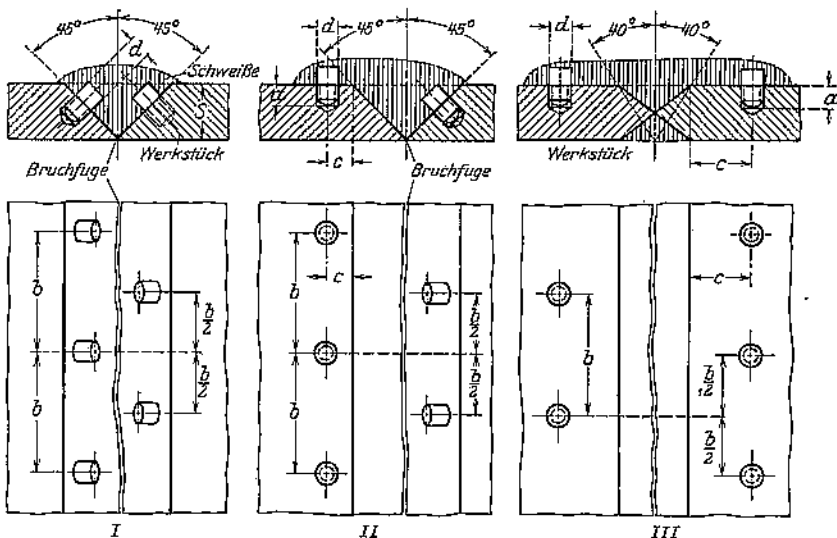


Abb. 310. Anordnung von Stiften bei Gußeisenkalterschweißungen.

In die Bruchfuge wird eine V- bzw. X-förmige Schweißmulde eingearbeitet (am schnellsten mit Druckluftmeißeln) und in oder an dieser, wie Niete verteilt, eine entsprechende Anzahl von Stiftschrauben eingeschraubt. Es genügen gewöhnliche Maschinenschrauben, deren Kopf nach dem Einschrauben in die Gewindelöcher abgesägt wird. Einfacher ist es allerdings, die Köpfe samt dem überflüssigen Teile der Bolzenlänge vorher abzusägen oder abzuschlagen und die Bolzen mit einer Blitzzange einzuziehen. Bei I (Abb. 310) liegen die Stiftschrauben an beiden Bruchrändern innerhalb der Schweißhaltung und winklig zu dieser, bei II nur einerseits, während auf der anderen Seite die Bolzen winklig zur Körperfläche

und außerhalb der Schweißmulde gelegen sind. In Abb. III sind die Schrauben auf beiden Seiten außen entlang der Schweißfuge angebracht. Im übrigen ist die Anordnungsweise von den örtlichen Verhältnissen und der Zugänglichkeit des Schweißguts abhängig.

Zwischen Werkstoffdicke, Bolzendicke und Mittenentfernung von Bolzen zu Bolzen bestehen, unter Zugrundelegung der in Abb. 310 enthaltenen Zeichen, folgende Beziehungen:

Abb. 310 I und II	$d = 0,3 \cdots 0,4 s$, höchstens $\frac{1}{2}''$ (13 mm Durchmesser),
Abb. 310 III	$d = 0,5 s$, „ $\frac{3}{4}''$ (20 mm Durchmesser),
	$a = 1,0 \cdots 1,5 d$, „ $0,5 s$,
	$c = 1,5 d$,
	$b = 4 \cdots 8 d$ (versetzt),

wobei d den Durchmesser der Schraubenbolzen, a die Gewindelochtiefe, c die Entfernung der Lochmitte von der Schweißkante, b die Bolzenteilung und s die Werkstoffdicke bedeutet. Über 30 mm Werkstoffdicke erfordert meist eine zwei- und mehrreihige Stiftsetzung, wie dies Abb. 311 I und II wiedergibt. Es ist dann $c = 4 d$, d beliebig (jedoch nicht über 0,3 s) und $a = 1,0 \cdots 1,5 d$. Teilung und Stärke der Bolzen müssen bei der naturgemäß recht mannigfaltigen Formgebung

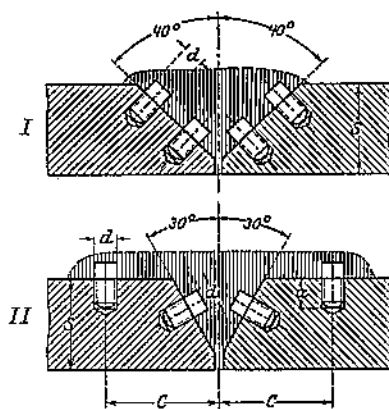


Abb. 311. Zweireihige Stiftsetzung.

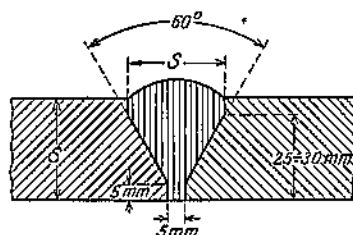


Abb. 312. Bearbeitung der Schweißmulde ohne Stiftsetzung.

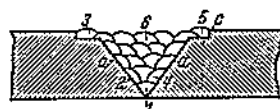


Abb. 313. Anordnung der Lagen bei Gußeisenschweißungen.

der Gußstücke und dem Zwecke, dem sie zu dienen haben, dem Gefühl des erfahrenen Praktikers überlassen bleiben.

Hat man sich von der Beschaffenheit des Gußeisens durch eine Schweißprobe überzeugt und glaubt man bei Werkstücken, die nur geringer Festigkeitsbeanspruchung standzuhalten haben, ohne Stiftsetzung auszukommen, dann bearbeitet man die Schweißmulde zweckmäßig nach Abb. 312. Im übrigen kann die Bruchfläche auch x-förmig ausgearbeitet und doppelseitig geschweißt werden. Sehr zu empfehlen ist es, beiderseits der Schweißfuge die Gußhaut auf 10...20 mm Breite und 2...3 mm Tiefe auszumeißeln (bei c in Abb. 313). Wenn die Gußhaut bleibt, wird die Bindung zwischen Guß und Stahl nur mangelhaft, und die Schweiße läßt sich um so leichter herausheben. Mitunter genügt auch das Einsetzen von Klammern (Abb. 314a), die in beide Bruchränder eingehohlet und dort verschweißt werden. Dabei kann es sich allerdings nur um geringere Gußquerschnitte handeln. Bei dickeren Gußwandungen (Pressenständer und ähnliches) unterstützt man die

Stifte häufig noch durch Anker (Abb. 314b). Allerdings erfordert dieses Verfahren eine besonders mühsame Vorbereitung der Bruchränder. Der eigentliche, durch die Stifte gefestigte Kopfanke besteht aus Schweiße, die beim Einschrumpfen die Bruchränder zusammendrückt. Derartig verstärkte Kaltschweißungen haben ziemlich hohe Festigkeit und halten bei Maschinenbrüchen oft besser als der Grundwerkstoff. Mitunter wird die Schweiße auch durch Stahllaschen verstärkt, die über der eigentlichen Schweiße ebenfalls durch Schweißung befestigt werden. So zeigt Abb. 315 einen Fall, in dem außer der Verstärkungslasche noch Paßflächen *a* vorgesehen sind. Das Maß *a* soll möglichst knapp bemessen sein und nicht über 5 mm und nicht unter 2,5 mm betragen. Diese Paßflächen werden unverbunden gelassen, also nicht durchgeschweißt, und dort angewandt, wo die Gegenseite der Schweiße (der Scheitel) gut bearbeitbar sein muß. Die Schwächung des Querschnitts soll durch die aufgeschweißte Lasche aufgehoben werden.

Der Schweißvorgang. Die Schweißarbeit unterscheidet sich von jener der Stahlschweißung eigentlich gar nicht, da ja auch hier Stahlelektroden verschmolzen werden. Jedoch ist es besonders wichtig, die Wärmezufuhr und die Wärmefortleitung im Gußkörper auf das geringste Maß zu beschränken, da sonst Spannungsrisse kaum zu vermeiden sind. Das gilt sowohl für dünnwandigen Guß wie für besonders mit Spannungen behaftete Gußhohlkörper (Zylinder u. dgl.) und radförmige Werkstücke. Auch beim Schweißen dickwandiger, an sich aber weniger mit Spannungen behafteter Gußkörper können durch große Schweißquerschnitte, die sehr viele Lagenschweißungen bedingen, erhebliche Spannungen auftreten, die Rißbildung verursachen. Deshalb darf oft nur sehr langsam und mit größeren Arbeitspausen gearbeitet werden. Der Schweißstrom soll nicht zu hoch und muß niedriger sein als bei der Stahlschweißung. Als Annäherungswerte können die Daten der Tabelle 20 gelten, von denen je nach besonderen Verhältnissen entsprechende Abweichungen zulässig sind.

Während der Arbeitsausführung muß der jeweilige Wärmezustand des Gußkörpers gut beobachtet werden. Wird die Wärmeableitung an die der Schweiße benachbarten Teile zu groß, so muß die Schweißung öfter unterbrochen werden. Der Aufbau der Lagen kann nicht wahllos erfolgen, vielmehr muß die Aufeinanderfolge der Abb. 313 berücksichtigt werden, wenn eine möglichst dichte und im Übergang einigermaßen feste Schweiße angestrebt wird. Es wäre beispielsweise falsch, die Lagen vom Scheitel der Mulde ausgehend aufeinanderzuschichten; vielmehr muß man so vorgehen, daß vorerst die Lage 1 mit gutem Einbrand und möglichst guter Bindung eingeschmolzen wird. Sodann werden die übrigen Lagen an den Rändern der Mulde dicht nebeneinanderliegend angeordnet, mit Raupe 2 begin-

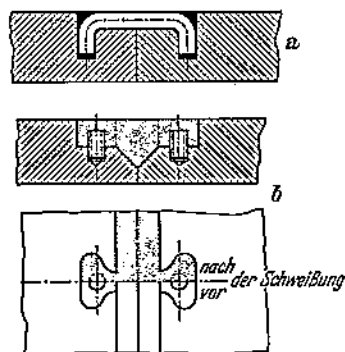


Abb. 314. Anker in der Gußschweiße.

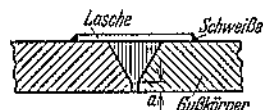


Abb. 315. Gußschweiße mit Verstärkungslasche.

Tabelle 20.

Wanddicke mm	Schweiß- spannung V	Schweißstrom- stärke A	Elektroden- durchmesser mm
5	22	120	3...4
10	24	150	4
15	26	160	4
20	30	180...190	4...5
über 20	35	190...200	5

nend bis zur Abschlußraupe 3. Es folgen in gleicher Weise die Raupen 4...5 an der gegenseitigen Abschrägung, und erst jetzt wird der gesamte Querschnitt bis zur Lage 6 schichtweise ausgefüllt. Um die geschilderte Undichtigkeit am Übergang zwischen Schweiße und Guß, also entlang der Flächen *a* zu beseitigen, werden häufig die Raupen 1, 3 und 5 mit einem sehr weichen Elektrodenwerkstoff

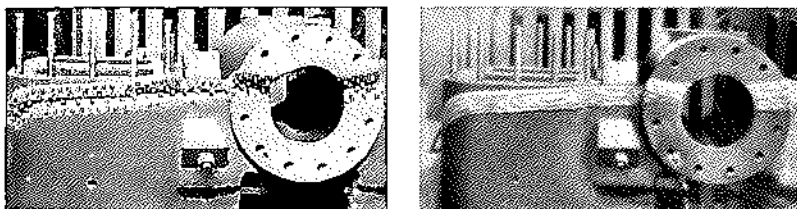


Abb. 316 u. 317. Kaltschweißung eines Gußzylinders.

aufgetragen und dann vorsichtig verstemmt. Aus dem gleichen Grunde und um die Randzonen der Schweiße bei 3 und 5 bearbeitbar zu erhalten, wird die

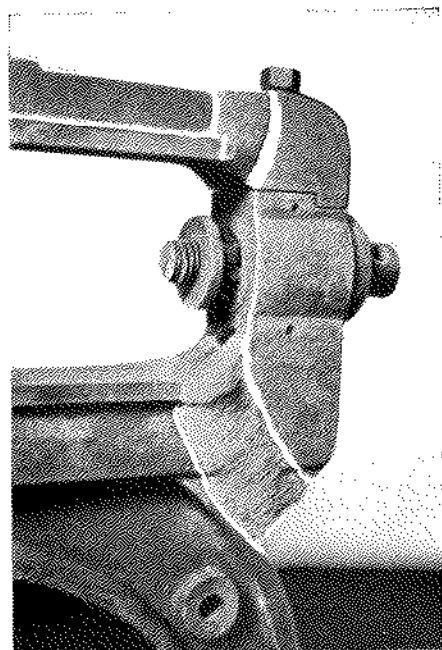


Abb. 318. Schweißung am Ständer einer Gummiwalze.

oberste Lage (3—6—5) oft auch mit Monelmetall ausgeführt, das in die Poren des Gusses, die durch Vergasung der Graphitadern gebildet werden, eindringt und sich im Gußgefüge gut verankert.

Die Kaltschweißung hat aber auch, wie wir bereits sahen, verschiedene Vorzüge. Zunächst fällt die mit erheblichen Kosten verknüpfte Einformung und Vorwärmung des Schweißgutes fort, und dann, was das Wichtigste ist, der Gußkörper kann fast immer in jeder Lage geschweißt werden, ohne daß er ausgebaut oder gewendet werden muß. Der eingeschweißte Stahl läßt sich in jeder Richtung halten, ohne abzufließen, während beim elektrischen Wärmeschweißen und Gasschweißen die waagerechte Lage der Schweißstelle wenigstens annähernd und dauernd erhalten bleiben muß, weil hier in beiden Fällen Gußeisen eingeschmolzen wird, das sonst abfließen würde, bevor es erstarren kann. Da die Kaltschweißung außerdem eine Unterbrechung der Arbeit gestattet, so oft dies der Wärmezustand des Schweiß-

guts verlangt, versetzt sie uns in die angenehme Lage, Gegenstände, die nicht ausgebaut und nicht fortbewegt werden können, an Ort und Stelle zu schweißen, was die Wärmeschweißung und die Gasschweißung in den seltensten Fällen ermöglichen.

Ausgeführte Schweißungen. Den Werdegang einer Kaltschweißung veranschaulichen die Abb. 316 und 317. Nach dem Ausvauen der Bruchstelle hatte der Zylinder das Aussehen der Abb. 316. Die Flächen der Schweißmulden wurden

beiderseits doppelreihig verstiftet und im Sinne der Abb. 311 I verschweißt. Das Schweißergebnis ist in Abb. 317 in unbearbeitetem Zustande zu sehen. Abb. 318 zeigt die fertige Schweißung am massiven Ständer einer Gummiwalze. Die Ausbesserung wurde an Ort und Stelle ohne Ausbau und ohne Umlegen des sehr schweren Gußkörpers durchgeführt. Die Schweißung ist mit Kreide umrandet.

b) Die Warmschweißung.

Allgemeines. Die Anwendung von Festigkeitsträgern (Stiften, Laschen usw.) fällt fort. Als Elektrodenwerkstoff dienen nicht mehr Stahlstäbe mit ihrer ganz anderen physikalischen Beschaffenheit und ihrem vom Gußeisen stark abweichenden Ausdehnungskoeffizienten, sondern Gußstäbe, sowohl nackte wie überzogene. Infolgedessen ergibt sich zwischen Werkstoff und Schweißung eine gute, gleichmäßige und, was das Wichtigste ist, dichte Verbindung, die in der Schweißung sogar höhere Festigkeit erreicht, als sie der Grundwerkstoff besitzt. Die Schweißung bleibt weich und ist leicht mechanisch bearbeitbar, was bei der Kaltschweißung nicht oder sehr selten zutrifft.

Das Wesen der Warmschweißung beruht darauf, das zu schweißende Werkstück in Sand einzuformen, im Feuer vorzuwärmen, unter Verwendung hoher Schweißstromstärken mit Gußeisenelektroden zu schweißen und im Feuer oder in heißer Asche allmählich erkalten zu lassen. Aus dieser kurzen Beschreibung läßt sich die Anwendbarkeit der an sich vorzüglichen, wenn auch teuren und umständlichen Warmschweißung verhältnismäßig leicht bestimmen. Sie kommt dort in Frage, wo eine dichte Schweißung und hohe Festigkeit verlangt wird, wo die Schweißung im Betrieb dauernden Temperaturschwankungen ausgesetzt ist und gut bearbeitbar sein muß, und endlich dort, wo das betreffende Werkstück ausgebaut und eingeformt werden kann. Mittels der Warmschweißung werden daher vor allem geschweißt: Zylinder von Dampf-, Eis- und Gasmaschinen, von Kompressoren, Pumpen usw., überhaupt Innendrücken ausgesetzte Hohlkörper. Doch gibt es eine untere Grenze bezüglich der Wanddicken. So sind beispielsweise Risse in Autozylindern nach dem Warmschweißverfahren nicht schweißbar, nur in vereinzelten Fällen nach dem Kaltschweißverfahren, aber immer gasschweißbar.

Einrichtung der Warmschweißerei. Außer der vollständigen elektrischen Einrichtung (Maschine, Meß- und Schaltinstrumenten, Kabeln, Schweißzange, Lichtschutz usw.) gehören zur Ausrüstung einer gut eingerichteten Warmschweißerei: Ein den eigentlichen Schweißraum überspannender Laufkran, eine, besser mehrere Schweißgruben (4×2 m), die je nach Bedarf unterteilbar und unter Umständen mit Schamotteplatten ausgemauert sind, ferner eine gute Entlüftungsvorrichtung, die eine Belästigung der aufs äußerste angespannten Schweißer durch die sich beim Schweißen entwickelnden Gase verhütet. Die Absaugeleitung muß der besseren Wirkung halber mit einem Entlüfter in Verbindung stehen und muß ein Stück über der Schweißgrube beweglich und in einem Winkel von etwa 90° verstellbar sein. Über jeder Schweißgrube ist mindestens eine Absaugeleitung (Trichter) vorzusehen.

Abb. 319 gestattet den Einblick in einen Teil einer Warmschweißerei. Das gerade in Arbeit befindliche Werkstück (Maschinenständer) ist hier allerdings nicht in einer Schweißgrube, sondern auf der Werkstatthalle in einem Eisenkasten eingeformt. Man erkennt deutlich das bewegliche Abzugsrohr und die darunter sich bildenden Gase. Die beiden die Arbeit ausführenden Schweißer sind vorschriftsmäßig gekleidet; sie tragen Asbestschürzen und -handschuhe und klappbare Lichtschutzhelme mit Lederschutz. Beide wechseln sich von Zeit zu Zeit ab; der linke Mann ist in Bereitschaft, die Schweißzange mit der eingespann-

ten Gußelektrode in der Hand. Arbeitsunterbrechungen dürfen nicht stattfinden.

Weiter gehören noch zur Einrichtung der Warmschweißerei: Formsand, Asche, Holzkohle, Koks, Sand, Blechtafeln, Schamottesteine, Asbestplatten, Formplatten usw. Zur Bearbeitung der Bruchstellen für das Schweißen sind möglichst Druckluftmeißel zu verwenden.

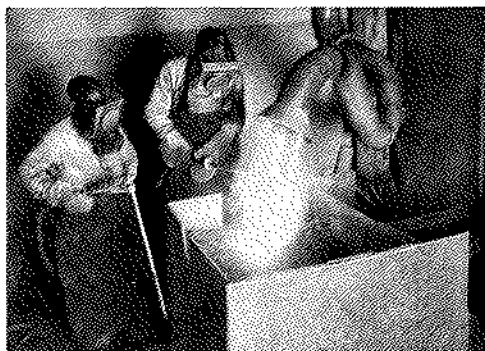


Abb. 310. Elektrische Warmschweißung eines Maschinenständers.

Vorbereitung der Bruchränder. Die für die Kaltschweißung gebräuchlichen Schweißmulden sind für die Warmschweißung selten ausreichend, vielmehr muß hier für möglichst große Öffnung der Schweißstelle gesorgt werden, damit der immerhin dicke Schweißstab gut bewegt werden kann und der Lichtbogen an den Bruchrändern genügend Angriffsflächen findet. Die Bruchränder werden entweder mit Druckluftmeißeln

oder durch Abbohren künstlich erweitert. Zwar kann die Schweißfuge mitunter auch mit der Kohlelektrode eingeschmolzen werden, doch ist diese Art der Vorbereitung des Schweißbettes nicht immer empfehlenswert, weil, wenn sie im kalten Zustande des Werkstücks erfolgt, infolge von Spannungen unter Umständen neue Risse und Brüche auftreten können. Ein Verstiften der Bruchränder und die Anwendung ähnlicher Festigkeitsträger gibt es beim Warmschweißen nicht. Dagegen ist es häufig angebracht, größere Bruchstücke, die an das Werkstück wieder mit anzuschweißen sind, vor dem Einformen durch eiserne Halterungen, wie Laschen, Schienen, Winkel usw., zu befestigen.

Einformen des Schweißguts. Beim Warmschweißen handelt es sich tatsächlich um ein Kleingießverfahren, denn es werden nicht nur kleine, unmittelbar unter der Flamme gelegene Stellen flüssig, wie beim Kalt- und Gasschweißen, sondern größere Flächen des Werkstücks. Der Umfang des flüssig werdenden Stücks ist abhängig von der aufgewandten Schweißstromstärke und wächst mit dieser. Damit das flüssige Gußeisen nicht aus dem Schmelzbad abfließen kann, ist eine Einformung des Werkstücks, zumindest jedoch der Schweißfugenränder erforderlich. Die Einformung muß von Fall zu Fall der Erfahrung des Schweißers oder seines Vorgesetzten überlassen bleiben und ist übrigens auch abhängig von den örtlichen Verhältnissen und der Einrichtung der Schweißerei. Gerade die erforderlichen Formarbeiten stellen hohe Anforderungen an das Geschick und die Erfahrungen des Warmschweißers. Seine Schweißergebnisse werden um so besser sein, je mehr er sich in der Kunst sachgemäßen und zweckentsprechenden Formens zurechtfindet. Nicht allein auf eine gute Schweißung als solche ist Wert zu legen, sondern auch darauf, mit Rücksicht auf Strom- und Werkstoffvergeudung unnötig große Angüsse zu vermeiden.

Sind nur Sprünge (Risse) in dem zu schweißenden Gußkörper vorhanden, so genügt meist die Einbettung in den Einformboden (die Sohle) der Schweißerei, wie dies in Abb. 320 dargestellt ist. Die Gußstücke werden ganz in Sand eingefornt und nur die Schweißstelle, die immer nach oben und möglichst waagerecht zu liegen hat, wird frei gelassen. Eine Gruppe auf diese Weise eingefornter und zur Schweißung vorbereiteter Gußstücke ist aus Abb. 321 zu ersehen. Sind die

Bruchstücke der Gußkörper vorhanden und genügend groß, so daß sie beim Schweißen nicht vollkommen verflüssigt werden, so werden diese Bruchstücke nach entsprechender Vorbereitung wieder verwendet und mit eingeformt. Wenn die abgebrochenen Stücke jedoch zu klein, zu oft unterteilt oder in Verlust geraten sind, dann werden sie durch Einschmelzen neuen Gusses völlig ersetzt.

Wichtig ist auch die Rücksichtnahme auf den Abzug der beim Schweißen gebildeten Gase. Wenn die Gase im Schweißgut keine ausreichende Abzugsmöglichkeit haben, bilden sich in der Schweißnaht allein Poren und Blasen, sondern von unten nach oben verlaufende (senkrechte) röhrenartige Kanäle, welche die ganze Schweißstelle durchsetzen und außer zu Undichtigkeiten noch zur Verringerung der Festigkeit führen. Um die Gase leicht entweichen zu lassen, bedarf es nur einer Maßnahme: Erweiterung der Bruchstelle nach oben. Diese winklige Erweiterung der Bruchstelle hat noch den Vorteil, daß die Stabelektrode leichter bis zum Grunde der Schmelzstelle gelangen kann, ohne den magnetischen Wirkungen der Bruchränder ausgesetzt zu sein oder an diesen Kurzschluß (Lichtbogenbildung) zu verursachen.

Das Werkstück wird an der Schweißstelle mit einem nach oben offenen Formkasten umgeben, der mit Formsand ausgefüllt wird. Die Beschaffenheit des Formkastens richtet sich danach, ob über oder unter der Werkstättensohle geschweißt werden soll. Schwere Gußstücke mit größeren Bruch- beziehentlich Schweißflächen

worden vorteilhaft in den bereits beschriebenen Schweißgruben eingeformt, kleinere in der Werkstatthalle selbst oder über dieser in hohen Formkästen (Blechkästen), wie dies schon Abb. 319 zeigte. Die Sandhaltebleche, wie man die Formkästen besser bezeichnen sollte, werden aus 2...5 mm Stahlblechen hergestellt und in erforderlicher Größe und Entfernung um die Schweißstelle herumgestellt. Die Befestigung der Bleche miteinander erfolgt durch Klammern, Spannriegel u. dgl. Mitunter erübrigt sich die Anwendung von Sandhalteblechen auch ganz. In Abb. 320 und 322 ist die Einformung des Schweißguts ohne, in Abb. 323 mit Formkästen dargestellt.

Die Schweißstelle selbst wird zunächst mit einem besonderen Formstoff, sog.

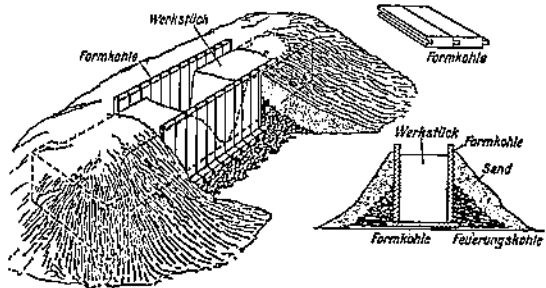


Abb. 320. Vorbereitung zur elektrischen Wärmeschweißung.

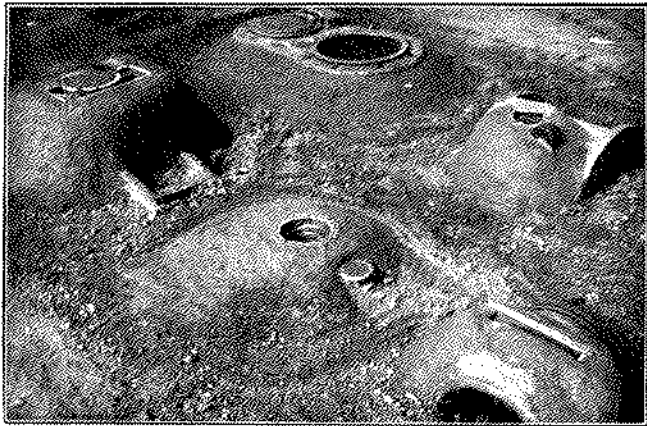


Abb. 321. Zur Wärmeschweißung vorbereitete Gußstücke.

Retortenkoksplatten, umgeben. Die Formkohlen sind in verschiedenen Abmessungen und Dicken, auf Wunsch auch mit Nut und Feder erhältlich, wie dies schon Abb. 320 rechts oben zeigt. Sie lassen sich sehr gut feilen; man kann ihnen daher jede, dem Zwecke gerade am besten entsprechende Form geben. Bei vorsichtigem Umgang mit den Koksplatten sind sie wiederholt benutzbar. Die Schweißstelle ist derart mit Formplatten einzufassen, daß diese ringsum die Schweißstelle um etwa 20...50 mm überragen (Abb. 320, 322 und 323), damit während des Schweißvorgangs kein flüssiges Eisen aus dem Schmelzbad ab-

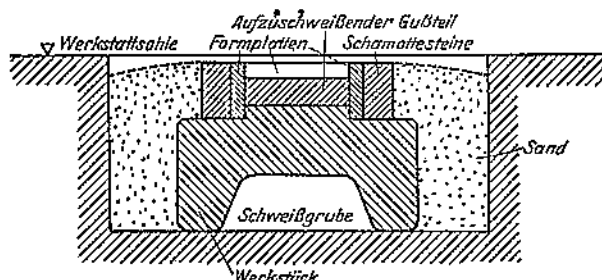


Abb. 322. Einformung eines Warmschweißstücks ohne Formkasten.

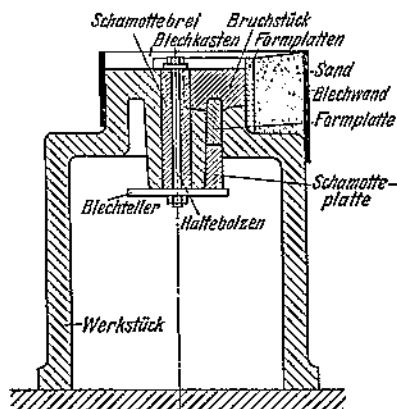


Abb. 323. Einformung eines Warmschweißstücks im Formkasten.

fließen kann und die Schweiße für die darauffolgende Bearbeitung genügend dick wird. Auf das Maß, um welches die Formplatten über die Bruchränder vorstehen, kommt es im allgemeinen nicht sehr an, da der Schweißer es in der Hand hat, die

Form mehr oder weniger hoch auszufüllen. Der Zwischenraum zwischen den Platten und den Sandhalteblechen wird dann vorsichtig mit Formsand ausgefüllt und dieser festgestampft, so daß eine zur Vorwärmung fertige, allseitig elektrisch leitende Gußform entsteht. In Abb. 324 ist eine geschweißte, unbearbeitete Platte eines Pressentisches zu erkennen, die noch deutlich die Abdrücke der Kohlenplatten zeigt, welche zur Einformung dienten.

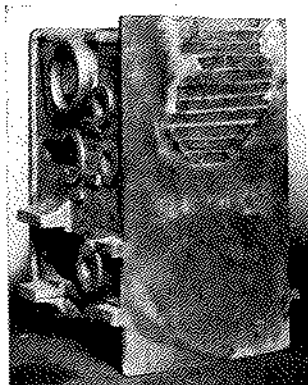


Abb. 324. Warmschweißung eines Pressentisches.

Wichtig ist es, die Einformung des Werkstücks so vorzunehmen, daß die gesamte Schweißfläche von einer Seite (von oben) aus zugänglich ist. Verboten sind formtechnische oder sonstige Gründe, dann muß man nach Fertigstellung der ersten Teilarbeit neuerlich einformen und den restlichen Teil schweißen. Dadurch kann allerdings die Fertigstellung der Gesamtarbeit viele Tage länger

dauern, womit die Wichtigkeit wohlüberlegter Einformung besonders hervortritt.

Handelt es sich um breite Grundflächen der Schmelzformen und um große Mengen niederzuschmelzenden Gußeisens, so kann die Schweißung oft selbst bei großer Stromstärke und dicken Elektroden nicht in ununterbrochenem Zuge durchgeführt werden. Vielmehr wird, aus später zu erörternden Gründen, eine besondere Arbeitsweise notwendig: die Schweißstelle muß in kleine Kammern unterteilt werden, indem man im Sinne der Abb. 325 verfährt. Eine der er-

forderlichen Unterteilung entsprechende Anzahl Formplatten wird als Querwände *a* eingebaut und jedes zweite der hierdurch gebildeten Kästchen *b* mit Sand ausgefüllt; die übrigen (*c*) bleiben offen und werden zuerst mit dem Elektrodenwerkstoff angefüllt. Darauf werden die Formstege *a* und der Sand sauber entfernt und die entstehenden Hohlräume *b* ebenfalls mit Gußeisen ausgefüllt.

Vorwärmung. Der Wärmezustand des Gußkörpers ist für den Erfolg der Schweißung in hohem Maße ausschlaggebend. Die im Gußstück vorhandenen und während des Schweißens hinzukommenden Spannungen gehen verloren, sobald das Werkstück rotwarm wird. Auch um gleichmäßige Ausdehnung zu erzielen und ein Verziehen zu verhüten, muß für eine gute, gleichmäßige Durchwärmung des Gußkörpers gesorgt werden. Durch längeres Flüssighalten der Schweiße wird überdies eine innigere Mischung zwischen Füllstoff und Grundmetall herbeigeführt, die Kohlenstoffausscheidung (Graphitbildung) begünstigt und damit die Schweiße weich erhalten.

Alle diese Gründe, zuvorderst aber die Ausschaltung der Werkstoffspannungen, bedingen gleichmäßiges und allmählich zunehmendes Vorwärmen auf Rotglut (etwa 700°). Der eingeformte und zur Schweißung vorbereitete Gußkörper wird dazu am besten in die Schweißgrube eingesetzt; die Formen werden mit Asbestplatten gut abgedeckt, das Ganze wird mit Holzkohlenfeuer umgeben. Die Anwärmung durch ein Koksfeuer ist weniger angebracht, da sie bei nicht genügend sorgsamer Überwachung zu An- und Abschmelzungen vorstehender Gußteile führen kann, besonders wenn das Feuer durch Unterwindgebläse betrieben wird. Die Vorwärmung im Holzkohlenfeuer nimmt je nach Masse des Schweißguts 2...10 h in Anspruch. Am besten wird über Nacht geheizt, so daß am darauffolgenden Morgen mit der eigentlichen Schweißarbeit begonnen werden kann.

Ausführung der Schweißarbeit. Im allgemeinen bedingt die Gußwärmeschweißung den Aufwand bedeutender elektrischer Leistungen. Die Schweißstromstärke bewegt sich in den Grenzen zwischen mindestens 300 und höchstens 1500 A, die Betriebsspannung zwischen 40 und 70 V (Leerlaufspannung 90...110 V); normal ist eine Schweißstromstärke von 400...600 A gebräuchlich. Sie muß stets so hoch gehalten werden, daß das Schweißbad gut flüssig bleibt. Zu geringe Stromstärken ergeben harte Schweißstellen. Als Füllstäbe werden gußeiserne, stark siliziumhaltige Elektroden von 8...20 mm Durchmesser verwendet, die entweder nackt oder überzogen sind. Im ersten Falle wird dem eingeschmolzenen Werkstoff ein schlackenbildendes Schweißpulver unmittelbar zugesetzt, während sich dies beim Schweißen mit ummantelten Elektroden erübrigt. Das Werkstück liegt am Pluspol und der Schweißstab am Minuspol. Als Werkstoff, der sich gut zum Schweißen eignet, ist ein Gußeisen zu bezeichnen mit 3...3,5 vH Kohlenstoff, 0,5...0,7 vH Mangan, 3...3,5 vH Silizium (bis 0,8 vH Phosphor und bis 0,08 vH Schwefel).

Während der Ausführung der Schweißarbeit verbleibt der Gußkörper in der Schweißgrube bzw. im Feuer; nur die Schweißstelle wird aufgedeckt und sauber von Kohlenstaub, Asche u. dgl. ausgeblasen. Um den Schweißer nicht unmittelbar

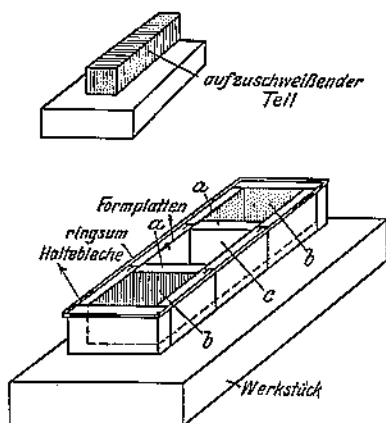


Abb. 325. Unterteilung der Schweißstelle in Kammern.

der großen Wärmestrahlung des Schweißstücks auszusetzen, wird dieses, soweit es möglich, mit Stahlblechen und darübergelegten Asbestplatten ringsum abgedeckt, so daß nur die Schweißstelle frei liegt. Die Schweißung schwerer Werkstücke erfordert die wechselweise Ablösung zweier oder mehrerer Schweißer; die Leute würden sonst zu sehr ermüden, was die Güte der Schweißung stark beeinträchtigt. Deshalb werden an den Minuspol zwei oder mehr Kabel mit Schweißkolben angeklemt, wovon nur immer einer im Betriebe steht, während sich die anderen in Bereitschaft befinden (Abb. 319).

Eine gute Schweißung setzt voraus, daß das von der Elektrode abfließende Gußeisen auf flüssiges, zumindest aber bis kurz vor den Verflüssigungsgrad erhitztes Grundmetall aufgeschmolzen wird, wenn rasches Abschrecken des Elektrodenwerkstoffs und Hartwerden der Schweißstelle vermieden werden soll. Aus diesem Grunde hat sich der Schweißer vor Beginn seiner Arbeit vom ausreichenden Wärmezustande des Werkstücks durch Verwendung von Tasthaken zu überzeugen und, um Wärmeverluste des Werkstücks zu verhüten, die Schweißung so rasch durchzuführen, wie die Verhältnisse es gestatten. Der ziemlich umfangreiche Lichtbogen bringt sowohl das Ende der Elektrode als auch die Bruchränder der Schweißstelle fast gleichzeitig zum Fließen, und das abfließende Gußeisen füllt die Schweißform allmählich aus. Auf diese Weise können Gußmengen von 2...25 kg/h niedergeschmolzen werden, wobei die Niederschlagsmenge sich natürlich nach der Stromstärke und dem Stabdurchmesser richtet. Für die eben angegebenen Mengen sind Elektroden von 8...15 mm Durchmesser und eine Schweißstromstärke von 300...600 A angenommen.

Da das Ausgießen größerer Formen mit den Elektroden allein zu langsam geht, greift man häufig zu einem einfachen Mittel, um den Schweißvorgang zu beschleunigen. Sobald ein genügender Schmelzfluß vorhanden ist, wirft man kleine Gußstückchen (Abfälle von Elektroden u. dgl.), vorteilhaft auch etwas Schweißpulver in das Schmelzbad hinein und schmilzt alles mit dem übrigen Werkstoff zusammen. Bei zu großer Ausdehnung der Schweißfläche läuft man Gefahr, daß dauernd Teile des eingeschmolzenen Eisens auf noch kalte oder unzureichend erhitzte Teile des Grundmetalls auffließen, ohne sich mit diesen zu verbinden, da der Lichtbogen ja nur eine bestimmte, begrenzte Fläche der Gesamtschweißfläche gleichmäßig auf Schmelztemperatur erhalten kann. Deswegen geht man bei großflächigen Schweißen dazu über, diese in eine Reihe von Kammern zu unterteilen (Abb. 325); der Lichtbogen ist dann in der Lage, die Schweißfläche gut flüssig zu erhalten und eine gleichmäßige Verbindung des niedergeschmolzenen Gußeisens mit dem Grundwerkstoff herzustellen. Nach Abschmelzung jeder Elektrode wird die Oberfläche des Schmelzbads gründlich von Schlacke und Schmutz (durch Kratzen u. ä.) gereinigt.

Nachwärmung. Ist die Form ausgefüllt und die Schweißung beendet, d. h. die Schmelze erstarrt, so wird die Schweiße mit Holzkohlenstaub, Asche oder Sand abgedeckt und die ganze Schweißgrube mit Sand verschüttet. Wenn das Feuer inzwischen zu weit niedergebrannt ist, wird die Schweißstelle nochmals mit Feuer umgeben. Für recht langsames Abkühlen des geschweißten Körpers ist Sorge zu tragen, wobei sich die Geschwindigkeit des Erkalten in einfacher Weise durch das Nachwärmefeuern regeln läßt. Die Dauer der Abkühlung richtet sich naturgemäß nach der Masse des Gußstücks und kann in besonderen Fällen 8 Tage und mehr in Anspruch nehmen.

Beispiele ausgeführter Arbeiten. Um den Werdegang einer Warmschweißung verfolgen zu können, sind einige Abbildungen (Abb. 326...329) von Werkstücken wiedergegeben, die durch elektrische Warmschweißung ausgebessert wurden.

Abb. 326 zeigt einen Ständer (Königsstuhl), dessen etwa 60 mm dicke Platte in mehrere Stücke zerbrochen ist. Der Gußkörper wurde so eingeformt, daß seine Säule in der Schweißgrube nach unten, die Platte mit den Schweißstellen nach oben und waagrecht zu liegen kam, wie dies aus der Abbildung ersichtlich ist. Sie führt das fertig eingeformte, an den Bruchrändern auf etwas über Werkstoffdicke ausgearbeitete Gußstück vor Augen. Das Schweißergebnis (Abb. 327) zeigt sieben unbearbeitete Schweißnähte. Ob sich eine so umfangreiche Schweißung an einem verhältnismäßig einfachen Stück, wie es das vorliegende darstellt, immer verlohnt, ist mehr eine Frage des Zeitverlustes bei Neuguß, da die Kosten der Schweißung hier die des Neugusses wohl übertreffen dürften.

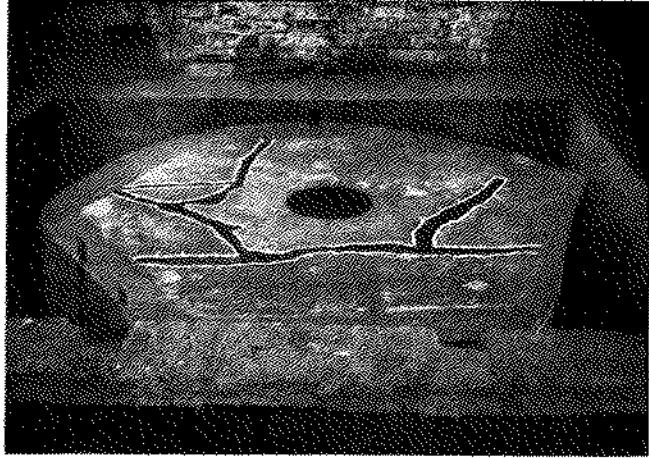


Abb. 326. Zur Warmschweißung vorbereitete Ständerplatte.

Abb. 328 zeigt einen am Schieberkasten stark beschädigten Lokomotivzylinder im für die Schweißung teilweise vorbereiteten Zustande, äußerlich jedoch nicht eingeformt. Das Zylinderinnere ist in bekannter Weise mit einem Formplattenkern ausgelegt. Nach der Schweißung hatte der Zylinder das Aussehen der Abb. 329. Der eingeschweißte Teil ist durch Umränderung mit Kreide leichter sichtbar gemacht.

Halbwarmschweißung. Sie unterscheidet sich von der Warmschweißung lediglich in der Art der Vorwärmung und soll nur der Vollständigkeit halber Erwähnung finden. Die Vorwärmung wird bis zu etwa 250° getrieben. Vorbereitung und Einformung bleiben dieselben, während das zu schweißende Werkstück jedoch nicht ganz, sondern durch örtliches Aufbringen von Holzkohlenfeuer nur an der Schweißstelle auf vorerwähnte Temperatur angeheizt wird. Dabei ist auf gutes Austrocknen der Form zu achten. Der Verlauf der Schweißung ist im übrigen derselbe wie beim Warmschweißen; es wird mit denselben Stromstärken und Spannungen gearbeitet, und die gleichen Elektrodenstäbe werden eingeschmolzen.

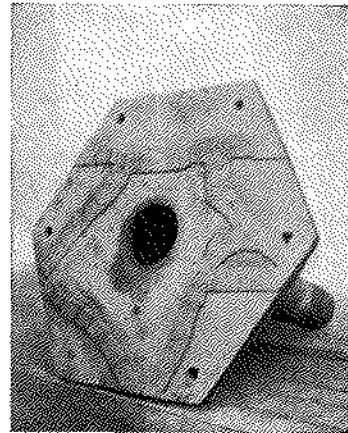


Abb. 327. Ständerplatte nach der Schweißung.

Halbwarm geschweißt werden vor allem verhältnismäßig kleine Werkstücke, an denen größere Mengen Gußeisen niedergeschmolzen werden müssen und bei welchen auf Grund ihrer Formgestaltung Gefahren infolge von Spannungserscheinungen nicht zu gewärtigen sind. Die Ausbesserungen erstrecken sich daher meist

auf freiliegende und vorstehende Ecken, Kanten oder sonstige Teile eines Werkstücks.

Temperguß. Seine Schweißung verursacht oft große Schwierigkeiten. Ganz allgemein gilt, daß die Schweißbarkeit dieses Werkstoffs mit dem Grade seiner Schmiedbarkeit zunimmt. Liegen die Bestandteile Silizium, Schwefel und Phosphor

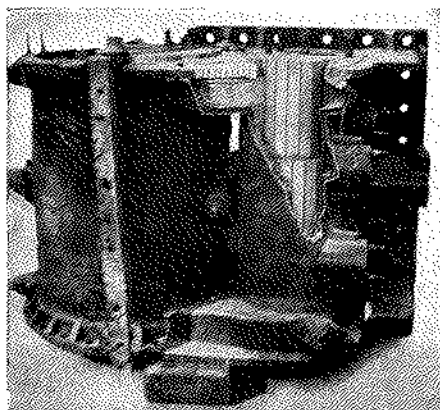


Abb. 328. Lokomotivzylinder vor der Schweißung.

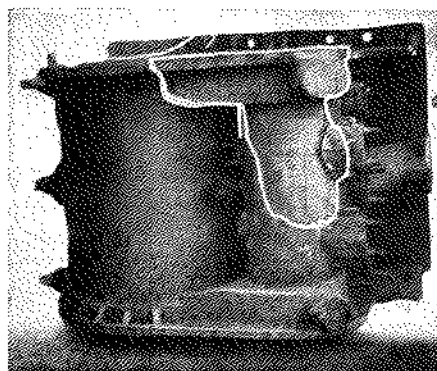


Abb. 329. Lokomotivzylinder (Abb. 328) nach der Schweißung.

in normalen Grenzen, und ist der Guß gut entkohlt, dann kann er mit normalen Stahlelektroden geschweißt werden. Das gilt auch für Temperguß mit dunklem Kern (Schwarzherzguß), wenn die Schweißstelle ausschließlich im Gebiet einer gut entkohlten Randzone liegt und eine Rückkohlung vom Kerninnern nicht zu erwarten ist. Andernfalls tritt reichliche Bildung von Zementit und Blasen- und Porenbildung auf, die eine Schweißung mit Stahl unmöglich machen. Für schwarzen Temperguß gilt dies fast immer, da ein Inlösengehen des Kohlenstoffs nicht zu vermeiden ist. In Zweifelsfällen entscheidet ein Schmelzversuch; fällt er ungünstig aus, so ist Hartlötung dem Schweißen stets vorzuziehen.

8. Die Schweißung der Nichteisenmetalle.

Allgemeines. Die Schweißung der Nichteisenmetalle (NE-Metalle) ist auch heute noch weniger ein Arbeitsgebiet der Lichtbogen- als der Gasschweißung, wenn auch in letzter Zeit die elektrische Schweißung recht gute Fortschritte zu verzeichnen hat. Einige schweißtechnisch unliebsame Eigenschaften mancher NE-Metalle und ihrer Legierungen erschweren die elektrische Schweißung beträchtlich. Es sind dies u. a.: hohes Wärmeleitvermögen, Wärmeempfindlichkeit, hohe Oxydierbarkeit und leichte Vergasbarkeit.

Die ersten Versuche, NE-Metalle mit dem Kohle- oder Metalllichtbogen zu schweißen¹, ergaben scheinbar unlösbare Schwierigkeiten, weniger wegen der technischen Durchführbarkeit als wegen der ungenügenden Güteverhältnisse der Schweiße. Da anfänglich die NE-Metallschweißung mit Metallelektroden nicht nur metallurgisch, sondern auch schweißtechnisch fehlschlug, nahm man den Kohlelichtbogen zu Hilfe. Die Schweißung mit diesem ist ähnlich der Gasschweißung. Der Lichtbogen wärmt zu Beginn den Nahtanfang vor, schmilzt

¹ Horn-Liedloff: Die Lichtbogenschweißung von NE-Metallen. TZ 1933 Heft 10/11.

dann die Werkstoffkanten an und den Zusatzstab ein. Infolge der Leichtflüssigkeit der meisten NE-Metalle bedient man sich, um das Durchsacken der Schweiße zu vermeiden, oft geeigneter Unterlagen, wie Platten aus Eisen, Kupfer, Formkohle, Asbest usw. Um Metalloxyde zu lösen und sie zu einer Schlacke zu binden, sowie die Bildung neuer Oxyde möglichst zu verhindern, verwendet man Flußmittel oder Schweißpulver von derselben Zusammensetzung wie bei der Gasschweißung. Auch als Zusatzdrähte benutzt man — von einigen Ausnahmen abgesehen — die gleichen wie beim Gasschweißen. Wesentlich bessere Erfolge werden neuerdings mit Metallelektroden erzielt, die im einzelnen nachstehend besprochen werden sollen. Der Kohlelichtbogen hat damit auch auf diesem Gebiete seine Rolle ausgespielt und kommt nur noch für die Bleischweißung, und auch da nur in sehr beschränktem Umfange in Frage.

Die Tatsache, daß NE-Metallelektroden mit dem Pluspol zu verschweißen sind, wurde schon lange vor den Untersuchungen über die Physik des Lichtbogens und unabhängig von diesen erkannt. Man beobachtet vielfach einen sehr unregelmäßigen großtropfigen Übergang des Elektrodenwerkstoffs im Lichtbogen und ein häufig starkes Verspritzen der Elektroden seitlich der Naht. Zu Beginn der Naht binden die Raupen manchmal schlecht ab, und erst nach hinreichender Vorwärmung des Stückes kommt man oft zu ungleichmäßigen, nicht selten porigen Schuppenketten von meist wechselnder Breite und Überhöhung.

a) Kupfer und seine Legierungen.

Kohlelichtbogen-Schweißung von Kupfer. Der Kohlelichtbogen wird für die Kupferschweißung nur noch wenig benutzt, z. B. zur Bördelschweißung an dünnen Blechen. Infolge seines großen Wärmeleitvermögens (etwa 6mal so groß wie beim Eisen) erfordert das Kupfer trotz seines verhältnismäßig niedrigen Schmelzpunktes (1083° für Reinkupfer) eine bedeutende Wärmezufuhr, um eine örtliche Schmelzung einzuleiten. Bei Verwendung des Kohlelichtbogens ist genügende Wärmezufuhr und Verflüssigung des Werkstücks, bevor mit dem Zusatz von Draht begonnen wird, zwar ohne weiteres möglich, doch besteht dabei die Gefahr, daß bei zu hoher Stromstärke oder bei zu langem Verweilen des Lichtbogens an einer Stelle, also bei zu langsamem Schweißen, die Kupferschmelze überhitzt bzw. verbrannt wird. Die Wahl der Stromstärke ist so zu treffen, daß die Schmelzzone möglichst nicht breiter wird als die doppelte Blechdicke. Für Blechdicken zwischen 2 und 15 mm bewegen sich die Schweißstromstärken zwischen 80 und 300 A, die Spannungen zwischen 35 und 50 V und die Kohledurchmesser zwischen 12 und 25 mm bei gewöhnlicher und 8 und 16 mm bei Graphitkohle.

An vorbereitenden Maßnahmen kommen für dünne Bleche nur Unterlagen in Frage, da ein π -Stoß mit einem Kantenabstand von einem Viertel der Blechdicke ausreicht. Von 6 mm Blechdicke aufwärts muß zur V-Schweißung übergegangen werden. Da stehende Nähte infolge Abfließens der Schweiße äußerst schwierig, deshalb praktisch so gut wie nicht ausführbar sind, kann nur in waagerechter oder leicht ansteigender Ebene gearbeitet werden. X-Schweißungen an längeren Nähten, bei denen ein Schweißen der Gegenseite nach Wenden des Stückes stattfinden würde, schließen sich von selbst aus, da Nachschweißungen ein Aufreißen der zuerst gelegten Naht zur Folge haben. Ausnahmen bilden nur kurze Nahtlängen, bei denen das Stück dauernd in Rotglut bleibt. Daraus folgt, daß alle Nähte in einem Zuge bis oben aufgefüllt werden müssen und Mehrlagenschweißungen nicht vorgenommen werden können. Kehlschweißungen bieten insofern Schwierigkeiten, als infolge der Leichtflüssigkeit ein Absacken der Schweiße

eintritt. Dickere Hohlkehlnähte sind im allgemeinen nur dann möglich, wenn der Körper so gedreht werden kann, daß die Hohlkehle zur waagerechten V-Fuge wird. Unter dieser Voraussetzung ist ihre Anordnung bei Konstruktionen infolge des Fortfalls von Unterlagen zwar vorteilhaft, doch wird man sie im Kupferapparatebau weniger antreffen.

Neben der Beschränkung der Lage der Schweißnähte ist an schweißtechnischen Schwierigkeiten nur noch das Tanzen und Abirren des Kohlelichtbogens zu erwähnen, das bei gut angespitzter Kohle und nicht zu ausgedehntem Schmelzbade nachläßt. Daher sind Schweißnähte mit formenschönen Schuppenketten nicht zu erreichen. Gasporen und kleine Vertiefungen an der Oberfläche, in denen sich Flußmittelreste festsetzen, werden nach deren Beseitigung sichtbar. Erst durch nicht zu kräftiges Hämmern der Nahtüberhöhung kann ein hinreichender Ausgleich der unschönen Oberfläche geschaffen werden. Das Aussehen einer nichtgehämmerten Naht an 10 mm dickem Kupferblech, dessen Oberfläche von Schlackenresten befreit ist, zeigt Abb. 330.



Abb. 330. Mit dem Kohlelichtbogen geschweißtes Kupferblech.

Die jeden Kohlelichtbogen umgebende Aureole von verbrennenden Kohleteilchen kann den Einfluß des Luftsauerstoffs nicht hinreichend abhalten; man muß deshalb immer zu einem Flußmittel greifen, das die Schweiße und deren erhitzte Nachbarzonen schützend bedeckt. Auch bei reichlicher Zugabe von Flußmitteln läßt sich eine merkliche Aufnahme von Sauerstoff nicht unterbinden. Er ist im

mikroskopischen Ätzbild, immer in Form von Kupferoxydul, anzutreffen. Abb. 331 zeigt das Makroschliffbild einer 10 mm-Kupferblechschweiße mit starker Einstrahlung. Die Anordnung der groben Kristalle steht in Richtung des Wärmefflusses senkrecht zu den Fugenrändern und zur Blechoberfläche. Die nur 100 mm lange Naht gestattete eine doppelseitige Schweißung.



Abb. 331. Querschnitt einer Kohlebogen-Kupfer-Schweißnaht (Schliffbild).

Die in der Kupferschweiße anzutreffenden Gasporen entstehen bei der Reduktion des Kupferoxyduls durch Kohlenstoffteilchen der Elektrode. Es bilden sich dann Kohlenoxyd und Kohlensäure, die nicht mehr an die Oberfläche des Schmelzbades gelangen können, bevor dieses erstarrt. Weder das Oxydul noch die Gasblasen lassen sich durch Nachbehandlung beseitigen; lediglich ist durch Glühen und Hämmern eine Verfeinerung der Grobstruktur erreichbar, wodurch die Festigkeit gesteigert wird.

Metalllichtbogen-Schweißung von Kupfer. Ebensovienig wie die Kohleschweißung, befriedigt die Schweißung von Kupfer mit gewöhnlichen Kupferelektroden, weil ein genügend großes Schmelzbade und eine gute Bindung ohne reichliche Vorwärmung mit fremden Mitteln und ohne erhebliche Verbrennungsgefahr nicht möglich ist. Vorwärmung mit dem Kohlebogen hat meist Brandfleckbildung an der Oberfläche zur Folge. Den Schwierigkeiten wäre notfalls dadurch zu begegnen, daß man zu einem der Lötung ähnlichen Verfahren übergeht und an Stelle der

Kupferelektrode eine solche aus Bronze verwendet, was aber keineswegs dem heutigen Stande der Schweißtechnik entspricht. Auch die später noch zu besprechende Arcatomschweißung ist in Anbetracht der erhöhten Gefahr einer Wasserstoffaufnahme für Kupfer weniger gut geeignet.

Ein grundlegender Wandel wurde erst durch die Lösung der bis dahin unbeachtet gebliebenen Frage einer Spannungserhöhung im Lichtbogen geschaffen. Es entstand die Lesselsche Schlauchelektrode¹, deren Eigenart an Hand der Abb. 332 geschildert werden soll.

Lessel ging von der Erwägung aus, daß nicht mit zu hohen Stromstärken gearbeitet werden darf, wenn ein Verbrennen des Kupfers vermieden werden soll, sondern die Leistung des Lichtbogens durch Erhöhung der Spannung auf 60...70 V gesteigert und die Stromstärke normal gehalten werden muß. Durch willkürliche Änderung der Lichtbogenlänge hat der Schweißer ein Mittel an der Hand, die elektrische Leistung und damit die Wärmezufuhr so zu regeln und zu raffern, wie es der Wärmezustand des Werkstücks und die jeweiligen Verhältnisse im Schmelzbade verlangen. Auf Grund der durch den Lichtbogen unmittelbar zugeführten Wärmemenge (etwa 4mal so viel wie bei Stahl) bleibt ein gegebenenfalls zusätzliches Vorwärmen des Werkstücks auf den Nahtanfang dicker Bleche beschränkt. Da der Lichtbogen außerdem immer axial geformt und gelenkt wird, ist auch eine Senkrechtschweißung, z. B. beim Einschweißen von Stehbolzen in kupferne Feuerbuchsen, einwandfrei möglich. Die hohe Spannung und der lange Lichtbogen bedingten die Entwicklung einer neuartigen Elektrode, der sog. Schlauchelektrode, deren Kern *a* (Abb. 332) aus Kupfer besteht und die durch dreimaliges Tauchen in unter sich sehr verschiedene Umhüllungsmassen einen nur ihr eigentümlichen Werkstoffübergang durch den Lichtbogen ermöglicht. Das metallische Elektrodenende *f* schmilzt spitzkegig ab und geht nicht tropfenförmig, sondern in einem ununterbrochenen Faden *g* zum Werkstück über, wobei die als Schlackenbildner dienende Umhüllung *b* mit einem dem Kupfer ähnlichen Schmelzpunkt leicht flüssig verschlackt und mit dem flüssigen Metallfaden auf der Werkstoffoberfläche niedergeschlagen wird. Das Ende des durch drittes Tauchen entstandenen Mantels *d* bildet, da es infolge des höheren Schmelzpunkts dieser Schicht gegenüber der Metallspitze immer um etwa 10 mm vorsteht, den Schlauch, in dessen Mitte der Werkstoffübergang vonstatten geht. Das von der mittleren, also zweiten Tauchung *c* mit niedrigstem Schmelzpunkt herrührende und unter dem Einfluß der Lichtbogenwärme gebildete, vom Kupfer unlösliche und leichte Gas steht unter höherem Druck bei größerer Austrittsgeschwindigkeit und bildet im Ringkanal *e* einen schützenden Gasmantel um die Flüssigkeitssäule, den Lichtbogen formend und richtend. Der Lichtbogen *h* hat eine fast zylindrische, hohle Form, weshalb man auch von einem „Rohrlichtbogen“ sprechen kann.

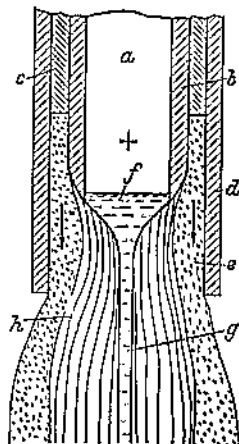


Abb. 332. Das Wesen der kupfernen Schlauchelektrode.

Die bisher von keinem anderen Schweißverfahren erreichten Festigkeitswerte dieser Kupferrohschweiße liegen bei 19...20 kg/mm² und können durch Hämmern in Rotwärme ohne Schwierigkeit auf volle 100 vH gebracht werden. Bei Ver-

Die bisher von keinem anderen Schweißverfahren erreichten Festigkeitswerte dieser Kupferrohschweiße liegen bei 19...20 kg/mm² und können durch Hämmern in Rotwärme ohne Schwierigkeit auf volle 100 vH gebracht werden. Bei Ver-

¹ W. Lessel: Die Schlauchelektrode zur Lichtbogenschweißung von Kupfer. Berlin: VDI-Verlag 1936.

bindungen, bei denen aus baulichen Gründen ein Hämmern nicht möglich ist, muß die hohe Festigkeit der Rohschweiße als ein wesentlicher Vorteil anerkannt werden.

Da das Verarbeiten der Schlauchelektrode viel Erfahrung und eine gute Übung des Schweißers voraussetzt, kann nur ein auf diesem Sondergebiet ausreichend

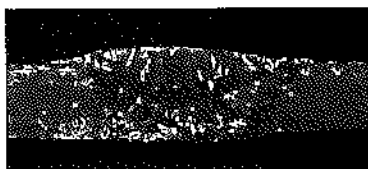


Abb. 333. Makroschliff einer mit der Schlauchelektrode hergestellten Kupferschweiße.



Abb. 334. Eingeschweißter kupferner Stehbolzen.

Geschulter erfolgreiche Schweißungen ausführen. Besonders dankbare Arbeitsgebiete hat sich das Verfahren erworben beim Schweißen von Rissen in kupfernen Feuerbüchsen, beim Einschweißen von Stehbolzen, im Behälterbau beim Schweißen von Kehlnähten und verschieden dicken Blechen untereinander. Als untere Grenze der Anwendbarkeit kann, abgesehen von der Verbindung kupferplattierter Bleche, eine Werkstoffdicke von 4...5 mm angenommen werden.

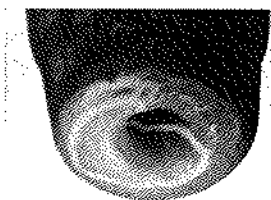


Abb. 335. Durch Schweißung ausgegebesserte Hochofenwinddüse.

Das Aussehen einer mit der Schlauchelektrode hergestellten Kupferschweißnaht unterscheidet sich äußerlich kaum von einer gasgeschweißten; gleichmäßig überhöhte und in gleicher Breite gehaltene Schuppenketten übertreffen die in Abb. 330 gezeigte Kohlenbognnaht weitaus an Sauberkeit und Regelmäßigkeit. Dem entspricht auch ein ungleich feinkörnigerer, poren- und schlackenfreier Gefügebau, wie ihn Abb. 333 zeigt. Sie gibt den Makroschliff einer 8 mm-Kupferschweißnaht wieder. Mit einer neuen Canzlerelektrode werden ähnliche Ergebnisse erzielt.

Bevorzugte Anwendung findet die Schlauchelektrode beim Einschweißen kupferner Stehbolzen in Lokomotivfeuerbüchsen. Abb. 334 gibt den Querschnitt einer solchen und ungehämmerten Schweiße (ungeätzt) wieder. Angeschmolzene Hochofenwinddüsen werden ebenfalls häufig mit der Schlauchelektrode ausgebessert (Abb. 335). Das untere Bild veranschaulicht die gehämmerte Auftragschweißung.

In diesem Zusammenhange sei erwähnt, daß man neuerdings solche Winddüsen nicht mehr gegossen, sondern aus Kupferpreßteilen zusammengeschweißt herstellt.

Messingschweißung. Da die Siedetemperatur von Zink sehr niedrig liegt, tritt auf Grund der großen Wärmewirkung des Lichtbogens eine so starke Verdampfung von Zink aus der Messingschmelze ein, daß porenfreie Schweißnähte auch bei überreichem Zusatz von Flußmitteln weder mit dem Kohle- noch mit Metalllichtbogen herzustellen sind. Die Nähte sind schwammig und praktisch

unbrauchbar. Die Praxis kann sich deshalb z. Z. der elektrischen Messingschweißung noch nicht bedienen. Erfolgversprechende Versuche sind im Gange. Demgegenüber bewährt sich die Arcatomschweißung, die ja dem Gasschweißen in ihren Eigenschaften sehr nahe kommt, gut (s. Abschnitt IV). Als Schweißdraht werden die gleichen Legierungen wie beim Gasschweißen, sog. Schweißbronzen (Sondermessing), wie Firinit, Canzlerdraht, Robusco, Flussit u. a., als Flußmittel ebensolche verwendet.

Die Zugfestigkeit arcatomgeschweißter Messingschweißen liegt auch bei nicht nachbehandelten Nähten zwischen 90...100 vH der des Mutterstoffs. Die Nähte sind poren- und schlackenfrei, feinkörnig und beliebig verformbar. Das Makroschliffbild einer arcatomgeschweißten Messingblechnaht (20 mm Blechdicke) zeigt Abb. 336.

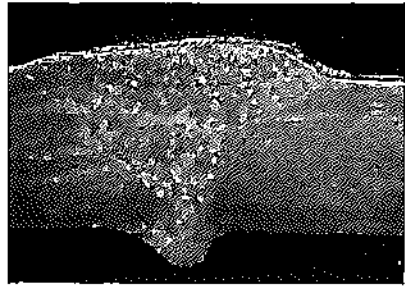


Abb. 336. Makroschliff einer Arcatom-Messingdickblechschweißnaht.

Bronzeschweißung. Nachdem man sich zunächst mit dem Kohlelichtbogen abgefunden hatte, wurde sehr bald die erste Bronzeelektrode entwickelt, die bereits befriedigende Ergebnisse zeitigte. Wenn auch heute noch nur einige Firmen sich mit der Herstellung solcher Elektroden befassen, so sind doch durchaus brauchbare Legierungen auf dem Markte. Die Stäbe sind entweder gegossen, sofern sie für die Ausbesserung von Bronze- und Messingguß verwendet werden sollen, oder es sind gezogene Drähte für Walzwerkstoff. Gegossene Stäbe sind immer ummantelt, gezogene, die heute meist auch für Gußbronze bevorzugt werden, können in vielen Fällen auch nackt verschweißt werden, wobei die Wirkung der vermeintlich immer notwendigen Umhüllungsmasse durch Bestreichen der Werkstoffkanten mit geeigneten Flußmitteln ersetzt werden kann.

Beim Schweißen von Walzbronze ist meist eine geringe Vorwärmung des Werkstücks auf etwa 200...300°, wenigstens zu Arbeitsbeginn anzuraten. Da der Werkstoff in mehr oder weniger großen Tropfen übergeht, ist eine tupfende Bewegung bei der Elektrodenführung günstig, und der Lichtbogen ist nur so lang zu halten, wie es die ungestörte Abwanderung dieser Tropfen zum Werkstück verlangt. Als Folge der großen Tropfenbildung tritt normalerweise eine etwas reichliche Überhöhung der an sich fehlerfreien Schweißnaht auf. Für die Höhe der Stromstärke, die etwa der für Stahl entspricht, ist vor allem die Masse des Werkstücks bestimmend. Dabei dürfen niedrigsiedende Legierungsbestandteile nicht durch Überhitzung verdampfen und keine Gasporen hinterlassen.

Bei Bronze- und Messingguß ist noch besonders zu beachten, daß er im erhitzten Zustande seine Festigkeit und Dehnung fast ganz einbüßt, weshalb Bronze- und Messingkörper vor Beginn der Anwärmung auf etwa 500° gut gelagert und unterbaut werden müssen, um das Absacken oder Abbrechen von Teilen zu verhüten. Da ferner beim Bronzeschweißen reichlich Gase und Dämpfe ausgeschieden werden, ist es ratsam, bei Arbeiten von längerer Dauer den Schweißer zum Tragen einer Atemschutzmaske (Respirator) anzuhalten.

Sowohl Verbindungs- als auch Auftragschweißungen in Bronze sind gleichermaßen gut durchführbar, allerdings wird man häufig geringe Unterschiede in der Farbtonung zwischen Werkstoff und Naht in Kauf nehmen müssen. Die in Abb. 337 wiedergegebene Bronzeleitplatte wurde durch Auftragen mit Bronze an den Laufkanten ausgebessert; die Nähte sind unbearbeitet. Die ebenfalls

durch Auftragsschweißung ausgebesserten Achslagerschalen (Lokomotivachsen) sind z. T. in der Rohschweiße (rechts), z. T. bearbeitet (links), in Abb. 338 dargestellt.

Neuerdings führen sich Aluminiumbronzen (DIN 1714) verschiedenster Zusammensetzung in größerem Umfang ein. Dabei handelt es sich um Kupferlegierungen mit bis zu 14 vH Aluminium (im allgemeinen nur mit bis zu 10 vH),

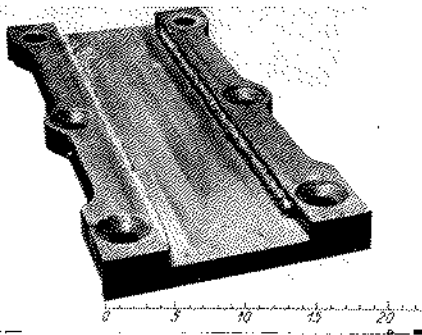


Abb. 337. Bronzene Gleitplatte, durch Schweißung ausgebessert.

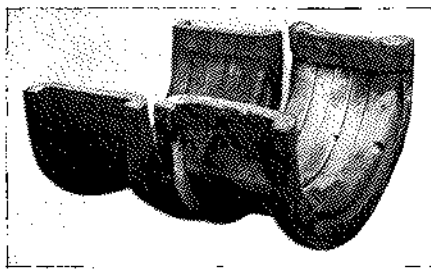


Abb. 338. Durch Schweißung ausgebesserte Bronzelagerschalen.

denen häufig Zuschläge von Eisen, Mangan, Nickel und anderen Elementen beigegeben sind. Legierungen mit geringerem Al-Gehalt (bis zu 7,5 vH) besitzen ein gleichmäßiges Gefüge und sind mit dem Metalllichtbogen z. T. gut schweißbar, solche mit höherem Al-Gehalt haben meist ein ungleichmäßigeres Gefüge und sind nur beschränkt schweißbar. Die Güte der Schweißung hängt ausschließlich von der Eignung der Elektrodenumhüllung ab. Nackte Elektroden sind nur bedingt verschweißbar, was auf Grund umfassender praktischer Untersuchungen eines der Verfasser mit Sicherheit behauptet werden kann. Ohne Flußmittel (in Form einer Elektrodenumhüllung), welche mit Tonerde, die sich als schwerfließende Oxydschicht reichlich bildet, energisch reagieren, ist eine einwandfreie, d. h. vor allem porenfreie Schweiße nicht zu erzielen. Die Flußmittel sind die gleichen wie für das Gasschweißen; sie bestehen meist aus Fluoriden, z. B. aus Mischungen von Bor- und Siliziumfluoriden, oder auch aus Natriumfluorid mit Zusätzen von Kryolith zur Erniedrigung des Schmelzpunktes, der möglichst um etwa 100°



Abb. 339. Makroschliff einer elektrischen Aluminium-bronzeschweiße.

tiefen liegen soll als der der Aluminiumbronze. Vorteilhaft ist eine Schweißstromstärke, die etwas höher liegt als beim Stahlschweißen. Rasches Arbeiten ist von Wichtigkeit.

Das Aussehen der Naht entspricht dem der gasgeschweißten, die Schuppenkette ist gleichmäßig und sauber. Auch die Festigkeit, die bis zu 90 vH des Mutterwerkstoffs erreichen kann,

ist befriedigend, ebenso das Ausmaß der Verformbarkeit (180° Biegewinkel). Abb. 339 veranschaulicht den geätzten Makroschliff einer nicht nachbehandelten Schweißnaht an 8 mm-Blech, mit einer dieser Legierung, wie den meisten NE-Metallen eigenen stengeligen Grobstruktur der Schweiße.

b) Nickel und seine Legierungen.

Nickel. Auch beim Schweißen von Reinnickel und hochnickelhaltigen Legierungen besteht besonders die Gefahr einer Überhitzung. Wie alle NE-Metalle werden auch diese mit dem Pluspol an der Elektrode und mit möglichst kurzem Lichtbogen geschweißt. Während dünne Nickelbleche (bis zu 4 mm) z. Z. noch gasgeschweißt werden, sind für dickeren Werkstoff recht gute umhüllte Elektroden im Handel, die ein einwandfreies und porenfreies Verschweißen ohne besondere Schwierigkeit gestatten. Wird mit dem Kohlelichtbogen gearbeitet, der sich hier sehr wenig eignet, so liegt die Kohle am Minuspol.

Monelmetall, ein aus Kupfer-Nickel-Erzen unmittelbar erschmolzenes Naturmetall, und das ihm ähnliche synthetisch hergestellte, heute kaum noch erhältliche Nicorros zeigen praktisch keine Unterschiede in der Schweißbarkeit. Um ein Verbrennen scharfer Blechkanten zu vermeiden, sind diese zum Schweißen so vorzubereiten, daß nur $\frac{3}{4} \cdots \frac{4}{6}$ der Blechdicke abgeschrägt wird und der Rest im Stumpf- (x-) Stoß verbleibt. Die Schweißung erfolgt abschnittsweise über den ganzen Querschnitt in einer Lage, da sonst Rißbildungen kaum vermeidbar sind. Die zwischen den einzelnen Abschnitten verbliebenen Zwischenräume werden in gleicher Weise in einer Lage ausgefüllt. Dünnere Bleche schweißt man in der für Stahl üblichen Art.

Während dünnere Monel- und Nicorrosbleche häufig auch mit nackten Elektroden geschweißt werden können, müssen zur Schweißung dickerer Bleche dieser Metalle sowie für Nickelbleche aller Dicken umhüllte Elektroden angewandt werden. Für Nickel und hochnickelhaltige Legierungen (mit mehr als 50 vH Nickel) haben sich neben einem 25proz. Titan-Kalzium-Gemisch, Mischungen aus Silizium-Mangan-Magnesium als Elektrodenüberzüge gut bewährt. Zum Beispiel ist ein Gemenge von 2 Teilen Desoxydationslegierung mit 2 Teilen Borax und 0,5 Teilen Graphit, wobei erstere aus 14...16 vH Magnesium, 27...33 vH Mangan und 45...50 vH Silizium besteht, als ein praktisch bewährtes Mittel für Elektrodenüberzüge anzusprechen.

Zu den heute meist verwendeten Legierungen mit einem Nickelgehalt unter 50 vH zählen die Kupfer-Nickel-Legierungen mit 20...30 vH Nickel, die das Reinnickel und die vorhin erwähnten Sonderlegierungen bezüglich ihrer Wärmeempfindlichkeit noch übertreffen. Bei diesen Legierungen entscheidet mehr der Gehalt an Kupfer als der an Nickel über die beim Schweißen zu treffenden Maßnahmen. Es muß hier mit verhältnismäßig geringen Stromstärken gearbeitet werden, so daß nicht selten eine Vorwärmung dickerer Werkstücke unvermeidlich ist. Als Elektrodenüberzug dienen die für die Schweißung des Kupfers und seiner Legierungen üblichen Mischungen.

c) Blei.

Blei, das, praktisch gesehen, weitaus am besten gasgeschweißt werden sollte, kann elektrisch nur mit dem Kohlelichtbogen oder arcatom-geschweißt werden. Die Stromstärken sind sehr gering; sie bewegen sich zwischen 10 und 50 A bei Blechdicken zwischen 2 und 10 mm. Die Spannung beträgt 18...32 V. Blei wird nur im I-Stoß verbunden, eine Abschrägung der Schweißkanten gibt es nicht. Außerdem ist es ohne geeignete Unterlagen (Stahlblech, Asbest) nicht schweißbar. Dickere Bleche (über 5 mm) läßt man um 2...3 mm auseinanderstehen. Als Zusatzstäbe verwendet man mit Schmirgelleinen gesäuberte Bleistreifen oder Bleidraht. Flußmittel sind nicht erforderlich. Das Tragen von Atmungsmasken, worüber früher bereits gesprochen wurde, ist Bedingung, da Bleidämpfe sehr giftig sind.

d) Aluminium und seine Legierungen.

Elektroden. Das Aluminium besitzt neben einem verhältnismäßig niedrigen Schmelzpunkt (658°) eine hohe Schmelzwärme und große Leit- und Oxydationsfähigkeit. Ein Fortschritt auf dem Gebiete der elektrischen Aluminiumschweißung war deshalb nur möglich, wenn durch geeignete Elektrodenumhüllungen eine Lösung von Oxyden (Schmelzpunkt etwa 2050°) und die Verhinderung ihrer Neubildung zu erzielen war, eine Aufgabe, die beim Gasschweißen von Aluminium seit vielen Jahren gelöst ist. Nachdem nun geeignete Umhüllungsmassen für Aluminiumelektroden gefunden wurden, kann die elektrische Schweißung von Aluminium heute ohne nennenswerte Schwierigkeiten durchgeführt werden. Die Kohlelichtbogenschweißung findet nur noch vereinzelt Anwendung, da die Schweißung durch Kohlenstoffabscheidung auf der Oberfläche des Schmelzbades stark behindert wird.

Die große Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums gestattete zunächst nicht die Einleitung des Schmelzvorgangs, ohne daß eine besondere Vorwärmung des Nahtanfangs vorausging. Gerade die Regelung des Wärmezustands des Werkstücks verursachte bedeutende Schwierigkeiten, die nach der Herstellung geeigneter Flußmittelüberzüge auf Aluminiumelektroden heute als überwunden angesehen werden können. Nur Bleche über 10 mm Dicke werden bei Arbeitsbeginn etwas vorgewärmt. Wenn außerdem der Einfluß des Luftsauerstoffs auf eine Reinaluminiumschmelze durch wirksame Flußmittel unterbunden wird, wie dies jetzt zutrifft, treten auch keine metallurgischen Schwierigkeiten mehr ein. Daraus ist die Folgerung zu ziehen, daß nackte Elektroden überhaupt nicht verschweißbar sind. Die Lösung der Oxyde geschieht ausnahmslos durch Umhüllungsmassen, die hauptsächlich aus Chloriden und Fluoriden des Aluminiums, der Alkali- und einiger Erdalkalimetalle bestehen. Man spricht deshalb bei Leichtmetall-Schweißstäben auch von Salzmantelelektroden.

Anforderungen an die Umhüllungsmasse. Abgesehen von rein äußerlichen Anforderungen hinsichtlich der Abmessungen (3...7 mm Dicke, seltener mehr), genügender Stoß- und Splitterfestigkeit usw., sind mannigfache Forderungen physikalischer und chemischer Natur zu erfüllen, die durch rein schweißtechnische Belange noch erweitert werden. So soll neben geringstmöglicher Feuchtigkeitseinführung und dem Fortfall starker und störender Vergasung der Salze der Bedingung nachgekommen werden, daß die Wichte (das spezifische Gewicht) der flüssigen Schlacke so weit unter der der Metallschmelze liegt, daß sie sich auf dieser absetzt und keinesfalls in ihr als Flußmittelrest verbleibt. Ferner muß der Schmelzpunkt des Salzmantelgemisches unterhalb des Schmelzpunkts des Leichtmetalls liegen und in diesem Temperaturbereich bereits aktiv wirksam sein, wobei außerdem noch eine reichliche Kraterbildung am Schmelzende des Stabes sehr erwünscht ist, um zu starkes Spritzen zu verhüten und um ein Richten des Lichtbogens sicherzustellen. Alle diese Forderungen entsprechen der hohen Bedeutung der Umhüllungsmasse für die Möglichkeit der Lichtbogenschweißung von Leichtmetallen überhaupt. Guteingeführt sind die „Veral“- und Fließelektroden.

Schweißvorgang. Vor Schweißbeginn sind die Blechkanten vorteilhaft sauber abzuschaben oder abzubürsten, fettige und ölige Stoffe sind restlos zu entfernen, da sie die Bindung der Schweiße sehr ungünstig beeinflussen. Die Schweißung selbst geht rasch vonstatten, da die Elektrode schnell abschmilzt und ein schneller Vorschub ein Durchschmelzen der Blechkanten verhütet. Die Elektrode soll möglichst nur in Richtung der Naht, also ohne ausgesprochen seitlich pendelnde Bewegung geführt werden. Aus praktischen Gründen sollte man mit Einlagen-

schweißungen auszukommen suchen, obwohl unter gewissen Voraussetzungen Mehrlagenanordnung möglich ist. Wo angängig, wird eine Unterlage aus Stahl oder Kupfer verwendet, auf die bei dünnen Blechen keinesfalls verzichtet werden kann. Um ein gutes Aussehen der Gegenseite zu erzielen, wird in die Unterlage eine Nut gehobelt, die das Abfließen geschmolzenen Aluminiums begrenzt. Bei Ecknähten dient Winkelstahl als Unterlage. Die Elektrode wird auch hier an den Pluspol einer Gleichstromquelle von möglichst hoher Zündspannung gelegt, die durch die etwas dickere Umhüllung der Elektroden erforderlich wird. Wechselstrom ist ungeeignet. Die Schweißspannung bewegt sich zwischen 18 und 28 V.

Als normale Stromstärken können angenommen werden:

Elektroden Durchmesser	3 mm	Stromstärken	60...100 A
„	4 „	„	100...150 „
„	5 „	„	150...180 „
„	6 „	„	160...220 „
„	7 „	„	200...250 „

Die Wahl der Stromstärken ist weniger von der Elektroden Dicke als von der Masse und der Legierung des zu schweißenden Werkstücks abhängig, so daß gerade zum Aluminiumschweißen ein ausgeprägt schweißtechnisches Feingefühl gehört. Legierungen des Aluminiums werden, infolge ihres niedrigeren Schmelzpunktes, im allgemeinen mit etwa 20 vH geringeren Stromstärken verschweißt. Da dünnere Elektroden höhere Strombelastungen (A/mm^2) aufzunehmen in der Lage sind als dickere, sind die Abschmelzzeiten der ersten kürzer.

Die Vorbereitung der Werkstoffkanten ist fast dieselbe wie bei Stahl mit dem Unterschied, daß der Abschrägungswinkel dickerer Bleche (über 6 mm) nicht 70°, sondern 80...90° beträgt. An Blechen über 3 mm Dicke können sowohl Überlapp- als auch Kehlnähte angebracht werden.

Ist infolge zu starken Flusses ein Durchsacken der Schweiße oder ein Abschmelzen der Bleche zu befürchten, so sind kurzzeitige Unterbrechungen notwendig.

Nach vollendeter Schweißung ist eine Nachbehandlung notwendig. Die Schlacke ist beiderseits des Bleches mit warmem Wasser und einer Wurzelbürste restlos zu entfernen, da sonst im Laufe der Zeit Korrosionserscheinungen an der Naht auftreten können. Überdies ist ein Beizen mit Natronlauge, Neutralisieren mit verdünnter Salpetersäure und gründliches Abspülen mit Wasser anzuraten. Eine Erhöhung der Zugfestigkeit und der chemischen Beständigkeit der Schweiße durch Glühen oder Hämmern ist kaum zu erwarten, jedoch kann die Schwingungsfestigkeit durch Hämmern, am besten durch Warmhämmern oberhalb 350° gesteigert werden.

Das Schweißen in Überkopflage ist praktisch unmöglich, Senkrechtschweißung recht schwierig.

Aluminiumlegierungen. Auf die Schweißung der nach DIN 1713 als aushärtbar bezeichneten Legierungen muß im allgemeinen aus dem Grunde verzichtet werden, weil die hohen Gütewerte an Festigkeit und Härte durch die Wärmebehandlung (schon in der Gegend von 200°) verloren gehen und eine Nachvergütung der Schweiße meist nicht durchführbar ist. Alle übrigen Legierungen sind gut, z. T. sehr gut schweißbar. Einige Schwierigkeit verursacht der zunehmende Gehalt an Magnesium, z. B. bei der Al-Mg- und Al-Mg-Mn-Gruppe, da Magnesium leicht herausbrennt und Gasblasen hinterläßt. Legierungen mit über 7 vH Magnesium sollten nicht mehr elektrisch geschweißt werden.

Im übrigen gelten die gleichen Bedingungen wie beim Gasschweißen, das heute noch das vorteilhafteste Verfahren für die Verbindung von Leichtmetallen darstellt.

Demnach müssen die Umhüllungsmassen der Elektroden auf die Arteigenheiten der verschiedenen Legierungen gut abgestimmt und damit in ihrer Zusammensetzung verschieden sein. Ganz allgemein gilt wie dort der Grundsatz: Gleiches ist mit gleichem zu verschweißen. Deshalb soll auch der Zusatzdraht im Regelfalle der gleichen Legierungsgruppe angehören. Vor dem immer wieder anzutreffenden Vorschlage, Siluminstäbe zu verwenden, ist dringend zu warnen. Bei den anerkannt günstigen Schweißseigenschaften des siliziumhaltigen Drahtes dürfen nicht die damit verknüpften Korrosionsgefahren außer acht gelassen werden. Nur, wenn der Werkstoff selbst Silizium enthält und bei einigen Gußlegierungen kann dem Vorschlage gefahrlos entsprochen werden. Von dieser grundsätzlichen Regel kann z. B. abgewichen werden beim Schweißen von GAl-Cu (Amerikanischer Aluminiumguß) und GAl-Zn-Cu (Deutscher Aluminiumguß), wo Elektroden mit 5 oder 12 vH Si verwendet werden können; bei den Siluminen ist es selbstverständlich. Dagegen läßt man bei magnesiumhaltigen Legierungen manchmal das Magnesium im Schweißstabe fort, z. B. wenn Al-Mg-Si mit Al-Mg-Mn verbunden werden soll, so kann ein Stab Al-Mn, bei der Schweißung von Al-Mg-Si ein Stab Al-Si (5 vH) verschweißt werden usw.

Unter den Gußlegierungen nach DIN 1713 sind vor allem die Silumine leicht und meist auch ohne völlige Vorwärmung des Werkstücks einwandfrei schweißbar, lediglich die Anfangsstelle der Schweißung ist zweckmäßig auf etwa 150...200° vorzuwärmen. Die übrigen meist spröderen Legierungsgattungen, wie GAl-Cu und GAl-Zn-Cu, machen grundsätzlich ein gleichmäßiges Vorwärmen des Werkstücks auf 200...250° notwendig, wenn einer Spannungsrißgefahr sicher ausgewichen werden soll. Ebenso ist ein langsames und gleichmäßiges Abkühlen Bedingung, so wie es jede Warmschweißung¹ von Gußkörpern verlangt.

Magnesiumlegierungen. Weder die Knet-, noch die Gußlegierungen des Magnesiums (nach DIN 1717), noch Reinformmagnesium sind elektrisch schweißbar. Diesbezügliche Versuche sind bisher restlos gescheitert. Alle Magnesiumlegierungen werden ausschließlich gasgeschweißt.

Arcatomschweißung (s. Abschnitt IV). Es werden dieselben Schweißdrähte und dieselben Flußmittel wie bei der Gasschweißung benutzt. Dichte und schlackenfreie Schweißen auch bei hohem Magnesiumgehalt der Legierungen lassen darauf schließen, daß offenbar in Gegenwart der Wasserstoffhülle Oxyde (Al_2O_3 und MgO) nur sehr schwer gebildet werden können. Deshalb hat sich die Arcatomschweißung als Verbindungsmittel bei Leichtmetallen, insbesondere bei Blechdicken unter 3 mm und bei verschiedenen Legierungen sehr gut eingeführt. Auch unter sich verschieden dicke und dickste Werkstücke werden unter Zuhilfenahme dieses Verfahrens miteinander verschweißt.

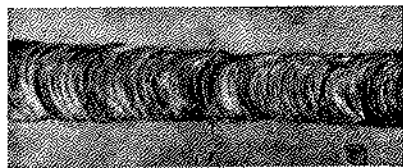


Abb. 340. Mit dem Metalllichtbogen geschweißte Aluminiumnaht.

Güte der Schweißverbindung. Das Oberflächenaussehen der Schweißnähte ist, richtige Elektrodenführung vorausgesetzt, gleichmäßig und ohne Längskerbeneigung, die Wurzel ist gut durchgeschweißt, und Poren sind nicht festzustellen, wie dies eine mit dem Metalllichtbogen geschweißte Naht (10 mm Reinaluminiumblech) Abb. 340 veranschaulicht. Nur beim Auswechseln der Elektroden tritt eine Störung in der Gleichmäßigkeit der Schuppenkette und eine örtlich starke Überhöhung der Naht auf. Zudem können an diesen End-

¹ Näheres siehe Schimpke u. Horn: Praktisches Handbuch der gesamten Schweißtechnik. Bd. I, Gasschweiß- und Schneidtechnik, 3. Aufl. Berlin: Springer 1938.

kraterstellen Undichtheiten entstehen, denen man dadurch begegnen kann, daß man nach Abb. 341 vorgeht, d. h. schrittweise je eine Elektrode verschweißt. Der Ansatzkrater a der Nahtstrecke 1 wird nach Vollendung des Schrittes 2 in einem Zuge überschritten und die Elektrode um ein geringes seitlich abgezogen, so daß ein kurzer und, weil auf vollem Blech, kraterloser Bogen b gebildet wird. Der Ansatzkrater a_1 dieses Schrittes wird durch den nächsten bei b_1 überschritten usw.



Abb. 341. Nahtschritte beim Aluminiumschweißen.

Das Aussehen der arcatomgeschweißten Naht an einem 12 mm dicken Aluminiumblech zeigt Abb. 342, und eine nach dem gleichen Verfahren geschweißte Kehlnaht an 3 mm-Blech ist in Abb. 343 wiedergegeben.

Das Gefüge der lichtbogengeschweißten Naht ist im allgemeinen mehr grobkristallin als das der gas- oder arcatomgeschweißten, besonders das von Reinaluminium. Die Legierungen, die an sich feinkörniger kristallisieren, weisen auch in der Schweiße ein wesentlich feineres Korn auf. Ein geringer Zusatz an Titan im Aluminiumstab ist gegenüber Korrosion weniger empfindlich und ermöglicht eine so erhebliche Kornverfeinerung der Al-Rohschweiße, daß von dieser Erfahrung mehr als bisher Gebrauch gemacht werden sollte.

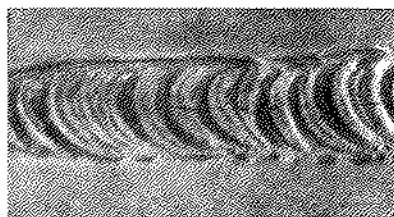


Abb. 342. Arcatomgeschweißte Aluminiumnaht.

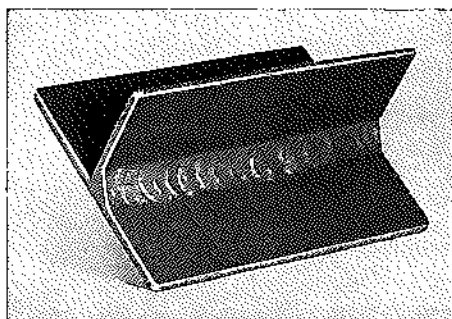


Abb. 343. Arcatomgeschweißte Kehlnaht an Aluminiumblech.

Das in Abb. 344 wiedergegebene, z. T. strahlige Gefüge eines geätzten Makroschliffes entstammt einem lichtbogengeschweißten 25 mm dicken Al-Blech. Dabei handelt es sich um eine ungleichschenklige X-Naht, die bei etwa 400° warm gehämmert wurde. Die im Scheitel der Naht bestehenden gebliebenen Stengelkristalle (die Einstrahlung erfolgt immer in Richtung des stärksten Wärmeffusses) deuten darauf hin, daß das Hämmern nicht die gesamte Werkstoffdicke erfaßt hat.



Abb. 344. Schliff einer Aluminium-Dickblechschweiße.

Wenn auch durch Kalt- oder Warmhämmern (spannungsempfindliche Al-Legierungen dürfen nur warmgehämmert werden, bei 200...350°) eine örtliche, auf die Schweiße selbst beschränkte Verfestigung des Gefüges durchaus erzielbar ist, so hat es doch nie den Wert, den man ihm schlechthin beizumessen geneigt ist. Umfangreiche Untersuchungen über die mechanischen Güteverhältnisse von Leichtmetallschweißen, die von einem der Verfasser in offiziellem Auftrage zur Bestim-

mung der zulässigen Berechnungswerte für abnahmepflichtige Leichtmetallbehälter angestellt wurden, ergaben für das Hämmern keine günstigeren Verhältnisse (im Gegensatz zum Kupfer). Es wurden aus über 400 kg verschweißten Aluminiumblechen von 10...25 mm Dicke eine große Anzahl ungehämmerter, kalt- und warmgehämmerter Zug- und Biegestäbe herausgearbeitet und unter gleichen Bedingungen sowohl technologisch, als auch metallographisch und korrosionstechnisch geprüft. Dabei ergaben sich in Übereinstimmung mit einige Jahre später von anderer Stelle durchgeführten Untersuchungen¹ Festigkeitszahlen, die in allen Fällen denen der weichgeglühten ungeschweißten Werkstoffe entsprechen. Beim Zugversuch trat der Bruch aller gänzlich abgearbeiteten Stäbe stets weit außerhalb der Schweißse in der erweichten Zone des Mutterwerkstoffs ein. Mit anderen Worten geht die durch den jeweiligen Walzgrad erreichte Festigkeit des Werkstoffs selbst auf die des weichgeglühten Aluminiums zurück. Eine Festigkeitssteigerung der Schweißse durch Hämmern ist demnach zwecklos. Hinsichtlich der Legierungen kommt noch hinzu, daß durch das Hämmern, wenn es nicht mit großer Sorgfalt und Kenntnis vorgenommen wird, Ribbildungen in der Schweißse zu gewärtigen sind.

Man kann deshalb behaupten, daß eine gute Schweißse (auch bei Leichtmetallguß) 100 vH der Festigkeit geblühten Aluminiums ergibt. Der Biegewinkel beträgt 180°. Die Zugfestigkeit der Schweißsen an aushärtbaren Legierungen (Al-Cu-Mg, Al-Cu usf.) liegt, auf Grund der bereits erwähnten Vergütungsverluste bei 50 bis 60 vH, die der übrigen Legierungen bei 60...75 vH der des Mutterwerkstoffs.

IV. Die gas-elektrischen Schweißverfahren.

Allgemeines. Unter dem Begriff „gas-elektrische Schweißung“ werden drei verschiedene Verfahren verstanden, von denen nur die Arcatomschweißung praktisch nennenswerte Anwendung findet. Allen diesen Verfahren liegt der Gedanke zugrunde die Vorteile der beiden grundsätzlich verschiedenen Verfahren, der Lichtbogen- und Gasschweißung, zu vereinigen und beider Nachteile weitgehend auszuschalten. Um dies zu erreichen, läßt man den Metalllichtbogen nicht an der Atmosphäre, sondern in einer neutralen Schutzgasflamme (daher auch Schutzgasschweißung) brennen, wodurch die ummantelte Elektrode ersetzt und der Luftstickstoff und -sauerstoff vom Schmelzbad und von der Elektrode selbst ferngehalten werden sollen.

Einteilung. Zwei dieser vereinigten Verfahren, die älteren unter ihnen, werden als atomares Wasserstoff-Schweißverfahren bezeichnet. Die ersten Versuche, diese Ideen praktisch zu verwirklichen, stammen von Alexander, der eine Metallelektrode (Slavianoff) mit einer Brenngasschutzhülle umgibt (Alexanderverfahren). Wesentlich größere Bedeutung hat jedoch das Verfahren nach Langmuir, das darauf beruht, den Lichtbogen, unabhängig vom Werkstück, zwischen zwei Wolframelektroden zu unterhalten und ihn mit Wasserstoff zu umhüllen. Dies ist das eigentliche Arcatom-Verfahren, das heute, wie bereits betont, besonders beim Schweißen von Leichtmetallen immer mehr Eingang findet.

Einige Jahre später wurde ein als autogen-elektrische Schweißung oder kurz Arcogen-Schweißung bezeichnetes Verfahren entwickelt, das die gemeinsame Anwendung des Lichtbogens und der Autogenflamme zur Grundlage hat.

¹ Anleitungsblätter für das Schweißen und Lüten von Leichtmetallen. Berlin: VDI-Verlag, 1940.

A. Das Alexander-Verfahren.

Schutzgas. Als Schutzgas kamen neben dem heute als bestgeeignet erkannten Wasserstoff versuchsweise verschiedene andere Gase, wie Leuchtgas, Methan, Wassergas, Äthyläther, Kohlensäure und besonders Methanol zur Verwendung. Die meisten dieser Gase bewährten sich praktisch wenig oder gar nicht, z. T. wegen ihrer aufkohlenden Wirkung auf die Schweiße oder ihrer beim Zerfall in der Flamme (Dissoziation) auftretenden oxydierenden Eigenschaften (Kohlensäure, $2\text{CO}_2 = 2\text{CO} + \text{O}_2$), z. T. wegen ihrer Giftigkeit (Leuchtgas; Wassergas $\text{CO} + 2\text{H}$), andererseits auch wegen des hohen Preises und ihrer Explosibilität (Äthyläther $[\text{C}_2\text{H}_5]_2\text{O}$) bzw. der betäubenden Wirkung. Am besten schien sich zunächst Methanol (CH_3OH) zu bewähren. Es ist unter der Bezeichnung Holzgeist oder Methylalkohol bekannt und spaltet sich im Lichtbogen bei etwa 700° in 2 Raum-

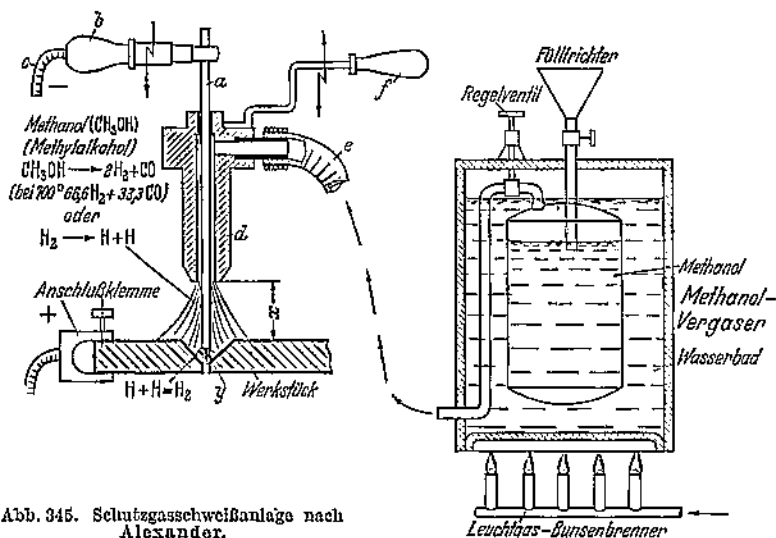


Abb. 345. Schutzgasschweißanlage nach Alexander.

teile Wasserstoff (2H_2) und 1 Raumteil Kohlenoxyd (CO). Das Methanol wurde in einem besonderen, durch Bunsenflammen beheizten und gegen Wärmeverluste gut isolierten Vergaser oder Schutzgaserzeuger (Abb. 345) vergast, und zwar wurde aus 1 l Flüssigkeit etwa $1,75\text{ m}^3$ Gas gewonnen und dieses durch einen Schlauch der Gasdüse des Schweißgeräts zugeführt.

Heute wird ausschließlich Wasserstoff, der den üblichen Stahlflaschen unmittelbar entnommen wird, als Schutzgas verwendet.

Das Schweißgerät. Nachdem man ursprünglich Schutzgasflamme und Elektrode getrennt voneinander führte, ging man später dazu über, die Elektrode in der Mitte der Gasringdüse anzuordnen, wie dies Abb. 345 zeigt. Die rechte Hand des Schweißers führt die in die Zange *b* eingespannte nackte Elektrode *a*, die den Strom durch ein Handkabel *c* zugeführt erhält und in der Düse *d* nach oben und unten frei beweglich ist. Die Schutzgasdüse *d* wird am Griff *f* von der linken Hand geführt und ist ebenfalls frei beweglich. Die Gaszufuhr erfolgt durch einen Schlauch *e*.

Schweißvorgang. Bei der Handhabung des Geräts kommt es vor allem darauf an, daß die Entfernung *x*, d. h. der Abstand zwischen Düsenmündung und Werkstückoberfläche, möglichst gleichmäßig gehalten wird, wenn einerseits die Wirksamkeit der Flammenhülle vorhanden sein und andererseits ein störungsfreies Brennen

des Lichtbogens gewährleistet sein soll. Diese Entfernung x beträgt etwa 100 mm im Mittel. Ist sie größer, so hüllt die Flamme nicht genügend ein, ist sie kleiner, dann brennt der Lichtbogen unruhig und knattert. Außerdem hat der Schweißer die Lichtbogenlänge y gleichmäßig zu halten, wenn auch geringe Schwankungen nicht so schädlich sind wie bei normaler Lichtbogenschweißung und die hohe Zündspannung eine größere Beweglichkeit der Lichtbogenlänge gestattet. Überlegt man ferner, daß der Schweißer beide Hände besetzt hat und mit der einen den Vorschub der Elektrode nach zwei Richtungen regeln und mit der anderen die Gasdüse führen muß, so ist es verständlich, daß der Schweißer dieses Verfahren angesichts der damit verknüpften Schwierigkeiten ablehnte; es hat heute keine Bedeutung mehr.

B. Das Arcatomverfahren.

Allgemeines. Während beim Alexander-Verfahren der Lichtbogen zwischen Werkstück und Elektrode gezogen, mithin nach Slavianoff gearbeitet wird, arbeitet das Gerät nach Langmuir nach dem Zerenerschen Grundgedanken,

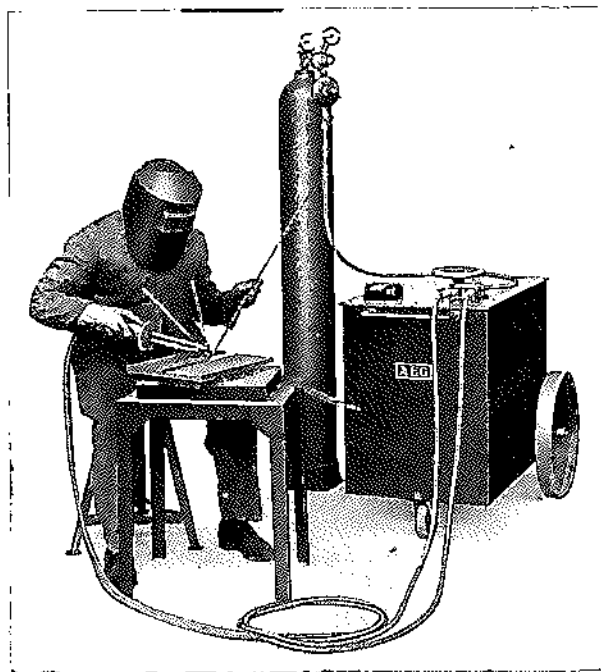


Abb. 346. Arcatomschweißanordnung nach Langmuir.

d. h. der Lichtbogen wird vom Werkstück unabhängig zwischen zwei, von einer

Wasserstoff-Schutzgasflamme umgebenen Wolframelektrodenenden gezogen. Da dieses Verfahren praktisch mit Erfolg und in steigendem Maße zur Anwendung kommt, soll hierauf näher eingegangen und auch auf die elektrische Einrichtung und auf die Vorgänge, die sich innerhalb der Schutzgasatmosphäre abspielen, hingewiesen werden.

Einrichtung der Anlage.

Wie beim Alexander-Gerät ist auch hier ein besonderer Schweißumspanner erforderlich. Es wird demnach nur mit Wechselstrom gearbeitet. Die Gesamtanordnung der Anlage geht aus Abb. 346 hervor.

Der Strom wird einem

13stufigen, fahrbaren Umspanner von 20...40 kVA Anschlußwert, der mit einer Sonderdrosselpule eingerichtet ist, entnommen. Die Stufenregelung geschieht durch ein Handrad, die Stromverhältnisse sind an einem Meßinstrument ablesbar. Das Zünden und Halten des Lichtbogens im Wasserstoffstrom erfordert höhere Spannungen als in der atmosphärischen Luft. Die Zündspannung beträgt etwa 300 V, die Schweißspannung 60...100 V. Im Umspanner sind zwei Unterspannungswicklungen angeordnet, von denen die eine die Zünd-

spannung von 300 V, die andere die Schutzspannung für ein Schütz von 60 V hergibt. Der Schweißstromkreis verläuft über eine Drossel durch den Lichtbogen und schließt sich über die Wicklung des Schützes. Die Einschaltung der 60 V-Spannungsspule des Schützes erfolgt durch einen Druckknopfschalter, nach dessen Betätigung der Schweißstromkreis lediglich durch die beiden Elektroden des Schweißgeräts unterbrochen ist. Diese Elektroden bestehen aus Wolfram, das bekanntlich einen hohen Schmelzpunkt (3370°) besitzt.

Arbeitsgang. Die Wolframelektroden haben einen Durchmesser von 1,5...3 mm, je nach der zu schweißenden Werkstoffdicke, werden beim Zünden des Lichtbogens kurzzeitig zur Berührung gebracht und auf die entsprechende Lichtbogenlänge auseinandergezogen; gleichzeitig wird Schutzgas zugegeben, das einer normalen Stahlflasche mit auf 150 atü verdichtetem Wasserstoff entnommen wird. Beim Abreißen des Lichtbogens wird die Zündspannung (Leerlaufspannung) von 300 V selbsttätig abgeschaltet; sie kehrt erst nach Wiedereinschalten des Schützes zurück, das auch während des Brennens des Lichtbogens eingeschaltet bleibt. Der außer Betrieb befindliche Brenner ist spannungsfrei. Die Schweißstromstärke bewegt sich zwischen 20 und 130 A. Zur Erhöhung der Betriebssicherheit ist für eine Erdung des Umspanners, am besten auch des Schweißtisches bzw. des Werkstücks Sorge zu tragen.

Um den Verbrauch an den teuren Wolframelektroden niedrig zu halten, ist eine ununterbrochene Zugabe von Wasserstoff, besonders sogleich beim Zünden des Lichtbogens erforderlich. Der Gasdruck, der an einem möglichst fein regelbaren Konstantendruckminderventil (an der Stahlflasche) eingestellt wird, beträgt 100...1200 mm WS und muß gleichmäßig gehalten werden. Der Wasserstoff wird dem in Abb. 347 wiedergegebenen Schweißbrenner durch zwei Gummischläuche zugeführt, in denen auch gleichzeitig die Stromkabel untergebracht sind. Die Regelung und Abstellung des Wasserstoffs erfolgt an einem Ventilkasten, der am Umspanner (Stromzapfstelle) neben dem Druckknopfschalter angeordnet ist. Die Stellung der v-förmig zueinander gelagerten Wolframelektroden wird an einem Handrädchen des Brennergriffs geregelt. Vorn am Brennergriff ist ein Schutzschirm angeordnet, der die Hand des Schweißers vor Wärmestrahlen schützen soll. Die Nachstellung der Elektroden geschieht von Hand. Der Brenner wird mit für den jeweiligen Zweck besonders ausgebildeten auswechselbaren Köpfen geliefert.

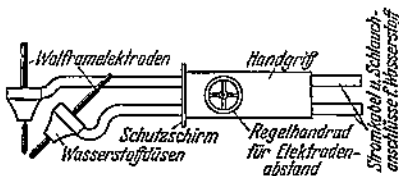


Abb. 347. Grundform eines Arcatom-schweißbrenners.

Schweißautomaten. Nachdem die Brauchbarkeit des Arcatomgeräts erkannt und die Güte der atomaren Wasserstoffschweißung erwiesen war, lag der Gedanke nahe, das Gerät selbsttätig arbeitend zu machen. Es sind deshalb selbsttätige Schweißeinrichtungen mit besonderen, den Bedingungen dieses Verfahrens angepaßten Schweißköpfen konstruiert und auf den Markt gebracht worden, wobei der mechanischen Einrichtung der Maschinen besonders die Regelung des Vorschubs zufällt. Den nach dem Langmuir-Verfahren arbeitenden Automaten auch die Tätigkeit des Drahtzusatzes zu übertragen, ist wegen der vielfachen Schwierigkeiten bis heute noch nicht gelungen, weshalb z. Z. nur Nähte an π -Stößen ohne Drahtzusatz geschweißt werden können, z. B. Rohrlängsnähte.

Der Arcatomlichtbogen. Die Wirkungsweise des Arcatomlichtbogens sei an Hand der Abb. 348 erläutert. Die winklig angeordneten Wolframelektroden sind in kupferne, stromführende Ringdüsen eingespannt, welchen Wasserstoff ringsum

zugeführt wird. Die auf Weißglut (etwa 2700°) erhitzten Enden der Wolfram-elektroden bewirken zusammen mit dem im Entstehen begriffenen Lichtbogen einen teilweisen Zerfall (Dissoziation) des Wasserstoffgases, der sich beim Brennen

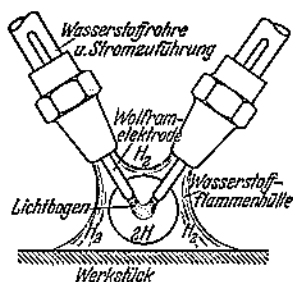


Abb. 348. Der Arcatomlichtbogen.

des Lichtbogens in erhöhter Weise fortsetzt und wobei die ursprünglich vorhandenen Wasserstoffmoleküle (H_2) in Atome ($2H$) zerlegt werden. Die zur Spaltung der Moleküle erforderlichen Wärmemengen werden den glühenden Elektrodenenden und vor allem dem Lichtbogen entzogen. Am Rande des scheiben- oder fächerartigen, hufeisenförmigen Lichtbogens von violettrotlicher Farbe tritt eine Wiedervereinigung der Atome zu Molekülen ein, wobei die vorher dem Lichtbogen entzogene Wärme wieder frei wird und eine bedeutende Temperatursteigerung verursacht, die nach Langmuir in der Randzone des Lichtbogens 4000° erreicht. Damit kommt die bei der Umformung der Atome zu

Molekülen frei werdende Wärme dem Werkstück, d. h. der Schweißstelle zugute, wodurch diese schneller angeschmolzen wird. Außerdem wird die Abkühlung der Schweiße verzögert, was ihre Güte günstig beeinflusst.

Anwendungsbereich. Da die Unabhängigkeit des Lichtbogens vom Werkstück eine Regelung des Wärmezustandes der Schweißstelle jederzeit dadurch ermöglicht, daß man den Abstand zwischen Lichtbogen und Werkstück verändern kann, ohne daß der Lichtbogen erlischt, ist die Arcatomschweißung ihrem Wesen nach der Gasschweißung sehr ähnlich und ergibt annähernd gleichwertige Güteeigenschaften der Schweiße.

Mit den neuen Einrichtungen sind Stahlbleche in allen Dicken schweißbar. Dünne Bleche (bis 4 mm) können im π -Stoß, also ohne Abschrägung und je nach Erfordernis mit und ohne Zusatzdraht geschweißt werden. Letzter ist der gleiche wie bei der Gasschweißung. 1 mm-Blech ist noch ohne Schwierigkeit schweißbar; die Schweißung dünnerer Bleche erfordert große Handfertigkeit. Die obere Grenze der schweißbaren Blechdicke liegt bei etwa 80 mm. Allerdings besteht oberhalb 10 mm Werkstoffdicke die Gefahr einer Porenbildung. Die Vorbereitung der Blechkanten ist dieselbe wie beim Gasschweißen. Die Schweißraupen sind gleichmäßig und flach und von gasgeschweißten Nähten kaum zu unterscheiden.

Für die Schweißung von Gußeisen ist das Arcatomverfahren weniger geeignet, dagegen um so besser für die meisten Nichteisenmetalle. Bronze, Messing, Blei, Aluminium und andere Metalle lassen sich mit bestem Erfolg schweißen, wobei jeweils die beim Gasschweißen üblichen Flußmittel und Zusatzstoffe (Drähte oder Streifen) anzuwenden sind (s. Abschnitt III 8). Wegen der Gefahr der Wasserstoffaufnahme ist die Arcatomschweißung für die Bearbeitung des Kupfers weniger zu empfehlen. Das trifft in gewissem Umfang auch für Reinnickel zu. Dagegen sind Chromnickel- und Manganbleche (mit bis zu 14 vH Mangan) mit guten Ergebnissen geschweißt worden. Das gilt besonders auch für die austenitischen Chrom-Nickel-Stähle, z. B. für den nichtrostenden V2A-Stahl; jedoch sind arcatomgeschweißte V2A-Nähte meist etwas spröder als normal elektrisch oder gasgeschweißte, was scheinbar ebenfalls auf Wasserstoffaufnahme zurückzuführen ist. Bekanntlich nimmt mit steigendem Nickelgehalt die Wasserstofflöslichkeit des Stahls zu.

Im Flugzeugbau wird das Verfahren u. a. auch für die Schweißung von Chrom-Molybdän-Stählen benutzt. Dabei stellte sich eine mitunter erhebliche Entkohlung in der Schweiße und damit eine unzulässig hohe Festigkeitsabnahme

heraus. Um diesem Mangel abzuhelpen, werden entweder Schweißdrähte höherer Festigkeit eingeschmolzen, oder man führt dem Wasserstoff-Flammenmantel aus einer Stahlflasche geringe Mengen an Azetylen zu (Patent), um den notwendigen Gehalt an Kohlenstoff zu ersetzen.

C. Das Arcogenschweißverfahren.

Allgemeines. Der Entwicklung dieses Verfahrens lag die Annahme zugrunde, daß eine Vereinigung zwischen Lichtbogen und Autogenflamme nicht allein eine Schutzgaswirkung, sondern auch eine hohe Leistungssteigerung herbeiführen müsse. Die an dieses autogen-elektrische Schweißverfahren (Arcogen genannt) geknüpften Erwartungen gingen jedoch nicht in Erfüllung. Das Verfahren hat sich in der Praxis nicht einzuführen vermocht, und im Betriebe gewesene Einrichtungen sind zurückgezogen worden. Deshalb sei nur kurz das Grundsätzliche herausgestellt.

Einrichtung. Sie ist in ihrem grundsätzlichen Aufbau in Abb. 349 skizzenhaft dargestellt. Als Stromart dient Wechselstrom, der einem in 9 Stufen regelbaren Umspanner von 4...8 kVA-Anschlußwert entnommen wird und dessen Schweiß-

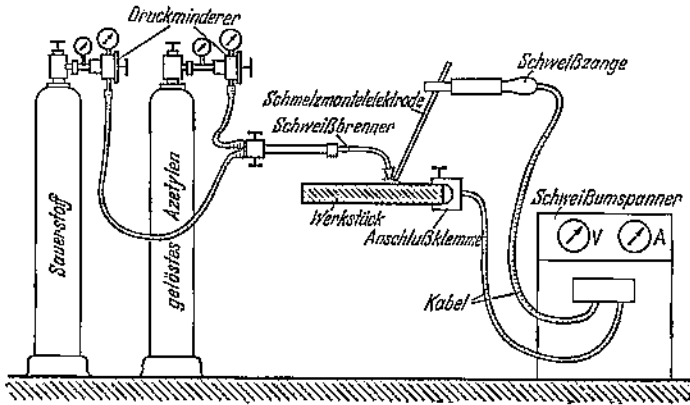


Abb. 349. Arcogenschweißeinrichtung.

kabel einmal mit dem Werkstück und anderseits mit der Schweißzange in Verbindung stehen. Die etwas schwere Zange (Elektrodenhalter) nimmt dickumhüllte Elektroden von 6...8 mm Durchmesser auf. Dem Autogenbrenner wird der Sauerstoff aus einer Stahlflasche über ein Druckminderventil und das Azetylen ebenso oder von einer Entwickleranlage über eine Sicherheitsvorlage zugeführt. Demnach handelt es sich um das Zusammenarbeiten einer Wechselstromschweißeinrichtung mit einer Autogenanlage.

Schweißvorgang. Die Schweißzange wird links-, der Brenner rechtshändig geführt und nach rechts geschweißt, d. h. die Elektrode folgt der Gasflamme. Zunächst wurden die Blechkanten mit der Flamme vorgewärmt, und dann erst wird der Lichtbogen in der Flamme gezündet. Lichtbogen und Gasflamme wirken örtlich zusammengefaßt auf das Schmelzbad ein, das wegen der Zufuhr erheblicher Wärmemengen eine verhältnismäßig große Fläche einnimmt. Das Verfahren war deshalb vor allem auf Dickblechschweißung und nur auf Stahl zugeschnitten.

Da die Strömungsenergie des Gasgemisches (120 m/s Geschwindigkeit) die im Lichtbogen gebildeten Ionen wegblies, ergaben sich anfänglich große Schwierig-

keiten, um ein stabiles Halten des Lichtbogens überhaupt zu ermöglichen. Mit Hilfe elektrochemischer und atomphysikalischer Erkenntnisse gelang es nach kostspieligen Versuchen, Umhüllungsmassen mit hoher ionisierender Wirkung herzustellen und einen stabilen Lichtbogen zu erhalten. Zur Steigerung der Schweißleistung und um der Gefahr einer Überhitzung des Schmelzbades auszuweichen, wurden verschiedene Sonderelektroden wie unter sich isolierte Zwillingselektroden und sog. Kühltraht-Doppелеlektroden hergestellt, die trotz aller folgerichtigen physikalischen und chemischen Wirkungen der Einführung dieses verwickelten und schwierigen Verfahrens den Weg nicht zu ebnen vermochten.

V. Das elektrische Schneiden.

Allgemeines. Das elektrische Schneiden wird praktisch nur dann in Frage kommen, wenn wirtschaftliche Momente unberücksichtigt bleiben, und bei den Metallen, die nach dem Brennschneidverfahren schlecht (Gußeisen) oder gar nicht (Kupfer) trennbar sind. Der grundsätzliche Unterschied zwischen den beiden Verfahren besteht darin, daß beim Brennschneiden (autogenen Schneiden) die Trennung des Werkstoffs durch einen chemischen Vorgang, und zwar durch Verbrennung im Sauerstoffstrom vonstatten geht¹, während es sich beim Lichtbogenschneiden nur um eine mechanische Trennung durch Abschmelzen handelt. Die für das Ergebnis des Trennungsvorganges grundlegende Verschiedenheit der Verfahren kommt nicht allein in der Leistung, sondern auch im Aussehen der Schnittflächen und im weiteren durch die verschiedenen großen Bereiche der Anwendbarkeit zum Ausdruck, die nach beiden Richtungen (Kupfer ausgenommen) zugunsten des Brennschneidens ausfallen. Die Ergebnisse der beiden Schneidverfahren sind praktisch kaum vergleichbar, denn der Brennschnitt kann an jedem erforderlichen Querschnitt durchgeführt werden, gleichgültig, ob es sich um geradlinige oder kurvenförmige Schnitte handelt.

Ausführung des Verfahrens. Zum elektrischen Schneiden kann sowohl der Kohle- wie der Metalllichtbogen verwendet werden. Der Kohlelichtbogen hat den Vorteil, daß mit höheren Stromstärken und schneller gearbeitet werden kann, wobei jedoch nicht außer acht zu lassen ist, daß mit steigender Stromstärke der Elektrodendurchmesser und die Schnittfugenbreite größer wird. Die Kohlelektrode wird, wie beim Schweißen, an den Minuspol gelegt, weil sie sonst unruhig, stumpf und schneller abbrennt, wie dies bei Wechselstrom der Fall ist. Da außerdem die Schnitt- bzw. Schmelzleistung bei Wechselstrom erheblich geringer ist — sie beträgt nur etwa 80 vH — zieht man Gleichstrom vor. Zum Halten der Kohlenstäbe sind lange und schwere Halter erforderlich. Versuche, die angestellt wurden, Hohlstäbe mit sauerstoffabgebenden chemischen Stoffen auszuführen, um dadurch den Schneidevorgang zu beschleunigen, sowie Versuche, dem Kohlelichtbogen z. B. beim Schneiden „unter Wasser“ verdichteten Sauerstoff zuzuführen, um damit dem Brennschneiden näherzukommen, sind sowohl wegen der Unwirtschaftlichkeit wie auch wegen der umständlichen Arbeitsweise und sicherheitstechnischer Bedenklichkeit praktisch ohne Bedeutung geblieben. Beim Schneiden mit dem Kohlebogen sind mittlere Stromstärken von 400 A üblich; als Höchststromstärken können 1500 A bei etwa 65 V Lichtbogenspannung angesehen werden.

Als Metallelektroden können beim Schneiden nackte wie auch ummantelte Stäbe Verwendung finden, wobei hervorgehoben sei, daß auch zum Trennen von

¹ Schimpke-Horn: Band 1 (Abschnitt: Das Brennschneiden).

Gußeisen und Kupfer nur Stahlelektroden verwendet werden. Stahlelektroden ergeben schmalere Schnittfugen als Kohlestäbe, haben aber den Nachteil, daß sie wegen der hohen Stromstärken rasch abgeschmolzen werden. Einige Firmen bringen Schneidelektroden mit besonderen sauerstoffabgebenden Stoffen versehen auf den Markt, deren Polung nach Gebrauchsanweisung vorzunehmen ist. Die Stromstärken liegen um etwa 50 vH höher als beim Schweißen, wodurch ein schnelles Glühendwerden der Elektroden eintritt, so daß sie zeitweise im Wasser abgekühlt werden müssen.

Da es sich beim elektrischen Schneiden um ein Abschmelzen handelt, muß das Werkstück so gelagert werden, daß die geschmolzenen Metallmengen frei abfließen können und der Elektrodenwerkstoff nicht auf den Schnittflächen abgesetzt wird, was durch richtige Haltung der Elektrode (durch einen langen Lichtbogen) erreicht wird. Es ist selbstverständlich, daß der Schnitt nur an einer Werkstoffkante begonnen werden kann, damit der geschmolzene Werkstoff von Beginn an unbehindert abfließen kann.

Leistungen. Stromverbrauch und Schneiddauer sind in Abb. 350 veranschaulicht. Die Werte beziehen sich auf Stahl und Gußeisen von 10...60 mm Dicke, bzw. auf Rundstahl bis 250 mm $\varnothing$. Da das Schneiden längerer Werkstücke auf elektrischem Wege weniger häufig vorkommt, können die in Abb. 350 gebrachten Daten nur angenäherte sein; praktisch werden die Leistungen meist um 20...30 vH niedriger liegen. Um einen Fall herauszugreifen, sei angeführt, daß zum elektrischen Zerschneiden eines 1 m langen 50 mm-Blechs etwa 50 min erforderlich sind, während der Brennschnitt nur etwa 7 min in Anspruch nimmt. Die obere Grenze der Anwendbarkeit des elektrischen Schneidens liegt bei etwa 60 mm Blechdicke. Für Gußeisen lassen sich Zahlen kaum nennen, da hier die Form des Körpers für die Durchführung des Schnittes maßgebend ist.

Anwendungsbereich. Angesichts der sehr rauen Schnittflächen und der ungleichen breiten Schnittfugen ist das elektrische Schneiden für die Fertigung nicht anwendbar; es kommt vielmehr nur vereinzelt bei Abbruch- und Verschrotungsarbeiten zur Geltung, zumal es wirtschaftlich dem Brennschneiden bedeutend unterlegen ist.

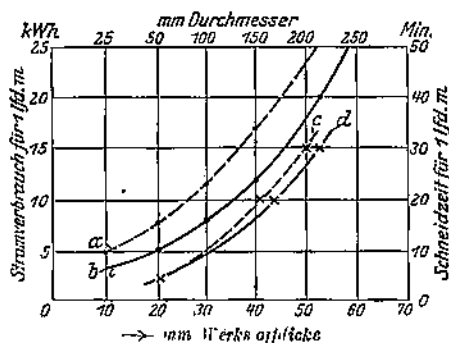


Abb. 350. Zeit und Stromverbrauch beim elektrischen Schneiden.

a = kWh-Verbrauch für 1 m } bei Stahl
b = Schneiddauer „ 1 „ }
c = kWh-Verbrauch „ 1 „ } bei Gußeisen
d = Schneiddauer „ 1 „ }

VI. Elektrisches Unterwasserschweißen und -schneiden¹.

Das elektrische Unterwasserschweiß- und -schneidverfahren ist nach zahlreichen Versuchen und Erprobungen so weit entwickelt worden, daß bereits durch Taucher viele Schweiß- und Schneidarbeiten erfolgreich ausgeführt werden konnten.

Unterwasserschweißen. Geschweißt wird mit Gleichstrom, wobei sich die handelsüblichen Schweißumformer bewährt haben, wenn ihr dynamisches Verhalten eine schnelle Spannungswiederkehr nach Kurzschlüssen gewährleistet, wie

¹ Siehe Z. VDI. 1941, S. 45.

sie beim Zünden und bei Tropfenübergängen immer entstehen. Diese Forderung wird durch Schweißanlagen mit zusätzlicher Induktionswirkung (z. B. Drosselspulen) erfüllt. Die Lichtbogenspannung ist um etwa 25 V höher als beim Schweißen über Tag. Das Unterwasserschweißen erfordert eine große Beständigkeit des Lichtbogens, die man nur mit bestimmten Arten dick ummantelter Elektroden erreichen kann. Die Ummantelung muß vollkommen unempfindlich gegen die Auflösungswirkung des Wassers sein. Deshalb bringt man noch einen nichtleitenden seewasserbeständigen Lack (aus Kohlenwasserstoffverbindungen) auf. Der Elektrodendurchmesser beträgt für alle Schweißungen 5 mm, die Elektrodenlänge nicht über 350 mm. An den Elektrodenwerkstoff muß man noch wegen der im Wasser eintretenden starken Abkühlung die Forderung hoher Unempfindlichkeit gegen Schrumpfrissigkeit und Abschreckhärtung stellen. Die Elektrodenhalter müssen durch Aufpressen von Hartgummi vollkommen isoliert werden.

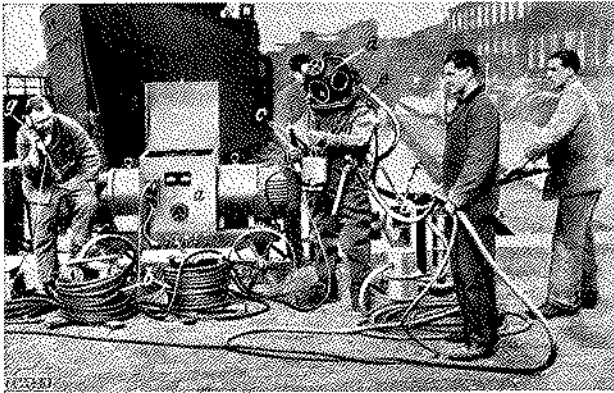


Abb. 351. Elektro-Unterwasserschweiß- und -schneideeinrichtung.

Die vom Lichtbogen ausgehenden schädlichen ultravioletten Strahlen (auch die blendenden sichtbaren Strahlen) werden vom Wasser weitgehend gebrochen und aufgeschluckt, so daß man auf einen besonderen Schutz der Augen durch farbige Gläser verzichten kann.

Eine vollständige Elektro-Unterwasserschweiß- und -schneidausrüstung gibt Abb. 351 wieder. Das Tauchergerät kann das

übliche sein, jedoch sind blanke Metallteile durch isolierende Überzüge zu schützen, damit der Schweißer bei zufälliger Berührung mit den Schweißstrompolen nicht gefährdet wird.

Beim Schweißen selbst ist die Elektrode in Schweißrichtung in einem spitzen Winkel von $30^\circ \cdots 40^\circ$ zum Werkstück geneigt zu halten, da sonst scharfe Einbrandkerben entstehen, und stets geradlinig vorwärts zu bewegen. Senkrechtschweißungen werden von oben nach unten ausgeführt. Als Schweißnahtform wird bisher nur die Kehlnaht gewählt. Fehlerlose V- und X-Naht-Schweißungen sind noch nicht gelungen, weil der Lichtbogen in der Wurzel stark abgelenkt und hierdurch eine einwandfreie Werkstoffbindung verhindert wird. Die Zugfestigkeit der Kehlnähte ist gut, die Aufhärtung des Schweißguts nicht besonders hoch, weil die Schweiße nicht, wie beim Schweißen an der Luft, Stickstoff aufnimmt.

Unterwasserschneiden. Außer den für das Unterwasserschweißen geltenden Forderungen muß auf eine hohe Strombelastbarkeit der Elektroden und auf eine hohe Belastbarkeit der Schweißmaschinen geachtet werden. Die hohe Strombelastung wird von den für das Unterwasserschweißen entwickelten lacküberzogenen 5 mm-Elektroden gut aufgenommen; sie können bis 900 A belastet werden, was im allgemeinen genügt. Bei 42 V Spannung sind für Schneidarbeiten an Blechen bis zu 20 mm Dicke Stromstärken von 450 A und an Blechen von $20 \cdots 35$ mm Dicke bis zu 900 A erforderlich.

Die Elektrode wird senkrecht auf das zu schneidende Blech aufgesetzt und nach erfolgter Lichtbogenzündung, bei gleichmäßigem Vorschub in der Schnitterichtung, senkrecht durch das Blech gestoßen.

Leistungen. Beim Unterwasserschweißen entsprechen die reinen Schweißzeiten etwa denen beim Schweißen über Tage. Nur die Zeit des Elektrodenwechsels ist wesentlich größer; sie wurde im Durchschnitt zu 1,16 min je Elektrode ermittelt. Weiterhin sind natürlich noch die durch die Taucharbeit bedingten Zeiten zu beachten.

Beim Unterwasserschneiden hat man bei 5 mm dicken Blechen eine Schneidzeit von 5,06 min/m, bei 10 mm Blechen 15,4 min/m, und bei 20 mm Blechen 35,7 min/m gebraucht. In diesen Zeiten sind die Einspannzeiten für die Elektroden (1,16 min je Elektrode) mit enthalten.

Anwendungsbereich. In größerem Umfange wurden bereits Pegelschuhe angeschweißt, Versteifungen angebracht und Lecke an Schwimmkörpern gedichtet. Bei einer Ladebrücke wurden korrodierte Brückenstützen unter Wasser abgeschnitten und durch Einschweißen neuer Bauteile unter Wasser ersetzt. Die Kosten dieser Überholungsarbeiten beliefen sich auf etwa 10000 RM., während sonst, bei noch dazu erheblich längerer Bauzeit, mindestens 100000 RM. erforderlich gewesen wären.

VII. Die Güte der Schweißnaht und ihre Prüfung.

A. Allgemeiner Überblick.

Allgemeines. Vorweg sei besonders betont, daß der folgende Überblick über Prüfungen der Schweißnaht im Rahmen dieses Buches nicht erschöpfend sein kann und will. Dazu müßte allein ein besonderes Buch geschrieben werden. Der Zweck dieses Abschnitts kann daher nur der sein, die wesentlichsten Prüfverfahren für die Schweißnaht zu kennzeichnen, sie durch kurze Erläuterungen dem Verständnis aller mit der Elektroschweißtechnik in Berührung kommenden Fachkreise nahezubringen und durch einige Zahlenangaben die bisherigen Gütergebnisse der Schweißnaht festzulegen.

Von der Güte der Schweißnaht hängen Anwendung und Anwendungsbereich aller Schweißverfahren in erster Linie ab. Die Güte der Schweißnaht ist wiederum in der Hauptsache abhängig von der Güte der Schweißeinrichtungen, von den Kenntnissen und der Fertigkeit des Schweißers, von der Güte des Arbeitsstücks und der des Zusatzwerkstoffs; hierüber ist in den vorhergehenden Abschnitten das Wesentlichste gesagt worden. Es fehlt noch die Feststellung der Schweißnahtgüte selbst. Dies ist die Aufgabe der Schweißnahtprüfung. Sie soll aber nicht nur einen bestimmten Gütegrad erkennen lassen, sondern auch die Fehler der Schweißnaht zeigen und damit zu Verbesserungen anregen. Daher sind neben der möglichst einfachen Prüfung für den Betrieb auch weitgehende wissenschaftliche Untersuchungsverfahren nicht zu entbehren.

Prüfung der Schweißnaht. Ein Universalprüfgerät, das Wertaussagen über Schweißnähte jeder Art und Abmessung und in jeder Lage des Werkstücks zuverlässig angibt, kann nach dem jetzigen Stande der Prüfgerätetechnik nicht erwartet werden. Die meisten Prüfverfahren haben ein beschränktes Anwendungs- und Auswertungsgebiet. Die Auswertung richtet sich nach den Gesichtspunkten: Prüfung der Schweißer (Arbeitsprüfung), Prüfung der Schweißverbindung (Abnahmeprüfung), Prüfung der Werkstoffe und Zusatzstoffe (Werkstoff- und Elektrodenprüfung), Prüfung des Schweißverfahrens (Verfahrensprüfung). Man unter-

scheidet heute grundsätzlich nach Prüfverfahren ohne Zerstörung der Schweißnaht, wie sie der praktische Schweißbetrieb braucht, und solchen mit Zerstörung der Schweißnaht, die auch Rückschlüsse für praktische Schweißungen erlauben, manche Schweißfehler aber besser erkennen lassen und damit zu Verbesserungen anregen. Für beide Gruppen von Prüfverfahren sind eine Anzahl einzelner Verfahren in Gebrauch, über die zunächst noch folgender näherer Überblick gegeben sei.

Prüfungen ohne Zerstörung der Schweißnaht (und ihre Anwendungsgebiete):

1. Äußerer Befund (Prüfung auf Sauberkeit, Poren, Überhitzung usw.).
2. Dichtigkeit (bei Behältern, Rohren, Gefäßen).
3. Schallprüfung (bei Behältern u. dgl., in Deutschland nicht in Anwendung).
4. Härteprüfung (für Auftragsschweißungen, auch bei Behältern usw.).
5. Elektromagnetische Prüfung (Feststellung von Rißbildungen).
6. Röntgen- und Gammastrahlen (Feststellung von Gasblasen, Schlackeneinschlüssen, Rissen und Bindungsfehlern).
7. Nahtschwächende Prüfung (für Stichproben).
8. Belastungsprobe (durch Gewichte, Wasserdruk u. dgl., für fertige Bauteile).

Prüfungen mit Zerstörung der Schweißnaht (und ihre Auswertung):

1. Zugversuch (zur Prüfung der Schweißnaht, der Schweißverbindung und des Schweißers).
2. Werkstatt-Biegeprobe (einfachste Schweißverbindungs- und Schweißerprüfung).
3. Biege- (Falt-) Versuch (einfacher Versuch zur Prüfung der Verformungsfähigkeit von Schweißverbindungen).
4. Schmiedeprobe (Werkstoffprobe auf Schmiedbarkeit der Schweißnaht).
5. Härteprüfung (hauptsächlich für Auftragschweißungen).
6. Kerbschlagversuch (für die Elektrodenprüfung und für Sonderprüfungen).
7. Dauerfestigkeitsprüfung (Prüfung der Schweißverbindung).
8. Belastungsproben (Prüfung der Schweißverbindung).
9. Metallographische Prüfungen (Gefügebau der Schweißverbindung und Schweißnaht, Art der Warmbehandlung, Risse, Einschlüsse usw.).
10. Chemische Prüfungen (Werkstoff, Schweißnaht, Elektroden, Korrosion).

Messungen von Schweißspannungen. Dieser Frage hat man sich erst in neuerer Zeit mehr zugewandt. Sie ist von großer Bedeutung sowohl für die Berechnung wie für die Ausführung von Schweißverbindungen, da die Güte der Schweißung in weiterem Sinne nicht nur von der Festigkeit der Schweißnaht selbst, sondern auch von den auf die Schweißnaht und den benachbarten Werkstoff ausgeübten Schweißspannungen abhängt.

B. Prüfungen ohne Zerstörung der Schweißnaht¹.

Prüfung des äußeren Befundes. Diese Prüfung ist bereits im Abschnitt III C 1 b (Aussehen der Schweißnaht) an Hand mehrerer Abbildungen behandelt worden. Sie kann nur grobe Fehler, wie z. B. schlechte Schweißraupen, nicht genügendes Durchschweißen, Poren, starke Überhitzung usw., zeigen und muß daher unbedingt durch weitere Prüfungen ergänzt werden. Hinzuweisen ist jedoch noch auf die

¹ Siebel: Handbuch der Werkstoffprüfung, Bd. I u. II, 1940.

Gefahr der Übergangskerben, die besonders groß ist, wenn die Kerben quer zur Beanspruchungsrichtung liegen.

Eine erste einfache Ergänzung ist die Prüfung mit einer einfachen oder einer binokularen Lupe, die sich bei Schiffsschweißungen bewährt hat. Jedoch ist Vorsicht am Platze, da gut aussehende Nähte doch in der Wurzel Bindefehler oder Schlackeneinschlüsse enthalten können.

Prüfung auf Dichtigkeit. Übergießt man die mit einem kleinen Damm aus Kitt umgebene Schweißnaht mit Petroleum und bestreicht man die andere Nahtseite mit Kreide, so zieht das Petroleum an undichten Stellen durch und färbt die Kreide dunkel. Ähnlich kann man auch durch leichtflüssiges Öl Risse erkennen, indem man das Öl in die Schweißnaht eindringen läßt und nach Abwischen des Restes die Naht mit in Spiritus angerührter Schlemmkreide bestreicht. Nach kurzer Zeit zeichnet sich auf der Kreide der Riß durch das Öl dunkel ab. Hierhin gehört auch die Druckprobe mit Luft, Wasser oder Öl, die, ausgenommen die Luftdruckprobe, bis zur Streckgrenze des Werkstoffs ausgedehnt werden kann.

Schallprüfung. Mit einem Hörrohr werden Klangunterschiede abgehört, die sich beim Anschlagen der Schweißnaht mit einem Hammer an den verschiedenen Stellen ergeben. Das Verfahren hat sich bis jetzt nicht als praktisch verwertbar erwiesen.

Härteprüfung. Insbesondere für Auftragsschweißungen kommt eine einfache Härteprüfung in Betracht. Bei dem Kugeldruckversuch nach Brinell (s. DIN 1605, Blatt 3) wird eine gehärtete Stahlkugel von 2,5...10 mm Durchmesser mit bestimmter Belastung (z. B. 3000 kg für Stahlsorten bei 10 mm Kugeldurchmesser) in die Oberfläche der Schweißnaht hineingedrückt (Abb. 352). Die Brinellhärte ist dann das Verhältnis: Belastung P in kg zu eingedrückter Kalottenfläche f in mm^2 . Die Zugfestigkeit eines Kohlenstoffstahls (von 30...100 kg/mm² Zugfestigkeit) ist $\approx 0,36 \cdot$ Brinellhärte und die eines Chromnickelstahls (von 65...100 kg/mm² Zugfestigkeit) $\approx 0,34 \cdot$ Brinellhärte, so daß man mit dieser verhältnismäßig einfachen Probe gleichzeitig Härte und Zugfestigkeit ermitteln kann. Übrigens beträgt bei Schweißen diese Umrechnungszahl nach Matting für Kohlenstoffstahl nicht 0,36, sondern 0,29...0,32, bei Abrennschweißungen nach Kilger 0,325 für weichen Kohlenstoffstahl. — Beim Rockwell-Härteprüfer (s. DIN, DVM Prüfverfahren A 103) werden harte Werkstoffe mit einer Diamantkegelspitze, weiche mit einer Stahlkugel geprüft, die zunächst unter Vorlast (10 kg) auf die zu prüfende Fläche gedrückt wird. Die Meßuhr wird auf Null gestellt, und dann wird die Hauptlast (z. B. 150 kg) aufgebracht. Die Skala der Meßuhr gibt gleich die Rockwell-Härtegrade an. — Der Vickers-Härteprüfer (s. DIN Vornorm, DVM Prüfverfahren 133) entspricht grundsätzlich der Brinellpresse, arbeitet aber genauer. Eine Diamantpyramide wird mit 0,5...120 kg Belastung in die Oberfläche des Werkstoffs hineingedrückt. Aus den Diagonalen der Eindruckfläche wird die Eindruckoberfläche bestimmt. Härte (wie bei Brinell) = Druckkraft : Eindruckoberfläche in kg/mm². — Bei dem Mikrohärteprüfer Zeiß nach Hanemann wird eine Diamantpyramide von 0,8 mm Durchmesser auf die Frontlinse des Objektivs gesetzt, so daß mit demselben Objektiv der Härteeindruck erzeugt und beobachtet werden kann (Eindruckkraft 0,2...100 g).

Unter den dynamischen Härteprüfgeräten sind die Schlag- und Fallhärteprüfer und die Rücksprunghärteprüfer hervorzuheben. Bei den Schlag- und Fallhärteprüfern (Bauarten Graven, Poldihütte, v. Schwarz u. a.) wird eine gehärtete Stahlkugel von 5...10 mm Durchmesser durch eine Feder, einen Hammer-

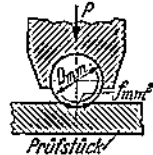


Abb. 352. Brinellscher Kugeldruckversuch.

schlag oder ein fallendes Gewicht in die Oberfläche des Probestücks hineingetrieben. Man kann dann als Vergleichswert nehmen das Verhältnis: Schlagarbeit in mkg zu Kugeleindruckvolumen in mm^3 (Fallhärtezahl). Besser ist aber die Umrechnung auf Brinellhärte, um einen neuen Wert zu vermeiden. — Bei dem Rücksprünghärteprüfer nach Art des Skleroskops von Shore fällt ein kleiner Stahlhammer in einer Glasröhre auf das Prüfungsstück herab. Die an einer Einteilung ablesbare Strecke, um die der Hammer zurückspringt — es gibt auch selbstanzeigende Skleroskope —, gilt in diesem Falle als Härtezahl. Brauchbare Werte ergeben sich nur bei Versuchen an einem bestimmten Werkstoff, z. B. Stahl, und bei ständiger Benutzung ein und desselben Skleroskops. Die dynamischen Prüfgeräte sind einfacher und billiger als die statischen, die Versuchsergebnisse aber nicht ebenso zuverlässig, weshalb sie bei Prüfung der Schweiße nur selten angewendet werden.

Elektromagnetische Prüfung. Feinporige Schweißungen, Lunker, Bindungsfehler, Risse, Strukturfehler u. dgl. setzen dem Durchgang des elektrischen Stromes oder eines durch Magneten erzeugten Kraftlinienflusses höheren Widerstand entgegen als die glatte gute Schweißung. Dies kann man auf einfachste Weise an Eisenfeilspänen feststellen, die auf ein über die Schweißnaht gelegtes lichtempfindliches Papier aufgestreut werden. Links und rechts der Schweißnaht mögen Elektromagnete stehen. Dann werden bei einer guten Schweißnaht die Feilspäne gleichmäßig verteilt liegen, bei schlechten Schweißstellen werden sie aber stärker angehäuft daliegen (zuerst 1927 von Roux eingeführt). Aus Abb. 353,

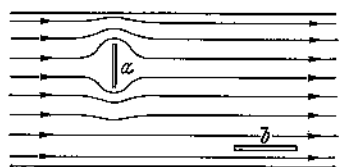


Abb. 353. Kraftlinienverlauf an zwei Fehlstellen.

die den Kraftlinienverlauf an zwei Fehlstellen wiedergibt, ist weiterhin zu erkennen, daß bei dem gezeichneten Verlauf der Kraftlinien nur der Fehler *a* erkannt wird, nicht aber der Fehler *b*, weil er keine Unterbrechung des magnetischen Flusses bewirkt. Das Werkstück muß also in zwei aufeinander senkrechten Richtungen magnetisiert werden — ganz allgemein gesehen sogar in drei zueinander rechtwinkligen Richtungen —, um alle Fehler zu erkennen. In den meisten Fällen wird

die Magnetisierung in zwei Richtungen genügen, weil der Verlauf der Risse von der Art des Prüfkörpers abhängig und damit voraussichtlich bekannt ist; in manchen Fällen genügt auch eine Richtung.

Das neuere Magnetpulververfahren¹ berücksichtigte zunächst die Erfahrung, daß bei trocken aufgestreuten Feilspänen die Fehlererkennbarkeit gering ist. Man ging infolgedessen dazu über, feinstes Eisenpulver (graues Karbonyleisenpulver oder schwarzes Eisenoxyd) in einem geeigneten Öl aufzuschwemmen und dieses Gemisch (Metallöl genannt) über die Schweißstellen zu gießen. Durch den nun zwischen Werkstück und Feilspan vorhandenen Ölfilm wurde die Beweglichkeit der Feilspäne und damit die Empfindlichkeit des Verfahrens wesentlich vergrößert. Man baut heute Geräte für Magnetfremderregung, für Wechselstromdurchflutung, vereinigte Geräte und Stoßmagnetisierungsgeräte. Bei der Magnetfremderregung (Ferroskopverfahren) wird Gleichstrom verwendet und das Werkstück waagrecht zwischen den Polen eingespannt. Für die Schweißnähte großer Werkstücke oder Bauteile hat sich eine tragbare Ausführung, der Tunnelmagnet, bewährt, der in Abb. 354 wiedergegeben ist. Beim Wechselstrom-

¹) Siemens Z. 1940, Heft 2. — Stahl u. Eisen 1940, S. 225. — Berthold: Atlas der zerstörungsfreien Prüfverfahren, 1938.

durchflutungsgerät (Ferrofluxverfahren) wird mit Stromstärken von 500...4000 A ein ringförmiges Magnetfeld um die Längsachse des Prüfkörpers erzeugt, das sich also vor allem für die Feststellung von Rissen, die parallel zur Längsachse (der Stromachse) liegen, und damit für Massenprüfungen eignet. Da die Gleichstromfremderregung in erster Linie für Längsmagnetisierung, die Wechselstromdurchflutung für Quermagnetisierung in Frage kommt, vereinigt man oft beide Verfahren in einem Prüfgerät. Ein solches vereinigt Prüfgerät mit motorisch angetriebener Einspann- und Drehvorrichtung zeigt Abb. 355. Dabei sei noch auf die besondere Leuchte hingewiesen, bei der eine mattweiß rückstrahlende Oberfläche von einer verdeckt angeordneten Stablampe angestrahlt und so eine günstigste Beleuchtung des Prüfkörpers geschaffen wird. In der Serienprüfung von Kleinteilen wendet man das Magnetstoßverfahren (Ferropulsverfahren) an. Hierbei wird das Prüfstück durch einen kurzen starken Stromstoß, bleibend (remanent) magnetisiert und dann mit Metallöl gespült und untersucht. In den meisten Fällen müssen auf diese Weise geprüfte Körper vor ihrer Verwendung wieder entmagnetisiert werden.

Ein mittleres vereinigt Prüfgerät kostet etwa 4000 RM., ein großes 8000 RM. Die Kosten für Strom und Metallöl betragen nur 0,05...0,10 RM./h. Dazu kommen aber Unterbringungs-, Lohn- und Beförderungskosten, so daß die Gesamtkosten (einschl. Verzinsung und Abschreibung) etwa 2 bis 3 RM./h betragen, wovon

50...60 vH auf Löhne entfallen. — In der Reihenfertigung hat sich das Magnetpulververfahren bereits als sehr wichtig erwiesen. Hinsichtlich der Anwendung in der Schweißtechnik ist zu beachten, daß die Tiefenwirkung gering ist und das Verfahren zwar gut auf Rißbildungen in der Oberfläche, wenig dagegen auf Poren, Schlackeneinschlüsse usw. anspricht. Die Deutung der Pulveranhäu-



Abb. 354. Tunnelmagnet.

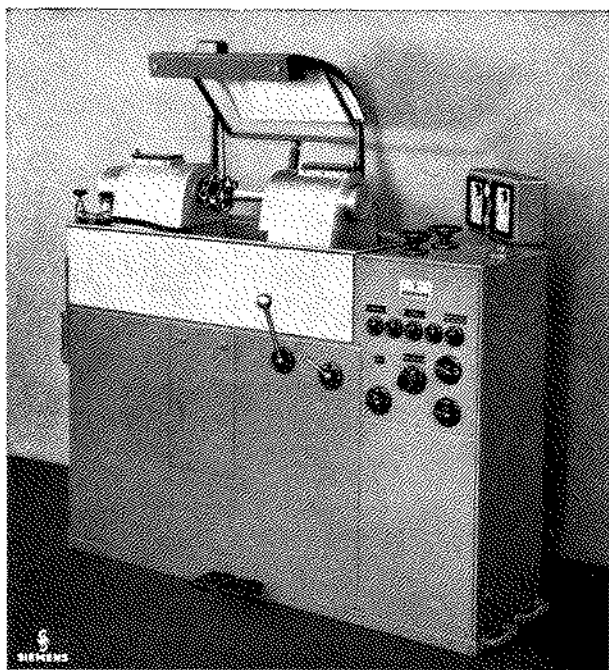


Abb. 355. Risseprüfer für Längs- und Quermagnetisierung.

fungen ist mit Vorsicht, am besten nur von einem erfahrenen Fachmann vorzunehmen.

Eine andere Form der elektromagnetischen Prüfung, das magnetinduktive Verfahren, hat zur Ausbildung des I. G.-Schweißnahtprüfers geführt. Der durch Dauermagnete erzeugte Kraftlinienfluß ruft in einer von Hand über die Schweißnaht geführten Schwingspule einen schwachen elektrischen Strom hervor. Fehler in der Schweißnaht sind in einem an die Schwingspule angeschlossenen Kopfhörer als Änderung der Lautstärke und Klangfarbe zu hören oder aber auch durch Ablesung eines Zeigergeräts festzustellen und z. B. durch Röntgenprüfung oder Anfräsung (s. die folgenden Abschnitte) nachzuprüfen. Das Verfahren hat nicht die Bedeutung erlangt, die man ihm zunächst zusprach.

Röntgenprüfung¹. Die Werkstoffdurchleuchtung beruht darauf, daß die Werkstoffe durch kurzwellige (harte) Röntgenstrahlen durchdringbar sind, und daß

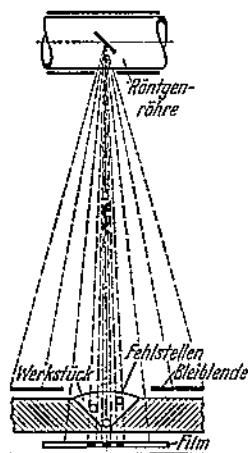


Abb. 356. Entstehung und Wirkung der Röntgenstrahlen.

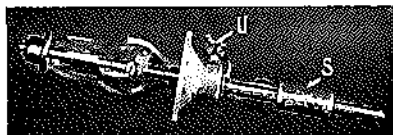
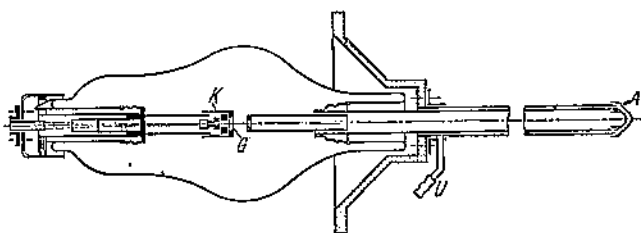


Abb. 357. Schnitt und Ansicht einer Hohlanodenröhre.

diese Strahlen je nach den Hemmungen, die sie im Werkstück finden, einen Leuchtschirm mehr oder weniger stark zum Aufleuchten bringen, bzw. eine photographische Platte oder einen doppelseitig begossenen Röntgenfilm mehr oder weniger stark schwärzen. Abb. 356 zeigt zunächst das Grundsätzliche in der Anordnung des Prüfgeräts im Normalfall. Zur wirtschaftlichen Untersuchung von Rundschweißungen an Rohren und Behältern dient heute die Hohlanodenröhre, wie sie Abb. 357 in Schnitt und Ansicht wiedergibt. Die Anode A besteht aus plattiertem Kupfer, K ist der Kathodenkopf und G der Glühdraht. U ist ein Wasserkühlstützen. Die Röntgenstrahlen treten hier durch die Kupferwand bei A unter einem Raumwinkel von etwa 200° nach allen Seiten hin aus. Zum Betrieb der Röntgenröhren werden Umspanner verwendet, die zunächst einen hochgespannten Wechselstrom von $40\,000 \dots 500\,000 \text{ V}$ ($= 40 \dots 500 \text{ kV}$) erzeugen. Dieser Wechselstrom wird dann mit Hilfe von Glühventilröhren in Gleichstrom verwandelt. Die marktgängigen Röntgenröhren haben Spannungen von 40 kV (für Gemäldeprüfung), 100 kV (dünnwandige Leichtmetalle), 150 kV (Hohlanodenröhren für Rundnähte), 200 und 250 kV (dünn- und dickwandige Stahlschwei-

¹ Glocker: Materialprüfung mit Röntgenstrahlen. 2. Aufl. 1936. — Berthold: Atlas der zerstörungsfreien Prüfverfahren. 1938.

Bungen), 300 kV (Beton). Je geringer das Atomgewicht des Metalls, desto größer ist die Durchdringbarkeit. Bei 200 kV Röhrenspannung läßt sich noch eine Werkstoffdicke von 50 mm bei Kupfer, 70 mm bei Stahl und 400 mm bei Leichtmetallen gut durchstrahlen. Die Fehlererkennbarkeit richtet sich nach der Röhrenspannung. Die nach Berthold durchstrahlbaren Grenzdicken in Stahl (bei 70 mm Brennfleckabstand, 5 mA Röhrenstromstärke und 10 min Belichtungsdauer) sind: 15 mm Stahl bei 100 kV, 70 mm Stahl bei 200 kV und 105 mm Stahl bei 300 kV Röhrenspannung. Die Fehlererkennbarkeit entspricht im allgemeinen (bei Stahl 1,0...1,3 vH der Werkstoffdicke) den Bedürfnissen der Praxis. Nach DIN 1914¹ müssen bei Röntgenaufnahmen an Schweißverbindungen Drahtstege mit Drähten bestimmter Durchmesser jeweils mit aufgenommen werden. Aus dem Durchmesser des dünnsten, auf der Aufnahme eben noch sichtbaren Drahtes im Vergleich zur Werkstückdicke wird festgestellt, ob die Aufnahmegenaugigkeit den Mindestanforderungen genügt. Nach DIN 1914 ist die Leuchtschirmuntersuchung — mit Ausnahme dünnwandiger Aluminiumverbindungen — nicht zu empfehlen und die Untersuchung mit Gammastrahlen wegen der geringen Strahlenintensität unmöglich. Die photographische Aufnahme — über 10 mm Stahldicke mit Verstärkerfolien — hat auch den Vorteil, daß sie ein bleibendes Beweisstück darstellt.

Ein normales Prüfgerät kostet 7500 RM. und erfordert bei $5\frac{1}{2}$ vH Zinsen und $33\frac{1}{3}$ vH Abschreibung (wegen des rauen Werkstattbetriebs und der schnellen Entwicklung im Gerätebau) nebst Dunkelkammer- und Unterbringungskosten etwa 3680 RM. Jahreskosten. Nach umfangreichen Untersuchungen Gollnows², die mit denen der Reichsröntgenstelle gut übereinstimmen, betragen die Kosten der Röntgenprüfung von Stahlbauwerken etwa 10...20 RM./m Schweißnaht im Werk und etwa 15...30 RM./m auf der Baustelle, wobei die niedrigeren Zahlen für etwa 20 Aufnahmen je Tag und die höheren für etwa 10 Aufnahmen je Tag gelten. Dabei ergaben sich als Belichtungszeiten 3...12,7 min (je nach Werkstoffdicke, aber als Gesamtzeiten (vom Justieren der Röntgenröhre bis einschl. Abnahme der Kassette) 10...116 min. Nach Berthold betrugen (1938) im Stahlbau die Röntgenaufnahmekosten 1,5 vH der Gesamtkosten, was als tragbar zu bezeichnen ist, dagegen beim Bau dünnwandiger Behälter 10 vH und mehr der Gesamtkosten, was nicht mehr als tragbar anzusehen ist. Bei Reihenprüfungen werden unter der Voraussetzung voller Ausnutzung der Anlage die Kosten zu 5 RM./h (ohne photographisches Material) angegeben. Bei einer stichprobenmäßigen Prüfung, wie sie von Brandenburger³ vorgeschlagen wird und in der Schweiz üblich ist, liegen die Kosten naturgemäß wesentlich niedriger. Es fragt sich nur, ob diese Herabsetzung des Prüfungsumfangs vertretbar ist. Sicherlich bleibt der erzieherische Wert bestehen, aber diese Begründung kann einschl. der Kostenfrage in den Fällen nicht ausreichen, wo außer Sachwerten auch Menschenleben auf dem Spiel stehen.

Zur Deutung der Röntgenbilder sei zunächst allgemein darauf hingewiesen, daß alle schlechten Schweißstellen im Film (Positiv) als dunkle, im Abzug (Negativ) als helle Stellen auf dem dunklen Untergrund der Schweißnaht erscheinen, und zwar Poren und Gasblasen als Pünktchen, Schlackeneinschlüsse in einem wolkigen Aussehen, Bindefehler als schärfere Striche usw. Im einzelnen zeigt zunächst Abb. 358 eine fehlerhafte Schweißung an einem 15 mm-Blech, mit Schmelzmantelelektroden ausgeführt. Die hellen Stellen sind starke Schlackeneinschlüsse, die

¹ DIN 1914, Richtlinien für die Prüfung von Schweißverbindungen mit Röntgen- und Gammastrahlen.

² Siehe Stahl u. Eisen 1940, S. 221.

³ Siehe Autog. Metallbearb. 1941, S. 81.

von der Elektrodenumhüllung herrühren. In Abb. 359 sehen wir ziemlich scharfe helle Striche, die darauf hinweisen, daß nicht durchgeschweißt wurde. Demgegenüber zeigt Abb. 360 das Röntgenbild einer elektrisch geschweißten Kessellängsnaht,

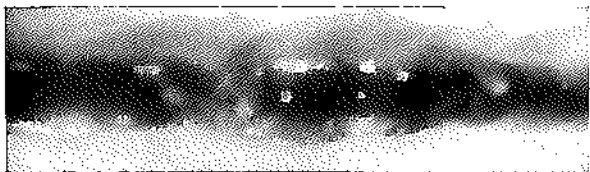


Abb. 358. Röntgenaufnahme (Naht mit Schlackeneinschlüssen).

das aus vier untereinander geklebten Streifen besteht und eine einwandfreie Schweißung über die ganze Nahtlänge erkennen läßt.

Prüfung mit Gammastrahlen. Die Durchleuchtung wird ähnlich wie bei Röntgenstrahlen durchgeführt, wobei an die Stelle der Röntgenröhre

eine Kapsel tritt, in der Radium oder Mesothorium untergebracht ist. Die in Frage kommenden besonderen Radiumstrahlen, die Gammastrahlen, sind härter

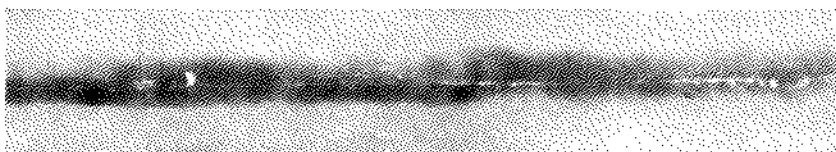


Abb. 359. Röntgenaufnahme (nicht durchgeschweißte Naht).

(kurzwelliger) als die Röntgenstrahlen, wodurch die Unterschiede zwischen den hellen und dunklen Stellen auf dem Film weniger deutlich werden; die Belichtungszeiten sind viel länger, und die Durchdringungsfähigkeit der

Gammastrahlen ist bedeutend höher. Der Anwendungsbereich des Verfahrens ist vorläufig noch als gering anzusehen; es kommt praktisch nur dann in Frage, wenn die Röntgenstrahlen nicht mehr ausreichen, also z. B. bei sehr dickwandigem Stahl (bis 200 mm).

Nahtschwächende Prüfung.

Am bekanntesten ist das Prüfgerät von Schmuckler. Abb. 361 zeigt das Grundsätzliche des Verfahrens. Von einem Motor wird mit biegsamer Welle, bzw. unmittelbar gekuppelt,

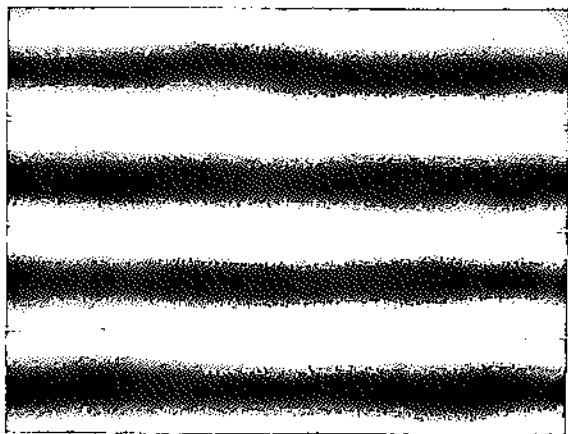


Abb. 360. Röntgenbilder der Längsnaht geschweißter Kessel.

ein besonderer Fräser *a* angetrieben, der ein Stück aus der Schweißnaht herausnimmt und gleichzeitig den Grundwerkstoff (Urstoff) mit anfräst. Die Prüfung der geöffneten Schweißnaht erfolgt dann mit bloßem Auge oder mit einer Lupe und wird noch genauer, wenn man die gefrästen Flächen poliert und mit einem der bekannten Ätzmittel, z. B. Kupferammoniumchlorid, anätzt. Wenn es sich z. B. um Schweißungen einfacher Stahlkonstruktionen handelt, so können

die Ausfräsungen unbedenklich offen bleiben; bei Brücken, Kesseln, Rohrleitungen usw. werden sie zweckmäßig wieder zugeschweißt. Das Gerät ermöglicht nur Stichproben und ist nur in der Hand eines erfahrenen Prüfers zuverlässig.

Belastungsprobe. Üblich und vielfach vorgeschrieben ist die Belastungsprobe durch Wasserdruck bei Kesseln und Behältern. Ferner kommt bei Eisenkonstruktionen und Brücken, seltener bei Maschinenteilen, die Belastung einzelner Konstruktionsteile vor dem Einbau oder die Belastung der ganzen Konstruktion durch Gewichte, Fahrzeuge, Preßvorrichtungen usw. in Betracht. Im allgemeinen wird in diesen Fällen nur der vorgeschriebene Höchstdruck bzw. die Höchstbelastung im Betriebe nachgeprüft; nur ausnahmsweise ist man bis zur Streckgrenze des Werkstoffs gegangen.

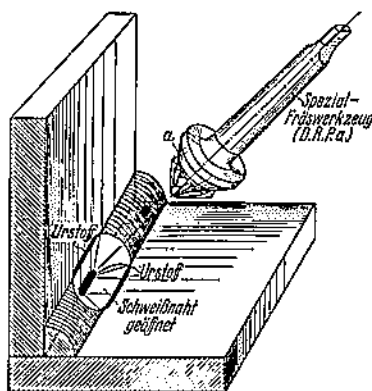


Abb. 361. Prüfgerät für Schweißnähte nach Schmuckler.

C. Prüfungen mit Zerstörung der Schweißnaht.

1. Festigkeitsprüfungen.

Zugversuch. Zunächst hat man den üblichen Zugversuch nach DIN 1605 und DIN-DVM, A 120 auf die Prüfung von Schweißungen übertragen, indem man die Zugfestigkeit des quer zur Längsrichtung geschweißten Stabes in kg/mm^2 und seine Bruchdehnung in vH feststellte und beide Werte mit den entsprechenden Werten des ungeschweißten Werkstoffs verglich. Mit neueren Schweißdrähten

geschweißte Verbindungen zeigen, ebenso wie bei der Widerstandsschweißung (s. Abb. 362) und bei der Gasschweißung, daß der Probestab sowohl bei der rohen wie bei der abgedrehten Probe fast immer außerhalb der Schweißstelle reißt. Man stellt dann naturgemäß eine Zugfestigkeit der Schweiße von mindestens 100 vH derjenigen des Urwerkstoffs fest, aber auch eine sehr günstige Bruchdehnung. Letztere rührt aber nur vom Urwerkstoff her, ist also als Dehnung der Schweißstelle ganz irreführend. Die wirkliche Dehnung der Schweißnaht, die man z. B. an einem nur aus Schweißwerkstoff angefertigten Stab messen kann, ist im allgemeinen noch gering und bei der Lichtbogenschweißung geringer als bei der Gasschweißung. Jedenfalls hat also die beim normalen Zugversuch ermittelte Bruchdehnung keine merkbare Bedeutung für die Beurteilung der Schweißnaht. Man verlangt daher im allgemeinen aus dem Zugversuch nur die Angabe der Mindestzugfestigkeit.

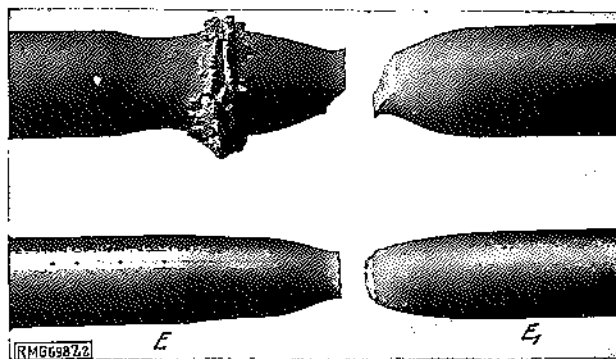


Abb. 362. Elektrisch nach dem Abbronnverfahren geschweißter Probestab, roh und abgedreht zerrissen.

Die Form des Probestabs für den Zugversuch ist genau festgelegt. Abb. 363 zeigt oben den langen Normalstab (Rundstab) und unten die übliche Form des Flachstabs. Neben dem langen gibt es auch den kurzen Normalstab, der,

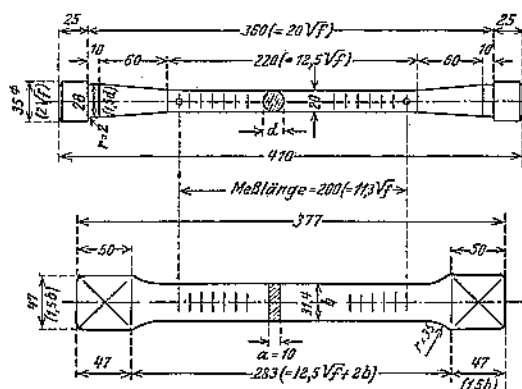


Abb. 363. Normal- und Proportionalzerreistab.

bei gleichem Durchmesser von 20 mm, anstatt 200 mm nur 100 mm Meßlänge hat. Um auch andere, insbesondere kleinere Stababmessungen verwenden und mit dem Normalstab vergleichen zu können, ging man zum Proportionalstab über, dessen Abmessungen in Abb. 363 oben und unten in Klammern angegeben sind. Der Einfluß der Meßlänge macht sich besonders bei der Dehnung bemerkbar. So sieht man z. B. aus DIN 1611 (Maschinenbaustahl), daß die Bruchdehnung δ_5 am kurzen Normal- oder Proportional-

stab — die Zahl 5 bei δ bedeutete Meßlänge $= 5 \cdot$ Stabdurchmesser — immer 1,2...1,25 mal so groß ist als die Bruchdehnung δ_{10} des Langstabs. In Tabelle 21 sind nochmals, zur besseren Übersicht, die sämtlichen nach DIN 1605, Blatt 2, zu unterscheidenden Zerreistbe zusammengefaßt.

Tabelle 21. Zerreistbe.

Bezeichnung der Probestabform	Meßlänge l_0 mm	Durchmesser d mm	Querschnitt F_0 mm ²	Zeichen für die Bruch- dehnung
Langer Normalstab . . .	$10 d = 200$	20	314	δ_{10}
Kurzer Normalstab . . .	$5 d = 100$	20	314	δ_5
Langer Proportionalstab .	$10 d = 11,3 \sqrt{F_0}$	beliebig	beliebig	δ_{10}
Kurzer Proportionalstab .	$5 d = 5,65 \sqrt{F_0}$	beliebig	beliebig	δ_5
Langstab	200	beliebig	beliebig	δ_l
Kurzstab	100	beliebig	beliebig	δ_k

Aus mehreren Gründen nimmt man für den Zugversuch bei der Schweißnahtprüfung nicht den Rundstab — was sich ja bei dünneren Blechen von selbst verbietet —, sondern den Flachstab, und hier wiederum in erster Linie nach DIN-DVM A 120 die in Abb. 364 wiedergegebenen Flachstabformen. Bei Stab I wird die Schweiwulst abgearbeitet; der Versuch dient zur Prüfung der Schweißverbindung, wobei es gleichgültig ist, ob der Bruch in der Schweiße, in der Übergangszone oder im Grundwerkstoff erfolgt. Bei Stab II wird auch die Nahtwulst abgearbeitet; der Versuch dient zur Prüfung der Schweißnaht. Die Kerbform bewirkt nämlich, daß der Bruch im allgemeinen in der Schweiße eintritt. Bei der Berechnung der Zugfestigkeit wird der geringste Stabquerschnitt zugrunde gelegt. Zu beachten ist die scheinbare Erhöhung der Zugfestigkeit (infolge der Kerbform) um etwa 10...20 vH. — Zur Prüfung der reinen Schweiße

kann aus dem Schweißgut ein Rundstab nach DIN 1605 (Abb. 363 oben) herausgearbeitet und wie ein normaler Stab geprüft werden.

Zugfestigkeitsprüfungen nach DIN 4100 und 4101. Zur Prüfung der Schweißer werden hierbei sowohl Kehlnähte wie Stumpfnähte untersucht. Bei der Untersuchung von Stirnkehlnähten wird die Kreuzprobe (Abb. 365) angewandt. Die herausgeschnittenen Probe­streifen sollen eine Zugfestigkeit $\sigma = P/F = 26 \text{ kg/mm}^2$ bei St 37 und 39 kg/mm^2 bei St 52 erreichen, wobei (nach Abb. 365 unten) $F = 2 a' \cdot l$ (bei voller Kehlnaht) und $F = 2 a \cdot l$ (bei leichter Kehlnaht); hierin ferner l = Länge der Kehlnaht = Streifenbreite. Bei der Prüfung von Stumpfnähten werden zwei Bleche in waagerechter Lage durch V-Naht mit etwa 70° werkstattmäßig in $2 \cdots 3$ Lagen zusammengeschweißt. Die herausgeschnittenen Streifen sollen eine Zugfestigkeit von 37 kg/mm^2 bei St 37 und von 52 kg/mm^2 bei St 52 ergeben. Außerdem wird mit zwei Streifen von Stumpfnähten der nachher beschriebene Faltversuch durchgeführt.

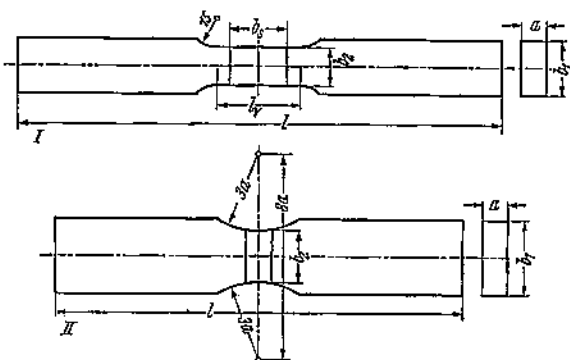


Abb. 364. Schweißflachstäbe für den Zugversuch.

Für die Prüfung von Leichtmetallen enthält DIN-Vornorm E 50123 Angaben über den Zugversuch von Schmelzschweißverbindungen und DIN Vornorm E 50124 den Scherzugversuch an Punktschweißnähten.

Zur Beurteilung einer Schweiße, die höheren Temperaturen ausgesetzt ist (z. B. Dampfkessel, Lokomotivfeurbuchsen) kann an Stelle des bisher behandelten Kaltzugversuchs der Warmzugversuch treten, d. h. der Probestab wird im erwärmten Zustande zerrissen.

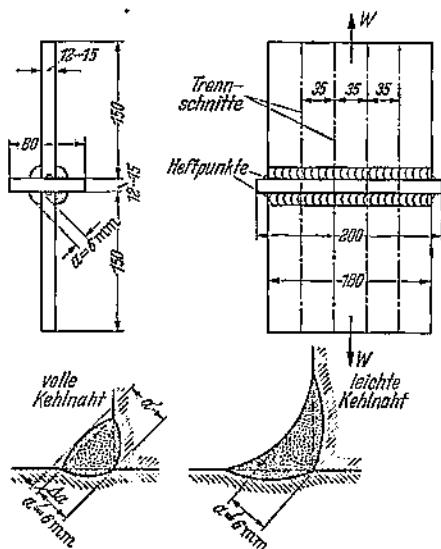


Abb. 365. Kreuzprobe nach DIN 4100.

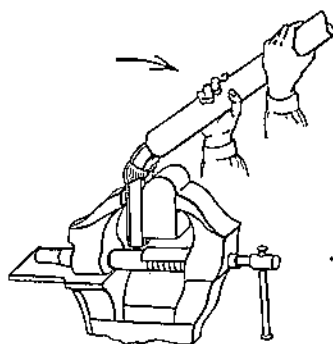


Abb. 366. Werkstattbiegeprobe.

Werkstattbiegeprobe. Für die werkstattmäßige Prüfung von Stumpfnähten ist die einfachste Biegeprobe die nach Abb. 366. Das Probestück wird in den

Schraubstock eingespannt und in der Pfeilrichtung am freien Schenkel umbogen bzw. umgeschlagen, im allgemeinen bis zum Aufbrechen der Naht. Diese Probe und die ihr ähnliche Winkelprobe nach DIN 4100, bei der zwei im Winkel von 90° durch eine Kehlnaht verschweißte Bleche in dieser Kehlnaht aufgeschlagen werden, sind sehr geeignet zur Prüfung des Schweißers (Arbeitsprüfung), dem hierdurch bei schlechter Schweißung leicht Schlackeneinschlüsse und nicht genügendes Durchschweißen nachgewiesen werden können.

Biege- (Falt-) Versuch. Der Biegeversuch an Schweißverbindungen nach DIN-Vornorm DVM, A 121 gibt Aufschluß über die Verformungsfähigkeit stumpfgeschweißter Verbindungen mit einer Mindestdicke von 5 mm. Für die Prüfung von Verbindungen mit weniger als 5 mm Dicke ist ein besonderes Normblatt in Vorbereitung. Für den Versuch sind Flachstäbe von 30 mm Breite vorzusehen, die gemäß Abb. 367 durch einen Stempel bestimmter Abmessung zwischen Rollen

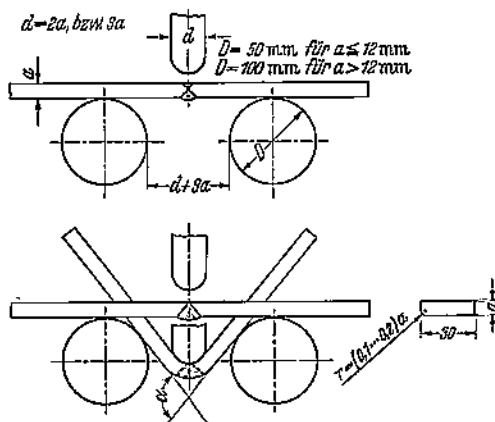


Abb. 367. Faltversuch mit Schweißproben.

gebogen werden. Der Rundungsdurchmesser des Stempels ist bei Stählen bis 42 kg/mm^2 Zugfestigkeit gleich der doppelten Blechdicke ($2a$), bei Stählen über 42 kg/mm^2 gleich der dreifachen Blechdicke ($3a$) zu wählen. Das Biegen soll stetig und möglichst in einem Zuge erfolgen. Wird die Probe vollständig zwischen den Auflagerrollen durchgedrückt, so beträgt der Biegewinkel etwa 160° . Wird ein Biegewinkel von 180° vorgeschrieben, so sind die Proben durch enger gestellte Rollen oder zwischen Einlegebacken im Schraubstock nachzubiegen. Der Versuch wird an Proben mit Wulst zur Prüfung des Schweißers (Arbeitsprüfung, DIN 4100) und an Proben ohne Wulst zur Prüfung des Werkstoffs (Schweißnahtprüfung, DIN 1913) ausgeführt. Als Maß der Verformungsfähigkeit wird der bis zum ersten Anriß erreichte Biegewinkel α (Abb. 367) angesehen. Die Wurzel der V-Naht liegt im Regelfalle auf der Druckseite der Probe. In Sonderfällen kann auch die Wurzel auf die Zugseite gelegt werden. Eine Schwierigkeit bei dem Versuch liegt stets darin, daß die Biegung der Probe schlecht in die Schweißnaht zu bringen ist, weil sich der Werkstoff der Schweißnaht wegen seiner gewöhnlich größeren Härte beim Biegen anders verhält als der Grundwerkstoff.

Nach Koch¹, der den besprochenen genormten Faltversuch einer Reihe anderer vorgeschlagener, bzw. im Auslande üblicher Verformungsprüfverfahren gegenüberstellte und auf Grund praktischer Versuche eine vergleichende Bewertung der verschiedenen Prüfverfahren ermöglichte, ist der genormte Faltversuch als billigstes und einfachstes Verfahren anzusehen, das für gewöhnliche Zwecke Werte ausreichender Genauigkeit ergibt. Der Hauptnachteil, das Auftreten starker Streuungen, wird bei fast sämtlichen Verformungsprüfverfahren beobachtet. Die Bemühungen, diese Erscheinung durch Einwirkung eines konstanten Biegemoments auf den Probestab zu verringern (Freibiegeversuch nach Block-

¹ Auszug aus der Habilitationsschrift von Dr.-Ing. Koch in Elektroschweißg. 1941, S. 2 u. f.

Ellinghaus) haben nicht zum Erfolg geführt. Außerdem ist wegen der erforderlichen Einspannung der Freibiegeversuch schwieriger durchzuführen und erfordert einen wesentlich größeren Zeitaufwand.

Für im Betrieb unter Warmbeanspruchungen stehende Schweißungen (z. B. bei Dampfkesseln) kann ein Warmbiegeversuch am Platze sein. Sodann dient der Abschreckbiegeversuch in besonderen Fällen zur Feststellung der Sprödigkeit. Die Probe wird auf eine Temperatur von etwa 650° gebracht, in Wasser von 28° abgeschreckt und anschließend dem Biegeversuch unterworfen. Auf die Aufschweißbiegeprobe wird im folgenden unter „Schweißrissigkeit“ kurz eingegangen.

Schmiedeprobe. Der Probestab von 300 mm Länge und 35 mm Breite ist bei Hellrot-Gelbglut in einer Hitze auf eine Strecke $= 10 \times$ Probedicke von der Mitte aus und auf die Hälfte der Blechdicke und Probenbreite ausgeschmieden. Der ausgeschmiedete Probeteil muß sich bei obiger Hitze um 360° verdrehen lassen, ohne Anrisse zu zeigen. Diese Probe auf Schmiedbarkeit der Schweißnaht läßt sich in jedem Betrieb ausführen.

Härteprüfung. Hier kann auf das im vorhergehenden Abschnitt B Gesagte verwiesen werden. In Anwendung sind vor allem die Kugeldruckprobe nach Brinell und nach Rockwell für Auftragschweißungen (s. DIN 1605, Blatt 3).

Kerbschlag- und Schlagzugversuch. Beim Kerbschlagversuch wird ein mit einer Kerbe versehener lose aufliegender Probestab mit Hilfe eines Pendelhammers durchschlagen und die Kerbzähigkeit (spezifische Schlagarbeit) in mkg/cm^2 gemessen. Beim Schlagzugversuch wird ebenfalls der vorerwähnte Pendelhammer benutzt. Der Probestab ist jedoch mit dem einen Ende in das Pendelgewicht selbst und mit dem anderen Ende in einen am Pendelgewicht sitzenden Bär eingeschraubt, der beim Durchgang des Pendels durch die tiefste Lage gegen Stoßflächen des Maschinenstells trifft und das eine Ende des Stabes zurückhält, während das andere Ende mit dem Pendel weiterschwingen will. Der Stab zerreißt infolge der ruckartigen Zugbeanspruchung, und es wird die zum Zerreißen erforderliche spezifische Schlagarbeit in mkg/cm^2 gemessen.

Für den Kerbschlagversuch (DIN, Vornorm, DVM-Prüfverfahren A 115) wird ein Pendelschlagwerk von 10...30 mkg benutzt, wie es in Abb. 368 angedeutet ist. Die Probe hat die Abmessungen $10 \times 10 \times 55$ mm (Abb. 368, rechts oben). Daneben wird auch die große Probe $30 \times 30 \times 160$ (Abb. 368, links unten) noch häufig gebraucht. Der Kerb kann durch Fräsen (Kerbformen a und c) oder Bohren und Sägen (Kerbform b) hergestellt werden. Am üblichsten ist die Probe mit Rundkerb (b). Die Abb. 369 zeigt sodann noch die Probeformen und Entnahmestellen an der Schweißnaht, wie sie in DIN Vornorm, DVM A 122 für den Kerbschlagversuch bei Schweißungen vorgesehen sind. Meistens wird die DVM-

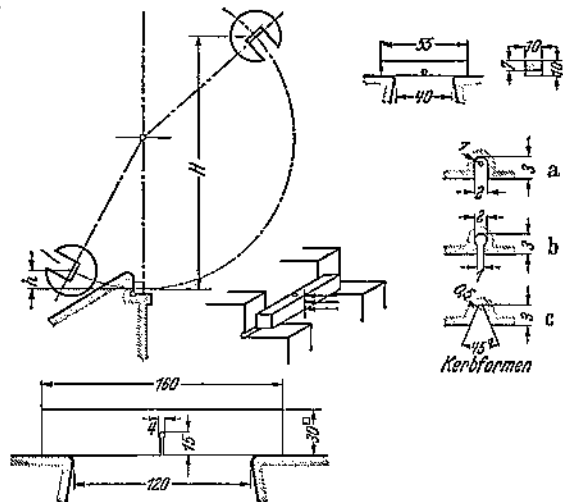


Abb. 368. Kerbschlagversuch.

Probe verwendet, die quer zur Schweißnaht entnommen wird (Abb. 369a). Um bei der Prüfung der Übergangszone zwischen Schweiß und Grundwerkstoff (Abb. 369b) den Kerb an der richtigen Stelle anbringen zu können, wird die Schnittfläche quer zur Schweißnaht geschlichtet und angeätzt. In Sonderfällen wird die Probe schräg in den Blechquerschnitt gelegt (Abb. 369c). Bei dickeren Werkstücken kann auch die VGB-Probe (15 × 30 × 160 mm, Kerb von 15 mm Tiefe und 4 mm Durchmesser am Kerbgrund) herangezogen werden. Sämtliche Proben

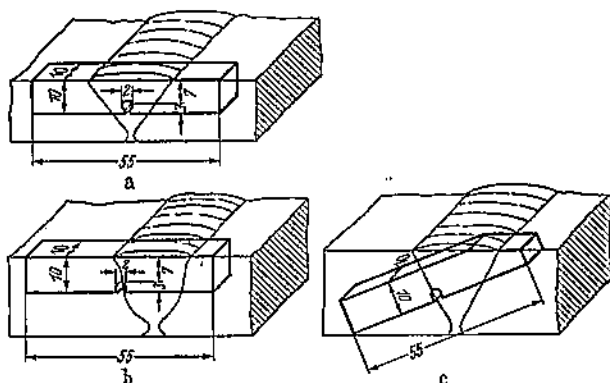


Abb. 369. Kerbschlagproben und ihre Entnahmestellen an Schweißnähten.

sind allseitig zu bearbeiten. Die Versuchstemperatur soll möglichst 20° betragen. Kerbschlag- und Schlagzugversuch sind reine Laboratoriumsversuche und erfordern große Sachkenntnis in der Auswertung. Man unterscheidet ganz allgemein zwischen Verformungsbruch (gute Dehnung) und Trennungsbruch (spröde). Proben verschiedener Abmessungen ergeben keine vergleichbaren Werte. Allgemeingültige Werte über die Beziehungen (Ähnlichkeitsgesetz) zwischen der Kerbzähigkeit und anderen Festigkeitseigenschaften liegen noch nicht vor. Es steht nur fest, daß im allgemeinen einer hohen Kerbzähigkeit auch eine gute Dehnung entspricht. Dagegen kann z. B. die Kerbzähigkeit nicht ohne weiteres als Maßstab für die dynamische Festigkeit einer Schweißverbindung angesehen werden.

Prüfung auf Dauerfestigkeit. Unter Dauerfestigkeit versteht man die an glatten Stäben mit polierten Oberflächen ermittelte größte wechselnde Beanspruchung eines Werkstoffs, die gerade noch beliebig lange und oft ertragen werden kann, ohne daß eine Bruchgefahr eintritt. Man drückt dabei den Wert der Dauerfestigkeit als Spannung aus, die nach den üblichen Formeln der Festigkeitslehre ermittelt wird (z. B. $\sigma = P/F$ für Zug- oder Druckbeanspruchung). Einwandfreie Werte der Dauerfestigkeit gibt nur das Wöhlerverfahren. Ein erster Probestab wird mit einer Last beansprucht, die sicher den Bruch herbeiführt. Ein zweiter Probestab erhält eine geringere Beanspruchung und so fort, bis der letzte nach einer bestimmten Anzahl von Lastspielen (die Maschinen zählen Lastspiele; ein Lastspiel gleich zwei Lastwechseln) nicht mehr bricht. Für den Versuch werden mindestens 4...6 Probestäbe benötigt. Nunmehr wird die Spannung σ_w (Abb. 370) in Abhängigkeit von der Lastspielzahl aufgezeichnet. Aus der Kurve, die schließlich parallel zur Waagerechten verläuft, wird die Dauerfestigkeit — in Abb. 370 mit etwa 18 kg/mm² — entnommen. Vorteilhaft ist die Anwendung eines logarithmischen Achsenkreuzes (Abb. 371), weil der Knick in der Kurve einen genaueren Wert ergibt. Die zur Ermittlung der Dauerfestigkeit erforderliche Lastspielzahl liegt bei Stahl zwischen $4 \cdot 10^6$ und $10 \cdot 10^6$, bei Kupfer und seinen Legierungen bei etwa $50 \cdot 10^6$ und bei Leichtmetallen wahrscheinlich bei etwa $200 \cdot 10^6$ Lastspielen. Man begnügt sich jedoch heute oft mit niedrigeren Werten, z. B. bei Stahl mit $2 \cdot 10^6$ und bei Leichtmetallen mit $50 \cdot 10^6$ Lastspielen. Werden Maschinenteile (z. B. im Flugzeugbau) nach einer bestimmten Zahl von Betriebsstunden durch neue Teile ersetzt, so können sie höher belastet werden, als es der

Wöhlerkurve entspricht. Diese höhere Spannung nennt man Zeitfestigkeit. Die zugehörige Lastspielzahl ist dann stets anzugeben.

Zur Durchführung der Dauerfestigkeitsversuche bedient man sich der Dauerschlagwerke, der Dauerbiegeprüfmaschinen, der Pulsatoren (Erschütterungsmaschinen)

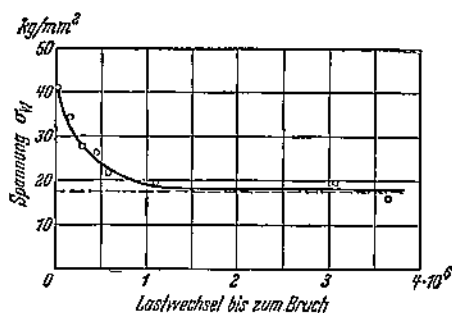


Abb. 370. Wöhlerkurve im metrischen Koordinatensystem.

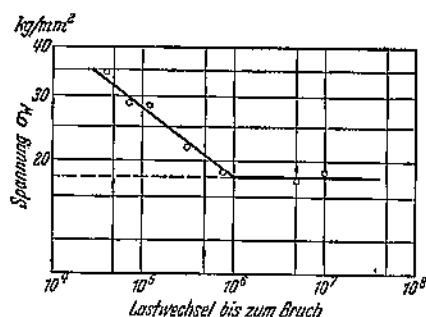


Abb. 371. Wöhlerkurve im logarithmischen Koordinatensystem.

und ganzer schwingender Fachwerkbrücken, der Schwingbrücken, in die die zu prüfenden Schweißstäbe, wie in Abb. 372 wiedergegeben, an bestimmten Stellen

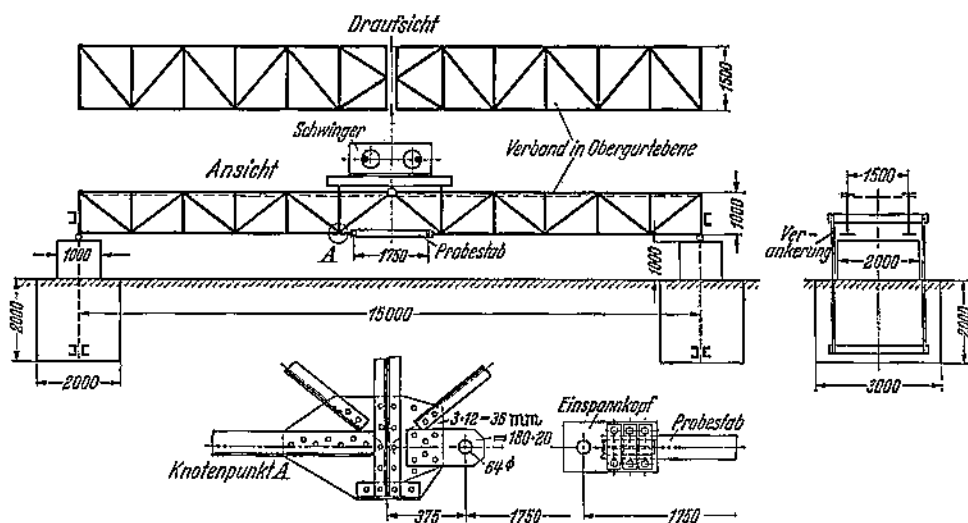


Abb. 372. Schwingbrücke.

eingebaut und durch den Schwinger mit der ganzen Schwingbrücke in Schwingungen versetzt werden.

Die Grundbegriffe für die Dauerfestigkeitsprüfung sind in DIN-Vornorm 54001 festgelegt. In Abb. 373 ist die Bezeichnung „Periode“ dasselbe wie „Lastspiel“. Man bezeichnet σ_o als Oberspannung, σ_u als Unterspannung und σ_m als Mittelspannung. Dann ist $\sigma_m = \frac{\sigma_o + \sigma_u}{2}$ und der Spannungsausgleich $\sigma_a = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{2}$.

Sodann gibt Abb. 374 die Überleitung zum Dauerfestigkeitsschaubild und einen Überblick über die verschiedenen Beanspruchungsarten. Man unterscheidet:

1. Die Wechselfestigkeit. Dies ist die Spannung, die der Werkstoff bei einer wechselnden Last (Änderung zwischen einem gleich großen positiven und negativen Höchstwert) dauernd ertragen kann.

2. Die Schwellfestigkeit (auch Ursprungsfestigkeit genannt). Dies ist die Spannung, die der Werkstoff bei einer schwellenden Last (Änderung zwischen Null und einer Höchstlast) dauernd ertragen kann.

3. Die Dauerstandfestigkeit. Dies ist die Grenzspannung für Zug oder Druck, unter der ein anfängliches Dehnen des Werkstoffs im Laufe der

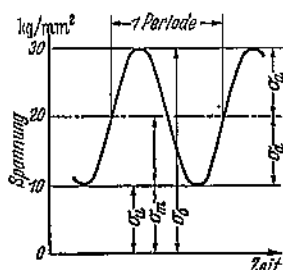


Abb. 373. Grundbegriffe für die Dauerfestigkeitsprüfung.

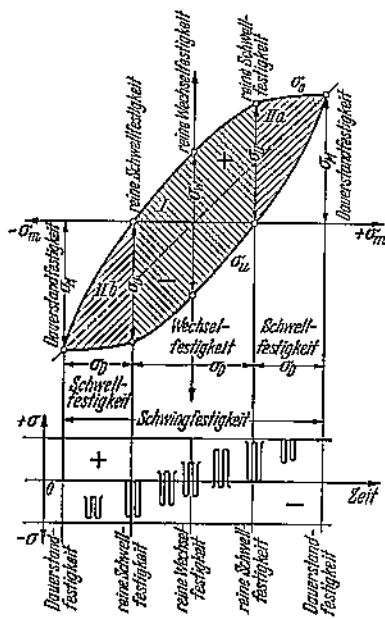


Abb. 374. Darstellung der Schwingbeanspruchungen.

Zeit noch zum Stillstand kommt, bei deren Überschreitung aber mit einem dauernden Dehnen bis zum Bruch zu rechnen ist. Zu ihrer Bestimmung sind Belastungsversuche von längerer Dauer für eine Reihe von Belastungsstufen unter Messung der eintretenden Dehnung erforderlich (s. DIN-Vornorm, DVM-Prüfverfahren A 117 und 118).

Nach Lehr ist etwa zu setzen die Dauerbiege-wechselfestigkeit = 0,47 der Biegezugfestigkeit bei ruhender Belastung und die Dauerzugfestigkeit = 0,35 der Zugfestigkeit bei ruhender Belastung. Bei diesem Vergleich können aber hohe Streuungen ($\pm 24\%$) vorkommen.

Der Aufbau eines Dauerfestigkeitsschaubildes, wie es für Berechnungen verwendet wird, zeigt schließlich Abb. 375. Die Senkrechte ist die Dauerfestigkeit σ_D , die Waagerechte gibt die Mittelspannung $\sigma_m = \frac{\sigma_o + \sigma_u}{2}$ an. Bei gleichem Maßstab

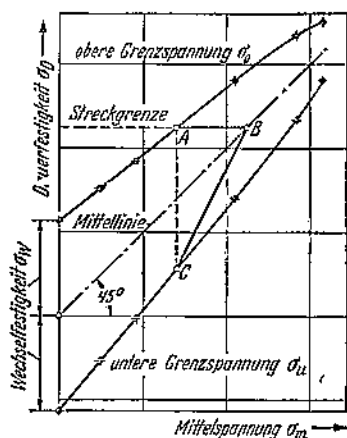


Abb. 375. Dauerfestigkeitsschaubild.

45°. Sie stellt die Vorspannung dar, um die die Dauerbeanspruchung schwingt. Bei der Vorspannung 0 wird die Wechselfestigkeit σ_w eingezeichnet. Entsprechend der steigenden Vorspannung (Mittelspannung σ_m) werden sodann die jeweiligen σ_o - und σ_u -Werte eingetragen und durch Linien miteinander ver-

bunden. Da eine über die Streckgrenze gehende Beanspruchung unzulässig ist, wird diese Streckgrenze, als Waagerechte AB ausgezogen, die obere Begrenzung des verwertbaren Teils des Dauerfestigkeitsschaubildes sein. Eine weitere Abgrenzung ergibt sich, indem von A das Lot gefällt und der Punkt C auf der unteren Grenzkurve mit B verbunden wird. Das Dauerfestigkeitsschaubild, wie es der Konstrukteur mit entsprechenden Angaben für eine bestimmte Stahlsorte verwendet, ist bereits früher in Abb. 194 wiedergegeben worden. Dort wurde auch ausgeführt, daß die Dauerfestigkeit durch Schweißnahtform, Schweißgüte und formbedingte Kerbwirkungen herabgesetzt wird und daß dies bei Berechnungen entsprechend zu berücksichtigen ist.

Belastungsprobe. Im Gegensatz zu den im Abschnitt B angeführten Belastungsproben wird hier der Höchstdruck (bei Kesseln und Behältern) bzw. die Höchstlast (bei Eisenkonstruktionen) so hoch gewählt, daß die Gesamtkonstruktion an irgendeiner Stelle zu Bruch geht. Man wird derartige, meist auch sehr kostspielige Proben nur dann durchführen, wenn einfachere Versuche zur sicheren Erkenntnis der Schweißnahtgüte nicht genügen. — Als Beispiel eines hierhin gehörenden Probeversuchs sei die Belastung eines Probestücks für einen geschweißten Blechträger angeführt¹. Ein Bockkran von 200 t Tragfähigkeit bei 22 m Stützweite und 29 m Schienenhöhe war vom Besteller in geschweißter Blechkonstruktion gewünscht worden. Hierbei trat die Frage auf, ob es unbedenklich sei, so große Einzelkräfte, wie sie durch den Katzraddruck einer 200 t-Katze auftreten, durch den geschweißten Obergurt auf den Blechträger zu übertragen. Ein Probestück von 1000 mm Länge und 600 mm Stehblechhöhe wurde auf einer hydraulischen Schmiedepresse mit 300 t belastet. Unter diesem Druck begann am Stehblech die Walzhaut an der Druckstelle unterhalb der Schweißnaht abzublattern. Die Quetschgrenze war also erreicht. An den Schweißnähten des Obergurts waren aber auch jetzt noch keine Anzeichen einer Zerstörung wahrzunehmen.

2. Festigkeitsergebnisse.

Widerstandsschweißungen an Stahl. Es sind hier, wie auch im folgenden, nur einige der wesentlichsten Versuche herausgegriffen. Für die elektrische Stumpf- und Abbremschweißung sind grundlegend die Versuche von Fücksel (1924) und Bock (1925). Fücksel prüfte Rundstäbe von 10, 20 und 50 mm Durchmesser aus handelsüblichem Siemens-Martin-Stahl von $34 \cdots 41 \text{ kg/mm}^2$ Zugfestigkeit. Bei den Zugversuchen riß damals schon die Mehrzahl der Probestäbe (bei der Abbremschweißung von 31 sogar 26) außerhalb der Schweißnaht. Bei der Stumpfschweißung zeigte sich deutlich, daß das Verschmieden der Wulst auf dem Amboß zu verwerfen ist, auch schon das Hammerglätten in der Maschine. Ist die Beseitigung der Stauchwulst erwünscht, so muß dies durch Abdrehen oder Abschleifen erfolgen. Den nachteiligen Einfluß des Verschmiedens der Wulst gibt auch sehr deutlich Abb. 376 wieder. Es ist ein mit Kupferammoniumchlorid geätzter Schliff in 1,4facher Vergrößerung. Die dunklen Stellen sind Phosphorseigerungen. Bedeutende Querrisse sind als Folge des Verhämmerns entstanden. — Bei den Versuchen von Bock wurden Proben von 25 mm Durchmesser aus weichem Flußstahl und solche aus schwerer schweißbarem Flußstahl mit 0,3 vH Kohlenstoff dem Zugversuch, der Härteprüfung und der metallographischen Prüfung unterworfen. Alle Stäbe hatten mindestens 100 vH der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs. Die Bruchdehnungsmessungen zeigten, daß der Stahl mit 0,3 vH Kohlen-

¹ Näheres siehe Demag-Nachr., Februar 1939.

stoff den hohen Temperaturen der Abbrennschweißung gegenüber doch schon deutlich empfindlicher ist als der weiche Flußstahl.

Kilger¹ untersuchte das Vorwärmen, Abbrennen und Stauchen weicher Kohlenstoffstähle (von 0,09...0,15 vH C). Zugversuche ergaben, auch bei Verwendung der eingekerbten Proben (s. Abb. 364 II), stets eine Zugfestigkeit der Schweiße von mindestens 100 vH derjenigen des Urwerkstoffs. Bei Dauerbiegeversuchen erhielt er die hohe Dauerbiegefestigkeit von 16,7...18,5 kg/mm² gegenüber 19,8 kg/mm² des Urwerkstoffs. Auf die sonstigen Ergebnisse dieser Arbeit hinsichtlich Einfluß des Stauchens auf die Festigkeit, Einfluß von Größe und Form der Schweißquerschnitte usw. kann hier nicht eingegangen werden. — Angaben der AEG. über Dauerbiegeversuche an abbrenngeschweißten Schienen beim Materialprüfamt Dahlem bestätigen mit 0,91 vH Dauerfestigkeit der Schweiße gegenüber dem Urwerkstoff die vorgenannten günstigen Ergebnisse. — Etwa

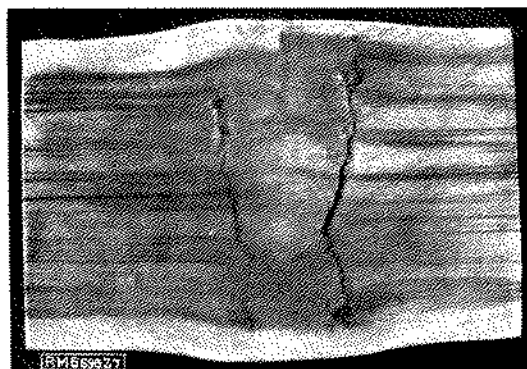


Abb. 376. Risse in einer geschüttelten Stumpfschweißung
($v = 1,4$).

dieselben Werte zeigen auch „Versuche mit geschweißten Eisenbahnschienen“ von Graf². Er betont dabei, daß aus dem Werk gelieferte Abbrennschweißungen sogar Dauerbiegefestigkeiten besaßen, die im Bereich der Werte für Vollschienen liegen. — Czernasty³ berichtet über „Fortschritte der Widerstandsabschmelzschweißung von legierten Kesselbaustoffen“. Die anfänglichen Schwierigkeiten der Abbrennschweißung legierter Stähle mit erhöhter Warmfestigkeit sind durch Anpassung der Schweißbedingungen (Höhe des

Stauchdrucks und der Stromstärke, Größe der Abbrennlänge und Vorschubgeschwindigkeit) beseitigt worden. Die nunmehr erzielten Schweißverbindungen von Mo-Cu- und Cr-Mo-Stahl bei Überhitzerrohrschlangen entsprechen weitgehenden Anforderungen. Durch Schweißung in Schutzgas sind bei Cr-Mo-Stählen, die wegen ihres Cr-Gehalts in der Schweißhitze leicht oxydieren, Oxydeinschlüsse weitgehend zu vermeiden.

Neuere wesentliche Versuche über Punkt- und Nahtschweißungen liegen nicht vor. Man kann sich aber leicht durch Zugversuche davon überzeugen, daß punktgeschweißte und (bei dünnen Blechen) auch nahtgeschweißte Bleche selten oder nie in der Schweißstelle reißen.

Widerstandsschweißungen an Nichteisenmetallen. Hier sind neuere Ergebnisse hauptsächlich nur hinsichtlich der Leichtmetalle zu verzeichnen. In den „Anleitungsblättern für das Schweißen und Löten von Leichtmetallen“⁴ wird angegeben, daß bei der Punktschweißung von Aluminium und Al-Legierungen bei einreihiger Schweißung eine Zugfestigkeit von 50...80 vH, bei zweireihiger Schweißung für einschnittige Verbindungen von 1...2 mm dicken Blechen eine solche von 70...90 vH des Urwerkstoffs zu erreichen ist. Die günstigsten Werte werden bei Reinaluminium erzielt. Die Nahtschweißung ergibt Festigkeitswerte

¹ H. Kilger: Fertigungstechnik und Güte abbrenngeschweißter Verbindungen, 1936.

² Siehe Z. VDI 1939, S. 1250.

³ Wärme 1938, S. 205.

⁴ VDI-Verlag, Berlin 1940.

von 70...80 vH der Blechfestigkeit. — Genauere Angaben sind in einer Arbeit von C. Haase, „Punkt- und Nahtschweißung von Leichtmetallen“¹ enthalten, über die Abb. 377 mit den Festigkeitswerten von Einzelschweißpunkten und Einzelnieten einen Teilüberblick gibt. Hierbei sind sowohl Aluminium- wie Magnesiumlegierungen berücksichtigt. Bei Dauerfestigkeitsversuchen geringeren Umfangs ergab sich bei Punktschweißungen von Al-Legierungen, daß die Schweißfestigkeit (Ursprungsfestigkeit) des Einzelpunktes etwa 0,2...0,33 seiner statischen Festigkeit beträgt. — Über „Widerstandsschweißung von Zinkblechen in der Massenfertigung“ liegt noch eine neue Untersuchung von H. Müller² vor, nach der Kastenblechschweißungen von 0,5 mm Dicke eine Zugfestigkeit von etwa 10 kg/mm² gegenüber 12 kg/mm² bei der gelöteten, 1 kg/mm² bei der gasgeschweißten und 17 kg/mm² beim Urwerkstoff ergaben. Normal erzielt man allerdings bei gasgeschweißten Nähten nach Versuchen von Horn (bei 1...2 mm Zinkblech) Zugfestigkeiten von 8...10 kg/mm² (gegenüber 17...19 kg/mm² des Urwerkstoffs).

Lichtbogenschweißungen von Stahl. Für die Schmelzschweißung waren die Versuche von Diegel, Neese, Höhn, Bock, Bardtke und der Forschungsgemeinschaft für Schmelzschweißung, Hamburg (in den Jahren 1922 bis 1931) grundlegend und richtunggebend.

Dauerfestigkeitsversuche mit Schweißverbindungen wurden in großem Umfang 1930...1934 vom Fachausschuß für Schweißtechnik im VDI durchgeführt. Aus dem Bericht³ sei zusammenfassend hervorgehoben, daß die Gas- und die Lichtbogenschweißung bei dynamisch beanspruchten Bauteilen im allgemeinen als gleichwertig anzusehen sind, daß die Dauerfestigkeit der geschweißten Verbindungen nicht wesentlich verschieden waren, ganz gleich ob es sich um Bauteile aus St 37, aus Schiffbaustahl S II oder aus St 52 handelte, und daß Verbindungen mit Schweißdraht von mäßiger Festigkeit, aber erheblicher Dehnung höhere Dauerfestigkeiten lieferten als Schweißwerkstoff, der höhere Festigkeit, aber geringere Dehnung besaß. Während man früher bei dynamisch beanspruchten Bauteilen rein gefühlsmäßig Kehlnähte für die zuverlässigere Bauweise hielt, erwiesen sich bei den Dauerversuchen gut ausgeführte Stumpfnähte als wesentlich besser. Es rührt dies daher, daß bei den Stumpfnähten der Kraftfluß viel natürlicher ist und ungestörter verläuft als bei Kehlnähten. Die hiernach im allgemeinen anzustrebende Verwendung der Stumpfnahat hat außerdem noch den Vorteil, daß die Stumpfnahat leichter auf ihre Brauchbarkeit mit Hilfe der bereits beschriebenen Prüfverfahren untersucht werden kann als die Kehlnahat. Die Dauerfestigkeit in der Form der früher erwähnten Schweißfestigkeit (Ursprungsfestigkeit) beträgt bei sorgfältig ausgeführten Stumpfnähten 18 kg/mm². — Andere

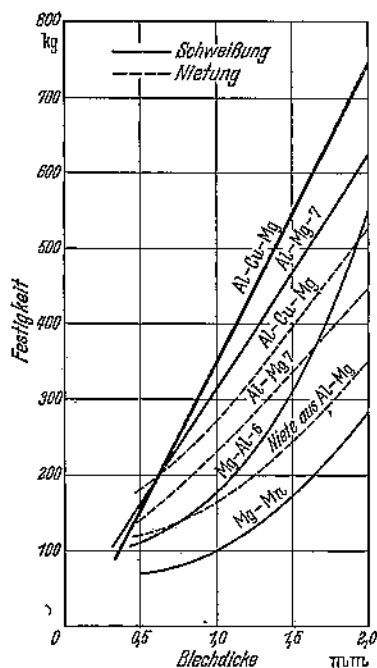


Abb. 377. Festigkeitswerte von Aluminiumlegierungen, punktschweißend bzw. gelötet.

¹ Z. VDI 1940, S. 89.

² Elektroschweißg. 1942, S. 1.

³ Dauerfestigkeitsversuche mit Schweißverbindungen. Berlin NW 7: VDI-Verlag 1935.

Dauerfestigkeitsversuche, so z. B. von Bierett, Thum usw., zeigten entsprechende Ergebnisse. Der Konstrukteur muß dahin streben, durch geeignete Formgebung einen möglichst gleichmäßigen Kraftfluß zu erzielen.

Prox berichtet (1932 und 1933) über Versuche an Kesseln mit der Lichtbogenonderschweißung der Firma Pintsch, Fürstenwalde, die mit Hilfe von Sonderelektroden ausgeführt wird und ein Normalglühen des Kessels nach dem Schweißen vorsieht. Erreicht wird fast durchgehend eine höhere Streckgrenze der Schweißnaht als die des Kesselblechs, stets ein Biegewinkel von 180° und z. B. bei 74 amtlichen Prüfungen eine durchschnittliche Kerbzähigkeit von 21 kg/cm^2 . Dauerfestigkeitsversuche ergaben am vollen Blech (von $20 \dots 21 \text{ kg/mm}^2$ Streckgrenze und 35 kg/mm^2 Zugfestigkeit) eine Schweißfestigkeit von 22 kg/mm^2 , bei x-Nachtschweißungen und abgearbeiteter Schweißwulst 20 kg/mm^2 und bei unbearbeiteten Schweißnähten 17 kg/mm^2 , also sehr hohe Werte. Während aber ein glatter Schweißstab bei einer Höchstlast von 19 kg/mm^2 ohne Anriß einen Lastwechsel von 2 Millionen ertrug, riß ein mit kleinen Bohrungen (seitlich der Naht) versehener Schweißstab schon bei $0,25 \dots 0,3$ Millionen Lastwechseln. Hieraus ist zu erkennen, daß regelmäßig vorkommende Fehler des Blechs auf die Dauerfestigkeit größeren Einfluß haben können als eine einwandfrei ausgeführte Schweißung. Ebenso wird bei Kesseln die Ablenkung des Kraftlinienflusses durch Bohrungen, Stützen usw. die Dauerfestigkeit stärker beeinflussen als die Schweißverbindung. — Nach den preußischen Erlassen von 1931, 1933 usw. darf die Festigkeit der genannten und anderer Sonderschweißungen bei Kesselblech I und (seit 1933) auch bei Kesselblech II ($41 \dots 50 \text{ kg/mm}^2$ Zugfestigkeit) bei Zugbeanspruchung mit 90 vH der Blechfestigkeit in Rechnung gesetzt werden. Auch brauchen die Schweißnähte nicht mehr mit Laschen gesichert zu werden. Bis dahin waren für die Schmelzschweißung an Kesseln 50 vH, in Sonderfällen bis 65 vH und an Dampffässern 70 vH zulässig; außerdem wurde bei Kesseln stets Laschensicherung der Schweißnähte gefordert. Entsprechend stellt sich Vigener bei Besprechung des neuen Entwurfs der „Werkstoff- und Bauvorschriften für Landdampfkessel“ ein¹, auf den im Abschnitt „Glühbehandlung“ nochmals eingegangen wird.

Belastungsproben an Konstruktionsteilen und Kesseln bis zum Bruch sind mehrfach durchgeführt worden. So hat z. B. die Gutehoffnungshütte schon 1923 einen doppelwandigen Fachwerkträger von 10 m Stützweite in allen Teilen elektrisch schweißen lassen und mit nach und nach gesteigerter Belastung zu Bruch gebracht, wobei keine Schweißnaht in Richtung der Stabkraft riß. — Czernasty berichtet (1932) über die Sprengung eines nach dem Pintschverfahren elektrisch geschweißten Versuchskessels von 1,5 m Durchmesser und 30 mm Wanddicke. Der zulässige Betriebsdruck betrug bei Verwendung von Flußstahl MI ($35 \dots 44 \text{ kg/mm}^2$ Zugfestigkeit) rund 30 at. Der Wasserdruckversuch ging in der Weise vor sich, daß der Druck allmählich erhöht wurde, unter zeitweiser Entspannung zur Vornahme von Dehnungsmessungen. Nach starker Verformung (Ausbauchung) riß der Kessel, wie es Abb. 378 zeigt, bei 155 at Druck von der Mitte des Mantels aus, und zwar im vollen Blech. An keiner Stelle riß eine Schweißnaht; auch trat in keinem Fall durch die Schweißnaht ein Richtungswechsel des Bruches ein.

Von neueren Arbeiten seien zuerst die „Untersuchungen über die Schweißbarkeit niedrig legierter Kesselbaustoffe“ von Czernasty angeführt². Er untersucht zunächst Blechwerkstoffe, und zwar Mangan-Silizium-Stahl und Molybdän-

¹ Siehe Z. VDI 1936, S. 1215.

² Siehe Dissertation Czernasty: Technischer Verlag, Berlin (Bd. XI der Veröffentlichungen des Zentralverbands der Preussischen Dampfkessel-Überwachungsvereine).

stahl, und ihre Schweißbarkeit nach dem Verfahren der Wassergas-Rollen-, Wassergas-Hammer-, Elektrolichtbogen- und Gasschweißung und stellt bezüglich der Lichtbogenschweißung fest, daß beim Mn-Si-Stahl die Ergebnisse der Zerreiß-, Biege- und Kerbschlagversuche nahe über oder unter den entsprechenden Blechwerten liegen. Die Gefügeprüfung bestätigt den einwandfreien Herstellungszustand der Schweißnaht. Noch günstiger sind die Ergebnisse beim Mo-Stahl unter Verwendung einer der Werkstoffzusammensetzung entsprechenden ummantelten Elektrode. Eine in dieser Weise hergestellte Schweißnaht stellt eine hochwertige Verbindung dar, die den höchsten Ansprüchen des Dampfkesselbaues gewachsen ist. Über die weiter in dieser Arbeit behandelten Rohrschweißungen wurde schon bei „Widerstandsschweißungen von Stahl“ kurz berichtet.

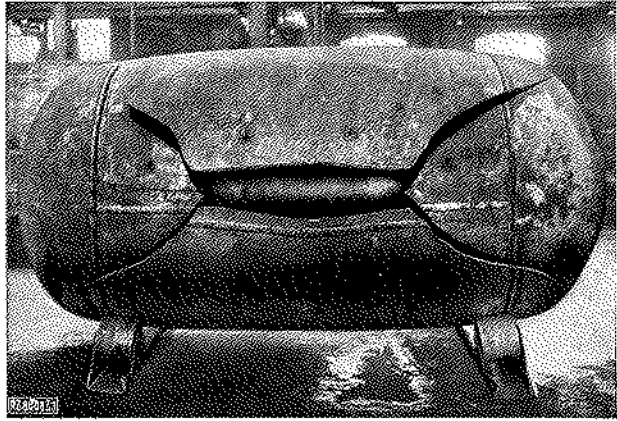


Abb. 378. Versuchsdruckkessel, nach dem Pintschverfahren geschweißt, gerissen bei 165 at.

Geschweißter Baustahl St 52. Während auf anderen Verwendungsgebieten günstige Erfahrungen mit der Schweißung von St 52 gemacht wurden, sind im Brückenbau 1936 an der geschweißten Eisenbahnbrücke über die Hardenbergstraße am Bahnhof Zoologischer Garten, Berlin, und 1938 an den geschweißten Vollwandträgern der Reichsautobahnbrücke bei Rüdersdorf Schadensfälle eingetreten, und zwar an Stellen, wo über 30 mm dicke Gurtplatten mit den Stegblechen verschweißt wurden. In Belgien sind in den Jahren 1938...1940 mehrere geschweißte Straßenbrücken über den Albertkanal teils zusammengebrochen, teils schwer beschädigt worden. In den letzten Fällen ist wohl überall weicher unruhiger belgischer Thomasstahl verwendet worden, der für unsere weitere Betrachtung als ungünstiger Werkstoff (höherer Phosphor- und Schwefelgehalt, schlechte Kerbschlagzähigkeit usw.) ausscheidet. Der Baustahl St 52 zeigt eine Steigerung der Zugfestigkeit in der beim Schweißen nicht vermeidbaren Aufhärtungszone auf etwa 100 kg/mm^2 und zugleich eine Verminderung der Dehnung von ursprünglich 20...25 vH auf etwa 10 vH. Er ist also, insbesondere bei größeren Blechdicken, stark bruchanfällig. Dies gab bereits 1937 Veranlassung zu der schon früher¹ behandelten Begrenzung der Legierungsbestandteile von St 52. Auf Grund weiterer Forschungsergebnisse wurde 1940 die baupolizeiliche Weisung für DIN 4100, wonach u. a. das Schweißen von Querschnitten aus St 52, die stärker als 20 mm sind, aus Sicherheitsgründen verboten war, wieder aufgehoben. Diese Forschungen haben u. a. gezeigt², daß die Beschaffenheit und die Prüfung des Baustahls der Gurte der Zugzone des geschweißten Trägers ausschlaggebende Bedeutung haben. Es handelte sich darum, einen Stahl zu erhalten, der nicht mehr — wie der frühere St 52 — leicht spröde Brüche (Trennbrüche), sondern Verfor-

¹ Siehe Abschnitt III C 5.

² Graf: Versuche zur Klarstellung von Schadensfällen an geschweißten Brücken. Z. VDI 1941, S. 357.

mungsbrüche ergab. Das Ziel erreichte man durch Anwendung eines Feinkornstahls, den man durch ein Sonderschmelzverfahren (Desoxydation mit Aluminium) erhält, und durch zusätzliches Normalglühen der Stahlplatten von mehr als 30 mm Dicke im Walzwerk. Bei den Erzeugnissen bestimmter Werke kann auf das Normalglühen verzichtet werden. Walzerzeugnisse von mehr als 50 mm Dicke aus St 52 dürfen vorläufig nicht verwendet werden¹. Um die Schweißempfindlichkeit des St 52 und anderer Werkstoffe zu erfassen, wurde die Aufschweißbiegeprobe (Abb. 379) mit in Rillen eingeschweißten Längsraupen entwickelt. Die nicht abgearbeitete Raupe liegt beim Biegen auf der Zugseite und ergibt nach mehr oder

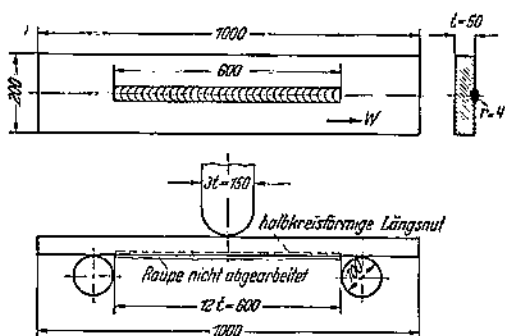


Abb. 379. Aufschweißbiegeprobe.

weniger starker Biegung Anrisse. Diese Probe wird zwar von verschiedenen Seiten als Kennzeichen der Schweißempfindlichkeit beanstandet, dürfte aber allgemein für die Beurteilung werkstofflich und herstellungstechnisch bedingter Einflüsse auf die Widerstandsfähigkeit einer Schweißverbindung wichtige Erkenntnisse liefern². Graf schlägt als gegenüber der Aufschweißbiegeprobe vereinfachtes Prüfverfahren die Kerbschlagprobe mit Schlitzkerb vor. Durch Vorwärmen³

und Spannungsfreiglühen wird auch eine größere Sicherheit gegen Rißgefahr erreicht, jedoch beeinträchtigen beide Wärmemaßnahmen die Herstellzeit und Wirtschaftlichkeit der geschweißten Stahlkonstruktion, so daß die Reichsbahn die notwendige Sicherheit im allgemeinen ohne solche zusätzliche Hilfsmittel zu erreichen sucht. —

Um bei der heutigen Erzeugungslage dem Thomasstahl wieder größere Anwendung für geschweißte Stahlkonstruktionen zu sichern, soll für Bleche unter 30 mm Dicke ein beruhigt vergossener Thomasstahl St 48 zugelassen werden, der bei der Aufschweißbiegeprobe befriedigt. — In letzter Zeit⁴ berichtete Mantel über „Silizium als Legierungselement in Baustahl St 52“ und stellte an Hand von Großzahlenswerten der im laufenden Betrieb erhaltenen Festigkeitswerte von Schweißversuchen fest, daß Stähle mit 0,95 vH Si (bei 0,95 vH Mn) sich ebenso gut verschweißen lassen wie der als gut schweißbar bekannte Stahl mit etwa 0,4 vH Si und 1,3 vH Mn.

Biegewechselversuche wurden u. a. an Dünnblechen von Flugzeugbaustählen ausgeführt, die nach dem Gas- und nach dem Arcatom-Schweißverfahren verschweißt worden waren⁵. Gegenüber den im bisherigen Schrifttum enthaltenen Angaben ergaben sich bei Schweißungen nach beiden Verfahren die wesentlich höheren Biegewechselfestigkeiten von 22...25 kg/mm² bei Cr-Mo-Stählen oder Izzt-Stählen von etwa 54...80 kg/mm² Zugfestigkeit. Die Werte gelten für eine mittlere Blechdicke von 1,8 mm bei werkstattmäßigen Schweißungen.

Festigkeitsversuche an Kesselschweißungen nach dem Elliraverfahren hergestellt, zeigen nach Aureden⁶, daß Zugfestigkeit des eingeschweißten Werkstoffs

¹ Z. VDI 1941, S. 460.

² U. a. Stahlbaukalender 1942, Abschnitt V, Schweißtechnik im Stahlbau.

³ U. a. Techn. Mitt. Krupp, Forschungsber. 1940, Heft 6.

⁴ Stahl u. Eisen 1942, S. 222. ⁵ Techn. Mitt. Krupp, Forschungsber. 1940, Heft 14.

⁶ Elektroschweißg. 1941, S. 141.

und Biegewinkel von 180° , wie überhaupt alle zur Erreichung des 0,9-Faktors bei Kesselschweißungen verlangten Werte von der Elliraschweißung auch im nicht-geglühten Zustande bei 50 mm Blechdicke erreicht werden. —

Untersuchungen an Schweißverbindungen, die mit dem Elin-Hafergut-Verfahren hergestellt worden sind, ergaben nach Graf und Munzinger¹, daß das Verfahren für ruhende Belastungen durchaus geeignet ist. Auch die Verformungsfähigkeit war gut, dagegen liegt die Dauerzugfestigkeit bei St 37 noch unter den vorgeschriebenen Mindestwerten. Klougt² kommt zu ähnlichen, allerdings noch etwas ungünstigeren Ergebnissen.

Glühbehandlung von Schweißnähten. Vigener stellt in seinen bereits angezogenen Ausführungen über „Die neuen Vorschriften für geschweißte Dampfkessel“ fest, daß nach dem heutigen Stande unserer wissenschaftlichen Erkenntnis der für den Kesselbau in Frage kommende Werkstoff in normalgeglühtem Zustande die günstigsten Eigenschaften aufweist. Deshalb wird für Dampfkesselschweißungen im allgemeinen weiterhin das Normalglühen verlangt. Ein Verzicht auf eine Wärmebehandlung ist bei hochwertigen Schweißungen nur möglich, wenn der Schweißwerkstoff eine sehr große Dehnungsfähigkeit besitzt. Unter einschränkenden Bestimmungen wird auch das „Spannungsfreiglühen“ (bei $600 \cdots 650^\circ$) und schließlich auch die ungeglühte Schweißung zugelassen. Beim Spannungsfreiglühen wird aber die Bewertung der Schweißnaht nur bis zu 70 vH und bei ungeglühter Schweißung nur bis zu 50 vH des Grundwerkstoffs zugelassen, bei letzterer auch nur ein Betriebsdruck bis zu 8 at. — Über „Normalglühen und Spannungsfreiglühen von Schweißnähten“ berichten weiter Schmidt und Jöllenbeck³. Sie stellen allgemein fest: Die Vorteile des Normalglühens sind einheitlicher Gefügebau der Schweiße und des Grundwerkstoffs, kleine Restspannungen und Korrosionsbeständigkeit in Gegenwart schwacher Elektrolyte (z. B. Kesselwasser). Die Nachteile sind anspruchsvolle Temperaturführung des Glühvorgangs, hohe Brennstoffkosten, große und schwere Aussteifungen und die notwendige Entzunderung der normal geglühten Werkstücke. Die Vorteile des Spannungsfreiglühens liegen in der Hauptsache in der Aufhebung der Nachteile des Normalglühens. Als Nachteile des Spannungsfreiglühens werden die fehlende Gefügeumwandlung und der fehlende Nachweis der gleichen technologischen und metallurgischen Güte wie bei normalgeglühten Schweißen angesehen. Ein Spannungsfreiglühen mit folgendem Normalglühen wird bei der Herstellung über 50 mm dicker Schweißnähte angewendet, um bei diesen hohen Blechdicken Schweißrisse zu vermeiden. Man geht dabei meist so vor, daß man nach Schweißdicken von $25 \cdots 30$ mm spannungsfrei glüht. Große Blechdicken erfordern unter Umständen mehrmaliges Zwischenglühen. Das fertig geschweißte Werkstück wird schließlich normal geglüht. Der Kostenersparnis wegen wird neuerdings das Zwischenglühen dadurch umgangen, daß man die Schweißstellen unmittelbar vor der Schweißung durch Gasbrenner oder dergleichen auf etwa 200° anwärmt. — Erwähnt sei noch die „Rekristallisationsvergütung von Gasschweißungen“, wie sie Czernasty⁴ auf Grund von Versuchen vorschlägt. Er weist darauf hin, daß die Vergütung von Gasschweißungen durch Hämmern in der Schweißwärme zwar seit langem bekannt, ein Erfolg jedoch sehr wechselvoll und, im Durchschnitt gesehen, gering gewesen ist. Rekristallisation ist eine Kornneubildung und u. U. starkes Kornwachstum, das bei Stahl beim Erwärmen auf Temperaturen von etwa $550 \cdots 750^\circ$ eintritt. Der Vorteil hoher Verformung liegt im Beginn der Rekristallisation bei tieferen Temperaturen, die nur geringe Kornwachstumsgeschwindigkeit bedingen, und im

¹ Elektroschweißg. 1941, S. 125.

² Elektroschweißg. 1942, S. 33.

³ Elektroschweißg. 1940, S. 57.

⁴ Wärme 1940, S. 13.

Auslösen vieler Rekristallisationskeime, so daß ein feinkörniges Gefüge entsteht. Das stückweise Hämmern jeder Lage löst nun wohl Rekristallisation aus, jedoch können weder Verformungsgrad noch Temperatur genau beherrscht werden. Man muß also die richtigen Temperaturen treffen und dann bei dünnen Blechen hämmern, bei dicken Blechen auf entsprechend konstruierten Maschinen walzen. Da die Rekristallisation außerdem mit einer Reinigung des Schweißgutes durch Ausscheidung von Gasen verbunden ist, ergibt sich dann, wie insbesondere Biege- und Kerbschlagproben zeigen, eine wesentliche Verbesserung der Güteeigenschaften der Schweiße. Das Verfahren kann sinngemäß auf die Lichtbogenschweißung angewendet werden.

Lichtbogenschweißungen von Nichtisenmetallen. Kupferschweißungen. Mit der Lesselektrode ist eine Zugfestigkeit der nichtgehämmerten Rohschweiße von $19 \cdots 22 \text{ kg/mm}^2$ zu erreichen, die sich durch Hämmern in Rotglut noch auf 100 vH des Grundwerkstoffs steigern läßt. Bei Messingschweißungen (arcatom) erzielt man 90 $\cdots$ 100 vH der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs, bei Aluminiumbronze 90 vH vom Grundwerkstoff und Biegewinkel von 180° .

Aluminiumschweißungen. Nach den „Anleitungsblättern für das Schweißen und Löten von Leichtmetallen“¹ ergeben sich bei lichtbogengeschweißten Blechen von 4 $\cdots$ 8 mm Dicke ohne Vorwärmung und Nachbehandlung Zugfestigkeiten von 100 vH bei weichem Reinaluminium und weichen Knetlegierungen, 80 $\cdots$ 85 vH bei halbhartem Reinaluminium und einigen halbharten und harten, nicht aushärtbaren Knetlegierungen, 58 $\cdots$ 67 vH bei vergüteten (aushärtbaren) Knetlegierungen und 90 $\cdots$ 100 vH bei den Gußlegierungen. Den größten Festigkeitsverlust weisen also die aushärtbaren Legierungen auf. Wenn beim Schweißen vorgewärmt wird, sind Festigkeit und Bruchdehnung etwa die gleichen wie bei der Gasschweißung². Zwischen arcatomgeschweißten und gasgeschweißten Verbindungen bestehen keine wesentlichen Festigkeitsunterschiede.

3. Metallographische Prüfungen.

Allgemeines. Der Metallograph untersucht das Kleingefüge des Metalls und dessen Aufbau und zieht aus der Struktur des meist im Mikroskop stark vergrößerten Werkstoffs Schlüsse auf dessen Herstellung und Behandlung. Er entnimmt dem zu prüfenden Werkstück kleine Stückchen, feilt, schleift und poliert eine Fläche und macht, da auf der glänzenden Fläche selten etwas zu erkennen ist, das Gefüge dadurch sichtbar, daß er die Schlifffläche entweder anläßt oder, was am häufigsten vorkommt, mit gewissen Ätzmitteln behandelt. Meist erfolgt ein Ätzen z. B. mit Kupferammoniumchlorid bei Prüfungen des Großgefüges (mit bloßem Auge, makroskopische Prüfung) oder z. B. mit alkoholischer Salpetersäure bei Prüfungen des Kleingefüges (mikroskopische Prüfung). Durch das Anlassen oder Ätzen treten die einzelnen kristallinen Bestandteile des Metalls in verschiedenen Farben oder verschieden erhaben hervor. Für einen Vergleich von Bildern des vergrößerten Gefüges ist es wichtig, daß jedesmal die Vergrößerung angegeben wird (z. B. Abb. 380: $V = 67$, d. h. 67fach vergrößert).

Untersuchungen von Widerstandsschweißungen. Zunächst sei nochmals auf Abb. 376 verwiesen, die eine Prüfung des Großgefüges in fast natürlicher Größe darstellt. Es handelte sich hier nur darum, die durch Hämmern entstandenen Risse gut sichtbar zu machen. Aus weiteren Untersuchungen von Bock an Stumpf- und Abbrennschweißungen seien noch folgende Abbildungen zur Be-

¹ S. 37 u. f. Berlin: VDI-Verlag 1940.

² Siehe Schimpke-Horn: Bd. I, S. 278. 1938.

trachtung herangezogen: Abb. 380 zeigt in 67facher Vergrößerung rechts das Gefüge eines Flußstahls in 17 mm Entfernung von der Stumpfschweißstelle und links das Gefüge in der Schweißstelle selbst. Die weiß aussehenden Kristalle rechts sind reine Eisenkristalle (metallographisch als „Ferrit“ bezeichnet), die

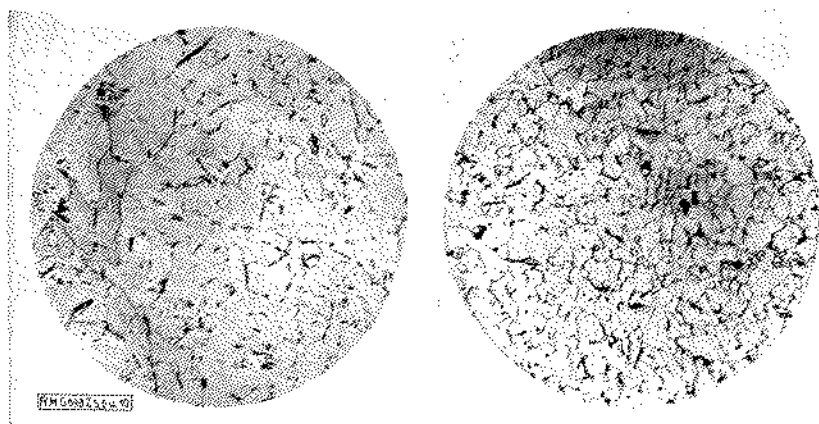


Abb. 380. Gefüge stumpfgeschweißten Flußstahls in und neben der Schweißstelle ($V = 67$).

schwärzlichen Stellen in den Fugen sind feine Körnchen von Eisen und Eisenkarbid (Perlit). Die Größe der Eisenkristalle ist noch ungefähr dieselbe wie die

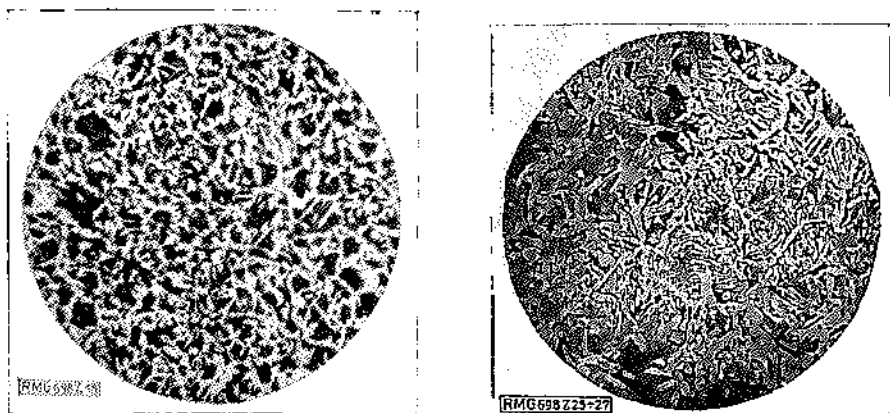


Abb. 381. Gefüge des ungeschweißten Stahls ($V = 67$).

Abb. 382. Gefüge der Schweißstelle (Abbrennschweißung) ($V = 67$).

des ungeschweißten Werkstoffs, während links, in der Schweißnaht, eine Vergrößerung des Korns, herrührend von einer gewissen Überhitzung, festzustellen ist.

Die folgenden Abbildungen sind Vergrößerungen einzelner Stellen anderer Proben von Abbrennschweißungen, auch 67fach vergrößert. Abb. 381 zeigt das Gefüge des ungeschweißten Stahls. Der dunkle Perlit nimmt etwa ein Drittel des ganzen Querschnitts ein, entsprechend einem Kohlenstoffgehalt des Stahls von etwa einem Drittel von 0,9 vH (Kohlenstoffgehalt also etwa 0,3 vH). In der Abbrennschweißnaht (Abb. 382) sehen wir ein ganz anderes Gefüge, grobkörnig

und grobmaschig; diese Struktur tritt immer dann auf, wenn Stahl von hoher Temperatur ziemlich schnell abgekühlt wird, wie es bei der Abbrennschweißung der Fall ist. Der Ferrit hüllt als helles Netz den dunklen Perlit ein, der noch mit Ferritkörnern durchsetzt ist.

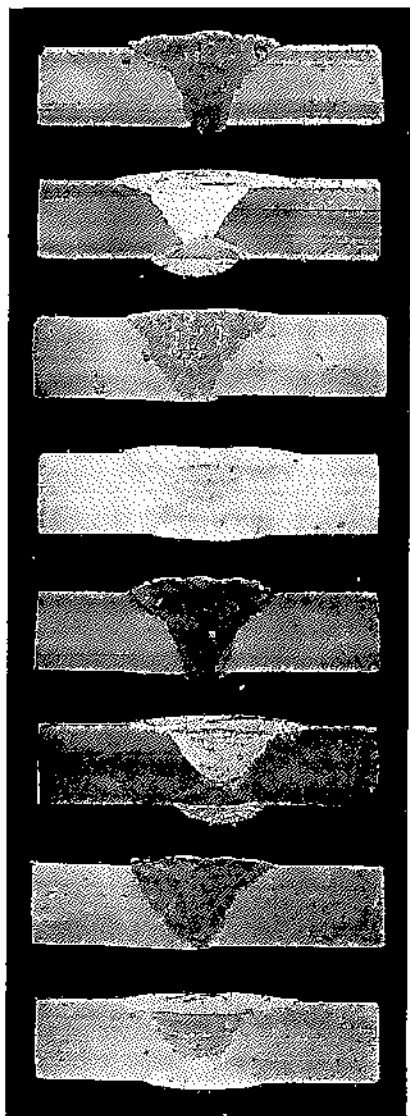


Abb. 383. Grobgefügebilder von Schweißnähten.

Untersuchungen von Lichtbogenschweißungen. Verviesen sei zunächst auf eine Anzahl in früheren Abschnitten gebrachter Grobgefügebilder. Abb. 383¹ gibt weitere Grobgefügebilder von Stumpfschweißnähten in natürlicher Größe wieder. Abb. a und b zeigen St 37 mit nacktem bzw. ummanteltem Draht geschweißt, c und d einen St 52 mit Seelen- bzw. ummantelten Drähten geschweißt. Während die Einzelabbildungen a...d ungeglüht sind, zeigen e...h geglühte Schweißnähte, und zwar e und f einen St 37 mit nackten bzw. ummantelten Drähten und g und h wieder einen St 52 mit Seelen- bzw. ummantelten Drähten geschweißt. — In Abb. 384² sehen wir den Gefügebau einer Lichtbogenschweißung mit Mantelelektrode, und zwar oben links ohne Nachbehandlung und rechts normalisiert (oberhalb des oberen Umwandlungspunktes geglüht), beides in 6facher Vergrößerung. Die unteren 8 Einzelbilder geben in 200facher Vergrößerung Einzelheiten der in den oberen Bildern bezeichneten Punkte. Zur näheren Erklärung ist noch zu sagen:

- 1 = Gefüge des Blechs (St 37); Ferrit und Perlit.
- 2 = Beginnende Auflösung des Perlits durch Schweißhitze.
- 3 = Umgekörnertes verfeinertes Gefüge (oberer Umwandlungspunkt A_{c3}).
- 4 = Beginnende Kornvergrößerung (oberhalb A_{c3}).
- 5 = Überhitztes grobes Korn.
- 6 = Übergang vom Blech (unten) zur Schweiße (oben); Überhitzung.
- 7 = Schweiße; strahliges Gefüge.
- 8 = Übergang vom Blech (unten) zur Schweiße (oben); normalisiert.

Weiterhin zeigt uns Abb. 385 gute Kehlnahtschweißungen an einem T-Stück in natürlicher Größe. Wir sehen deutlich den früher erwähnten guten Einbrand der Schweiße in das senkrechte und waagerechte Blech. Die weiteren Abbildungen

¹ Aus Klöppel-Stieler: Schweißtechnik im Stahlbau, Bd. I, Springer-Verlag 1939.

² Aus Tewes: Das Gefügebild der Schweißnaht. Autog. Metallbearb. 1939, S. 34.

lassen infolge ihrer stärkeren Vergrößerung einige Feinheiten des Gefüges der Lichtbogenschweißungen erkennen. Eine einzige Schweißlage, wie sie bei dünnen Blechen vorkommt, und entsprechend auch die oberste von mehreren Lagen, zeigt

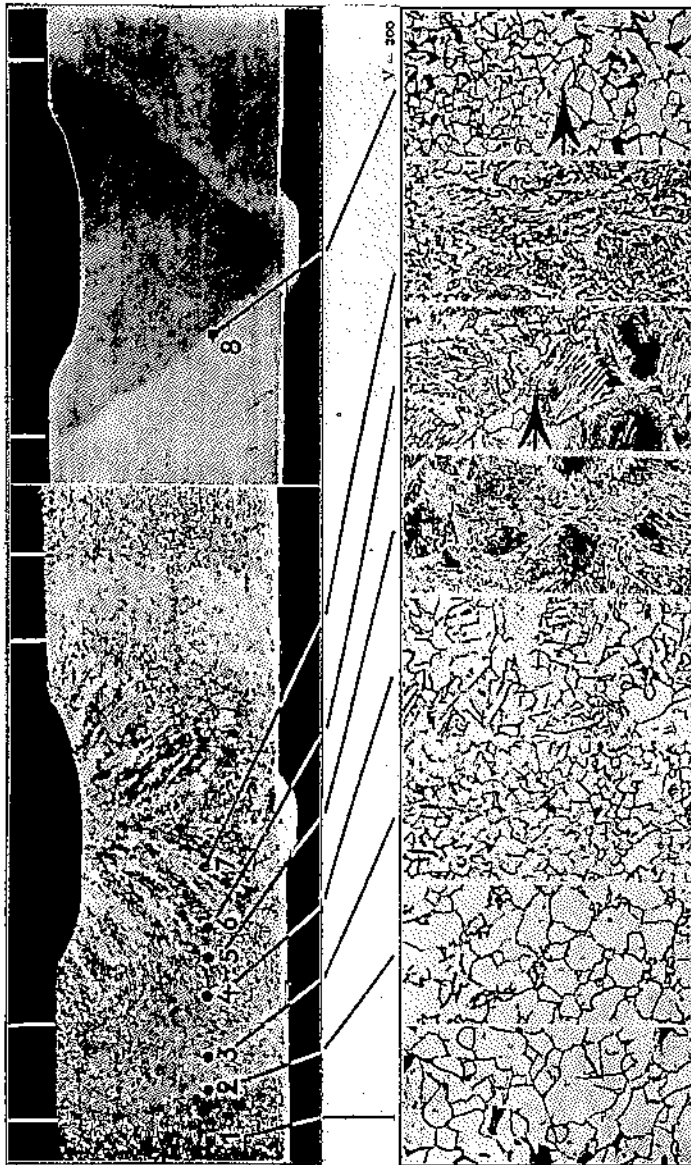


Abb. 384. Gefügeaufbau einer Lichtbogenschweißung mit Manuelektrode.

Überhitzungserscheinungen, was man an groben Kristallen (Gußstruktur, Abb. 386) erkennt. In dickeren Blechen wird diese Gußstruktur durch einen selbsttätigen Ausglühvorgang mehr oder weniger beseitigt, insofern als die unteren Schweißlagen beim Aufbringen der oberen diesem Ausglühen ausgesetzt sind.

Den Unterschied in der Struktur verschiedener Schweißlagen erkennt man beim Vergleich von Abb. 386 und 387. Abb. 387 gibt eine untere Schweißlage wieder;

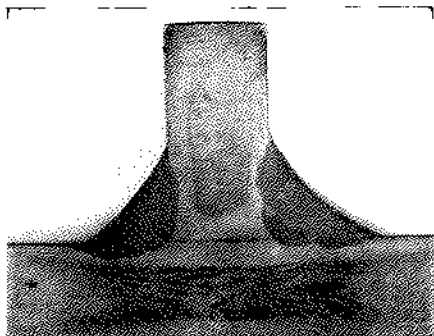


Abb. 385. Gute elektrische Kehlnaht-Schweißungen.
($V = 1$.)

das Gefüge ist infolge des Ausglühens durch Aufbringen weiterer Schweißlagen feinkörniger und damit besser (widerstandsfähiger) als das Gußgefüge. Von Interesse ist auch die folgende Abb. 388 insofern, als sie zweierlei Gefüge zeigt. Rechts erblickt man die sog. „Zeilenstruktur“, wie sie gewalztem Flußstahl infolge der Wirkung des Walzvorgangs auf die Kristallkörner eigen ist. Links in der Abbildung aber ist diese Zeilenstruktur vollständig verschwunden und ein sehr feines Korn entstanden. Dies läßt sich durch die Glühwirkung des Lichtbogens auf die Werkstoffstellen in der Nähe der Schweißfuge erklären. Bei Er-

hitzung solcher Stellen auf etwa 900° entsteht eine feinkörnige Struktur. Es handelt sich also rechts in der Abbildung um eine Stelle des Flußstahlblechs, die beim

Schweißen noch keine starke Erhitzung erfahren hat, links um eine Stelle, die schon ziemlich nahe der Schweißfuge liegt.



Abb. 386. Gußstruktur einer Lichtbogenschweißung
($V = 100$).

Die Lichtbogenschweiße neigt zur Stickstoffaufnahme, was bereits mehrmals erwähnt wurde. Der Stickstoff erscheint bei genügend starker Vergrößerung in Form feiner Nitridnadeln (Eisennitrid, Fe_3N = eine Eisenstickstoffverbindung), die das ganze

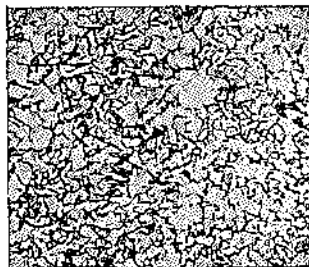


Abb. 387. Untere Schweißlage einer Lichtbogenschweißung, ausgeglüht durch Aufbringen mehrerer Schweißlagen ($V = 120$).

Feld des Metallschliffs durchsetzen, wie dies auch Abb. 389 erkennen läßt. Hierbei darf nicht übersehen werden, daß solche Nitridnadeln in schnell abgekühlten oder gar abgeschreckten Schweißen auch bei der Betrachtung durch das Mikroskop und bei starker Vergrößerung nicht sichtbar sind, woraus jedoch keineswegs auf ihre Abwesenheit geschlossen werden kann. Glüht man die Probe und läßt sie langsam erkalten, so tritt das nadlige Gefüge in Erscheinung.

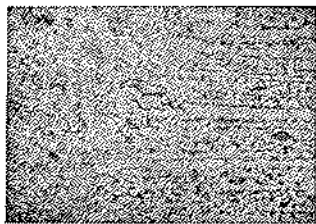


Abb. 388. Zeilenstruktur von Flußstahl (rechts) und Wärmewirkung des Lichtbogens (links) ($V = 60$).

Abb. 390 führt uns schließlich an Hand eines klaren Beispiels in natürlicher Größe auf das Gebiet der Fehlschweißungen bei Ausbesserungsarbeiten. Es handelt sich um elektrische Schweißungen an der Wasserkammer eines Kessels. Die untere Aufnahme zeigt, daß die Auskreuzung und Schweißung voll-

ständig neben der alten Feuerschweißnaht a liegt. Es ist fälschlicherweise gesunder Werkstoff entfernt, der Riß nicht erkannt worden. Die Schweiße besteht

aus vierzehn unter sich gut abgebundenen Lagen mit einer geringfügigen Kaltlage bei *b*. Bei *c* befindet sich eine bei der früheren Feuerschweißung nachträglich hergestellte künstliche Abdichtung. Auch in der oberen Aufnahme, einer Überkopfschweißung an der gleichen Wasserkammer, liegt die Schweißse *b*, die aus 25 Lagen besteht, zunächst ganz neben dem Riß *a*.

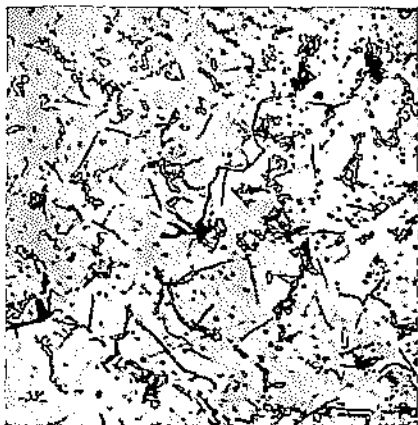


Abb. 389. Lichtbogenschweiße mit Nitridnadeln ($V = 200$).

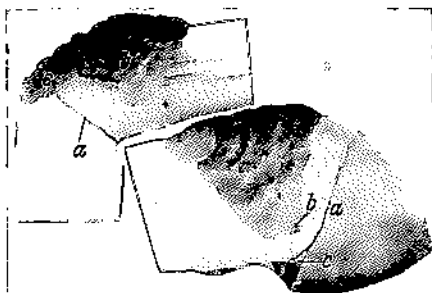


Abb. 390. Elektrische Fehlschweißungen bei der Ausbesserung einer Wasserkammer ($V = 1$).

Während des Schweißens ist der Schweißer dann auf den Riß gestoßen, hat bei *c* eine Mulde auskreuzen lassen und trotzdem den Riß *a* nur notdürftig und ungenügend verschweißt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß metallographische Untersuchungen der Schweißnaht durch nähere Aufklärung über die Struktur des Schweißgefüges zu Verbesserungen anregen können und selbst schon bei geringer Vergrößerung Schweißfehler deutlich erkennen lassen.

4. Chemische Prüfungen.

Werkstück. Die Rücksichtnahme auf die chemische Zusammensetzung des Werkstücks konnte im Laufe der Jahre immer mehr zurückgestellt werden, da heute auch kohlenstoffreiche Stähle und Sonderstähle, alle Gußeisensorten usw. unter Beobachtung der nötigen Vorsichtsmaßregeln schweißbar sind.

Elektrodenwerkstoff. Nicht die chemische Analyse allein ist, wie schon mehrfach erwähnt, maßgebend für die Güte des Drahts, sondern auch sein Verhalten bei Probenschweißungen und die bei diesen Schweißungen erzielten Festigkeitswerte. In der bereits angezogenen DIN-Vornorm 1913 sind auch kurze Angaben über die chemische Zusammensetzung der Elektroden enthalten (im allgemeinen unter 0,03 vH P und unter 0,03 vH S). Es wird aber mit Recht betont, daß die Schweißdrahtzusammensetzung sich nach dem Schweißverfahren und dem Verwendungszweck richten muß. In DIN-Entwurf 1 E 2301 ist für Lichtbogen- und Gasschweißung von Gußeisen der Sorten Ge 12.91 bis Ge 22.91 die chemische Zusammensetzung der Gußeisenstäbe für die Gußeisenwärmeschweißung innerhalb folgender Grenzen angegeben: 3...3,6 vH C, 3...3,8 vH Si, 0,5...0,8 vH Mn, 0,4...0,8 vH P und unter 0,1 vH S. Geringe Abweichungen von dieser Zusammensetzung und gütesteigernde Legierungszusätze sind zulässig. Für die elektrische Kaltschweißung von Gußeisen können geeignete kohlenstoffarme Stahldrähte mit und ohne Umhüllungen (entsprechend DIN-Vornorm 1913) verwendet werden.

Elektrodenumhüllungen. Hinsichtlich der Zusammensetzung wird auf das im Abschnitt III B 4 Gesagte verwiesen. Von neueren Untersuchungen ist auf den Einfluß des Wasserstoffs in Schweißungen mit Mantelelektroden hinzuweisen. Bennek und Müller¹ stellten ungewöhnliche Brucherscheinungen im Schweißgut hochwertiger Lichtbogenschweißungen fest. Als Hauptursache für diese spröden Brüche und hellen Flecken im Bruch (Fischaugen) ergab sich der Wasserstoffgehalt der Schweißnähte, der in Schweißungen mit stark ummantelten Elektroden außerordentlich hohe Werte annehmen kann. Der Wasserstoff entstammt der Schweißdrahtumhüllung, die ihn beim Schweißen an die Lichtbogenatmosphäre abgibt.

Schweißgut. Tabelle 22 aus einer Untersuchung von Zeyen² zeigt, wie unterschiedlich die Gütewerte einer Schweißnaht bei Verwendung des gleichen Schweißdrahts werden, je nachdem ob dieser durch Gasschweißung oder durch elektrische Lichtbogenschweißung als blanke, leicht oder stark umhüllte Elektrode niedergeschmolzen wird. Alle Proben sind nach dem Schweißen nicht wärmebehandelt worden. Die Erklärung für die sehr unterschiedlichen Festigkeitswerte ergibt sich

Tabelle 22.

Werkstoff	Chemische Zusammensetzung					Festigkeitswerte			
	C	Si	Mn	N	O	Zugfestigkeit	Dehnung	Kerb-schlag-zähigkeit	Brinell-härte
	vH	vH	vH	vH	vH	kg/mm ²	vH	mkg/cm ²	kg/mm ²
Schweißdraht	0,13	0,07	0,66	0,005	0,021	—	—	—	—
Schweißgut, gasschweißt	0,10	0,02	0,49	0,017	0,037	39,8	18,5	11,8	113
Schweißgut, elektrisch mit Gleichstrom geschweißt (blanke Elektrode) . . .	0,03	0,02	0,20	0,140	0,210	41,8	7,5	1,5	135
Schweißgut, elektrisch mit Gleichstrom geschweißt (leicht getauchte Elektrode)	0,04	0,02	0,20	0,120	0,180	47,7	11,2	1,9	120
Schweißgut, elektrisch mit Gleichstrom geschweißt (Mantelelektrode)	0,04	0,04	0,25	0,079	0,140	43,8	15,0	6,1	131
Schweißgut, elektrisch mit Gleichstrom geschweißt (Schutzgas entwickelnde Mantelelektrode)	0,06	0,06	0,36	0,013	0,099	46,9	25,0	9,6	140

aus der chemischen Zusammensetzung des Schweißgutes. Kohlenstoff, Silizium und Mangan sind in allen Fällen, wenn auch verschieden stark, abgebrannt (oxydiert). Den Haupteinfluß auf eine Verschlechterung der Festigkeitswerte haben aber Stickstoff und Sauerstoff. Zeyen weist weiterhin noch nach, daß hierbei dem Stickstoff die wesentlich größere Bedeutung zukommt. Er stellt nämlich durch Vergleich der aus einer Mantel- und einer Seelenelektrode hergestellten weiteren Schweißen fest, daß die wesentlich schlechteren Festigkeitsergebnisse der Seelenelektrode vom hohen Stickstoffgehalt herrühren müssen, denn die Mantelelektrode hatte in diesem Fall bei viel niedrigerem Stickstoffgehalt einen wesentlich höheren Sauerstoffgehalt als die Seelenelektrode. Um bei der elektrischen Lichtbogenschweißung die Stickstoffaufnahme weitgehend zu verhindern, müssen nach den in Tabelle 22 wiedergegebenen Versuchen die Elektroden-Umhüllungen mit

¹ Techn. Mitt. Krupp, Forschungsber. 1941, Heft 5. ² Stahlbau 1938, Heft 6 u. 7/8.

Stoffen versehen werden, die in der Hitze des Lichtbogens ein schützendes Gas erzeugen.

Korrosionsversuche. Der Stand der Normung auf dem Korrosionsgebiet in Deutschland ist zur Zeit durch die Normenblätter DIN 4850...4853 gegeben. DIN 4850 behandelt allgemein die „Richtlinien für die Durchführung und Auswertung von Korrosionsversuchen an Metallen“ und DIN 4853 im besonderen die „Prüfung von Leichtmetallen auf Seeklima und Seewasserbeständigkeit“. Die Korrosionsbeständigkeit normaler Stahlschweißungen wird selten zu prüfen sein, da die geschweißte Konstruktion im allgemeinen mit einem Schutzanstrich versehen wird. Bei rostfreien Stählen mit höherem Kohlenstoffgehalt tritt durch Karbidausscheidung an den Korngrenzen Korrosion auf. Sie wird vermieden durch Abschrecken aus höheren Temperaturen (1150°) oder besser durch Erniedrigung des Kohlenstoffgehalts auf unter 0,07 vH und Zusatz von Titan, Tantal, Niob, die ausgesprochene Karbidbildner und Karbidhalter sind, so daß bei der Schweißung keine Karbidausscheidung eintritt.

Neuere „Untersuchungen über den Einfluß des Schweißverfahrens, der Blechdicke und der Nachbehandlung auf die Korrosionsbeständigkeit von geschweißten Aluminiumlegierungen“ sind von E. von Rajakovics durchgeführt worden¹. Nach DIN 4853 sind für Laboratoriumsversuche der Sprühversuch, der Wechseltauchversuch, der Rührversuch und der vereinigte Wechseltauch- und Rührversuch vorgesehen. Untersucht wurde mit Hilfe des Rührversuchs nach dem DVL-Schnellprüfverfahren, bei dem als Korrosionsflüssigkeit eine 3prozentige Kochsalzlösung mit einem Zusatz von 0,1 vH Wasserstoffsuperoxyd dient. Die Proben werden in ein Glasgefäß bestimmter Abmessungen, das mit der Korrosionsflüssigkeit gefüllt ist, eingehängt. Ein Rührer, der mit 135 Umdrehungen je Minute umläuft, versetzt die Flüssigkeit in Bewegung. Als Maß für die Korrosionswirkung dient der Abfall der Zugfestigkeit und Bruchdehnung in Abhängigkeit von der Korrosionsdauer. Zwischen derartigen Laboratoriumsversuchen und Naturversuchen in Seeklima und Seewasser hat man gute Übereinstimmung erzielt. Die Schweißung erfolgte teils durch Niederschmelzen der Bördel an 1 mm dicken Blechen, teils an Blechen von 1, 2, 3 und 6 mm Dicke. Die Legierungen „Leichtmetall MN 20“ und „Duralium MG 2 S“ zeigten sich dem Schweißverfahren gegenüber sehr unempfindlich. Dagegen ergab sich bei den Legierungen „Duralumin K“, „Duralium MG 3“, „Duralium MG 5“ und „Duralumin 681 ZB 1/3“ eine höhere Korrosionsbeständigkeit bei Schweißungen mit der Azetylen-Sauerstoff-Schweißung und mit dem Weibelverfahren gegenüber der Wasserstoff-Sauerstoff-Schweißung und insbesondere gegenüber der Arcatomschweißung. Als Ursache ist offenbar die Verwendung des Wasserstoffs anzusehen, der in die feste Aluminiumgrundmasse hineindringt. Hinsichtlich der Blechdicke wurden günstigere Ergebnisse mit den dickeren Blechen erzielt. Durch Nachveredlung (d. h. durch nochmalige Aushärtung nach dem Schweißen) bei „Duralumin 681 ZB 1/3“ und „Duralplat“ oder durch Spritzplattierung läßt sich die Korrosionsbeständigkeit der Schweißverbindungen wesentlich verbessern.

D. Untersuchung von Schweißspannungen.

Vorbemerkung. Nicht nur beim Schmelzschweißen entstehen Spannungen, sondern auch bei anderen Arbeitsverfahren. Bekanntlich stehen Gußstücke und gehärtete Teile meist unter Restspannungen. Unter Spannung stehen

¹ Autog. Metallbearb. 1941, S. 353.

auch Niet-, Schrauben- und Keilverbindungen, Schrumpfringe usw. Aber auch beim Biegen von Blechen, beim Drehen, Hobeln usw. entstehen unter Umständen bedeutende Spannungen. So wurden z. B. beim Rundbiegen eines 28 mm-Kesselblechs auf 800 mm Durchmesser Druck- und Zugspannungen von 18 kg/mm^2 gemessen, ferner beim Drehen unter bestimmten Voraussetzungen Oberflächen-druckspannungen von $25 \cdots 30 \text{ kg/mm}^2$.

Meßverfahren. Das bis jetzt gebräuchlichste Verfahren besteht darin, daß man mit geeigneten Meßeinrichtungen eine bestimmte Meßstrecke (z. B. 100 mm) auf dem zu prüfenden Schweißblech vor, sowie nach dem Schweißen und nach dem Entspannen oder nur vor und nach dem Schweißen mißt. Das Entspannen geschieht durch Auseinanderschneiden des Blechs oder durch Ausglühen oder durch eine Verbindung beider Verfahren. Der Unterschied zwischen Messung nach dem Schweißen und nach dem Entspannen ist die Rückfederung (federnde Dehnung). Aus dieser läßt sich die Schweißspannung durch Rechnung ermitteln, und zwar ist die Spannung $\sigma = E \times \varepsilon$, worin E das Elastizitätsmaß des Werkstoffs und ε die gemessene Rückfederung ist. Die Messung vor und nach dem Schweißen oder auch während des Schweißens (mit Dehnungsmessern, Tensometern) ist die einfachere; sie ist auch ebenso genau und tritt daher zur Zeit in den Vordergrund.

Ein einfaches Instrument für die Messung der Rückfederung bzw. Dehnung ist die Schieblehre mit Genauigkeiten bis etwa $\frac{1}{50} \text{ mm}$, was aber im allgemeinen nicht ausreicht. Sogenannte Setzdehnungsmesser, die schon genau genug messen (z. B. $\pm \frac{2}{1000} \text{ mm}$), verwenden z. B. Stäbe, deren Spitzen in vorbereitete kegelige Eindrehungen oder kugelige Aufsatzpunkte in kegeligen Eindrehungen (Körnerschlag) einzusetzen sind. Die Abstandsänderung wird durch Hebelübertragung übersetzt und an einer Meßuhr abgelesen. Genügend genau arbeiten auch besondere Meßmikroskope, ferner Zeigergeräte, bei denen die Anzeige auf mechanischem Wege durch einen entsprechend übersetzten Zeiger, der auf einer Teilung spielt, hervorgebracht wird. Hierhin gehört der Tensometer (Spannungsmesser) von Huggenberg.

Die Spannungsbestimmung mittels Röntgenstrahlen beruht auch auf der Messung einer Längenänderung (Dehnung). Als Meßmarken dienen die im inneren Aufbau aller kristallinen Stoffe auftretenden, periodisch sich wiederholenden Atomabstände. Zur Ermittlung der sehr geringfügigen Änderungen dieser äußerst kleinen Größe wird der zu untersuchende kristalline Stoff mit Röntgenstrahlen von einer bestimmten Wellenlänge angestrahlt und die durch die Beugung der Strahlen an den Atomreihen hervorgerufene Interferenzstrahlung photographisch beobachtet. Eine Änderung der Atomabstände äußert sich in einer Verschiebung der Röntgenlinien.

Meßergebnisse. Nach Versuchen von Mies treten die größten Spannungen in der Schweißnaht selbst auf. Die Mittelwerte der Längszugspannungen betrugen 25 kg/mm^2 , woraus zu schließen ist, daß die Höchstwerte sogar die Streckgrenze der Schweißnaht sicher erreichen. Bei den Zugspannungen quer zur Naht ergaben sich für die Gasschweißung 6 kg/mm^2 und für die Lichtbogenschweißung $10,7 \text{ kg/mm}^2$. Bierett fand bei seinen Versuchen Spannungen in ähnlicher Größenordnung. Während man früher der Gasschweißung ohne weiteres die größeren Spannungen zuschrieb, dürfte jetzt gesagt werden können, daß die Lichtbogenschweißung in der Schweißnaht selbst die höheren Spannungen aufweist, während die Spannungen im Blech — für die Mies in der Längsrichtung Werte von $20 \cdots 30 \text{ kg/mm}^2$ und in der Querrichtung bis 12 kg/mm^2 fand — bei der Gasschweißung etwas höher sind. Abb. 391 zeigt die Eigenspannungen in einem

geschweißten Ständer¹. Der Träger aus St 37 hat eine Länge von 1,50 m und ist mit einer Mantelelektrode geschweißt.

Brückner befaßt sich innerhalb einer Abhandlung über „Erfahrungen mit dem Schweißen von Eisenbahnbrücken“² auch eingehend mit Schweißspannungen und weist u. a. darauf hin, daß erstmalig 1936 an geschweißten Brücken die Schweißspannungen durch das Ausmessen von Meßstrecken vor und nach dem Schweißen bestimmt wurden. Da man sehr hohe Werte erhielt, wurden im Staatl. Materialprüfamt Berlin-Dahlem weitere Versuche an einer geschweißten Pendelstütze von großen Abmessungen vorgenommen. Nach dem Verlauf der Schrumpfspannungskurven war im Stegblech mit Zugspannungen von 25 kg/mm² zu rechnen. In den Gurtwulstprofilen ergaben sich Druckspannungen bis zu 15,8 kg/mm². Der Knickversuch zeigte aber, daß diese hohen Spannungen die Tragfähigkeit gegenüber statischer Last nicht oder nur unwesentlich herabgesetzt haben. Weiter haben zahlreiche Versuche mit geschweißten Vollwandträgern sogar eine höhere Dauerfestigkeit als bei genieteten Verbindungen ergeben. Risse treten nach Brückner bei St 37 niemals erst bei Belastung des Bauwerks, sondern schon beim Schweißen selbst auf, und zwar dann, wenn die Schrumpfspannung größer geworden ist als die Tragfähigkeit der Schweißnaht oder des umgebenden Werkstoffs. Es wird also beim Herstellen der Schweißverbindung darauf ankommen, die Schrumpfspannungen so niedrig zu halten, daß nicht die frisch hergestellte Naht reißt.

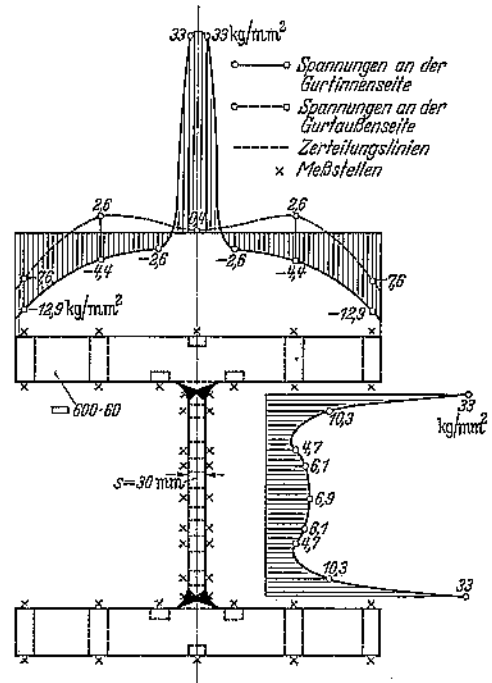


Abb. 291. Eigenspannungen in einem geschweißten Ständer.

Auf die Entstehung der Schweißspannungen und ihre Berücksichtigung beim Schweißen ist schon im Abschnitt III C 2 eingehend hingewiesen worden. Hier sei deshalb nur noch einiges aus Ausführungen von Bierett über Schrumpfspannungen³ hervorgehoben. Er betont auch, daß die Höhe dieser Spannungen oft etwa an der Streckgrenze liegt, daß aber ein mehrachsiger und ungleichmäßiger Spannungszustand in der Schweißnaht gegeben ist, der eine Fließbehinderung zur Folge hat, und daß in zahlenmäßig hohen Verspannungswerten nicht von vornherein ein erhebliches Gefahrenmoment gesehen werden kann, da infolge der Formänderungsbehinderung wesentlich höhere Spannungen ohne Fließen ertragen werden können. Weiter wird die Abhängigkeit der Schrumpfspannungen von verschiedenen Einflüssen besprochen. Die Größe der Wärmezufuhr gibt keinen allgemeingültigen Maßstab für diese Spannungen, wohl aber für die Verwerfungen.

¹ Bierett in: Klöppel-Stieler, Schweißtechnik im Stahlbau, Bd. I. 1939.

² Brückner: Z. VDI 1938, S. 33 u. f.

³ Bierett: S. Anleitungshblätter für das Schweißen im Maschinenbau. Berlin: VDI-Verlag 1936.

Ungleichmäßige und beschleunigte Wärmeableitung hat hohe Schrumpfspannungen zur Folge. Die Größe des Werkstücks macht sich unangenehm bemerkbar, wenn die Erhitzungszonen im Verhältnis zur Werkstückgröße örtlich begrenzt sind. Beim Entwurf von Schweißkonstruktionen soll ein Schweißen unter Einspannungen, die durch die Art der Konstruktion gegeben sind, vermieden werden. Da dies nicht immer zu erreichen ist, dürfen aber zum mindesten zu starre Verspannungen nicht vorkommen. Hinsichtlich der Schweißfolge ist bei der Lichtbogenschweißung die schrittweise Schweißung (Pilgerschrittschweißung) bei langen Nähten vorzuziehen. Bei der Gasschweißung sieht man allerdings hiervon ab, soweit nicht Flickenschweißungen in Frage kommen. Vollkommene Wärmebehandlung (Glühen) kommt, wie bereits früher erwähnt, nur in Sonderfällen in Betracht. Örtliche Wärmebehandlungen können, richtig angewendet, auch schon die Schrumpfspannungen wesentlich verringern. Hämmern in Rotglut dient der Gefügeverbesserung, beeinflusst die Schrumpfspannungen aber nicht wesentlich. Kalthämmern vermindert die Zugspannungen in der Naht, ist aber nur mit Vorsicht anzuwenden, um nicht die mechanischen Eigenschaften zu verschlechtern.

VIII. Leistungen und Kosten der elektrischen Schweißverfahren.

A. Widerstandsschweißungen.

Blechschweißungen von Stahl. Einen Überblick über die Schweißzeit und den Stromverbrauch bei Punktschweißungen gibt Abb. 392. Es wird bei Aufzeichnung dieser Kurven in derselben Weise verfahren, wie wir es schon bei der Aufzeichnung der Kennlinien von Schweißmaschinen gesehen haben, und man kann aus Abb. 392 z. B. für 8 mm Gesamtlechdicke die Schweißzeit nach Kurve I zu etwa 7 s, nach Kurve II zu 4 s und den Stromverbrauch für 100 Punkte zu etwa 1,3 kWh ablesen. Die Schweißzeiten der Kurve II entstammen den Angaben von Schweißfirmen und dürften nur in günstigen Fällen eingehalten werden

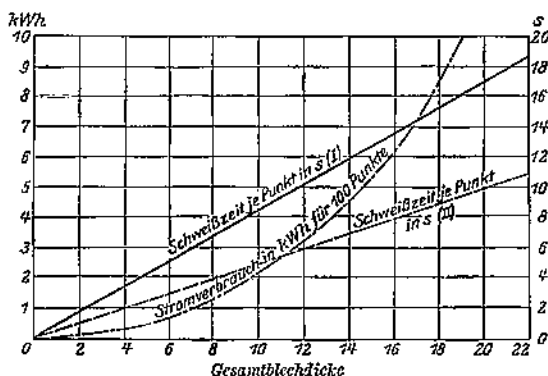


Abb. 392. Schweißzeit und Stromverbrauch bei Punktschweißungen.

können, wogegen die Schweißzeiten der Kurve I stets gut zu erreichen sind. Weitere wirtschaftliche Einzelangaben waren schon im Abschnitt II C 3 (Technik der Punktschweißung) gemacht worden. Es wurde auch dort schon erwähnt, daß man im allgemeinen nicht über 10 mm einfache Blechdicke (20 mm Gesamtlechdicke) hinausgeht, da bei größeren Blechdicken, wie es auch die Stromverbrauchskurve in Abb. 392 zeigt, die Punktschweißung nicht mehr wirtschaftlich ist. Die Punktschweißung

wird besonders bei dünneren Blechen wesentlich billiger als das früher allgemein übliche Nieten, da die Kosten für das Vorzeichnen und Bohren oder Stanzen der Nietlöcher, für das Einziehen der Niete, für den Nietwerkstoff usw. fortfallen und man außerdem viel schneller arbeitet. Neuere Versuche in Eisen-

bahnwerkstätten ergaben z. B. beim Punktschweißen einen 2...7 mal geringeren Zeitaufwand als beim Nieten.

Für die Nahtschweißung von Stahl sind Schweißzeiten und Stromverbrauch aus Abb. 393 zu entnehmen. Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen — s. auch die in Abb. 393 von etwa 3,5 mm Gesamtblechdicke schnell ansteigende Stromverbrauchskurve — geht man selten über 5 mm Gesamtblechdicke, meistens nicht über 3 mm Gesamtblechdicke (also 1,5 mm Einzelblechdicke) hinaus. Die in Abb. 393 eingetragenen Schweißzeiten gelten als reine Schweißzeiten für normale Nahtschweißmaschinen. Sie lassen sich in besonderen Fällen (bis 3 mm Gesamtblechdicke) bei Schnellschweißmaschinen noch wesentlich herabdrücken (s. auch die spätere Tabelle 26 über Längsnahtschweißmaschinen), allerdings auf die Gefahr hin, bei nicht ganz einwandfreier Einstellung und nicht ganz einwandfreiem Blech Schwierigkeiten zu bekommen.

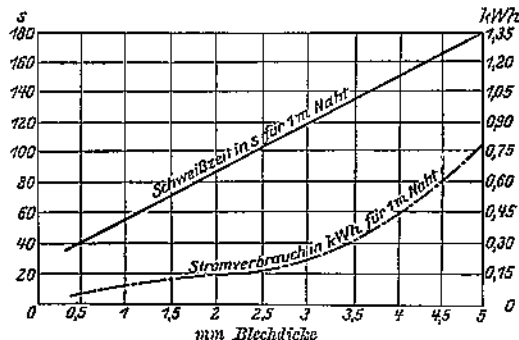


Abb. 393. Schweißzeit und Stromverbrauch bei Nahtschweißungen (Widerstandsschweißung).

Stumpf- und Abbronnsschweißungen von Stahl. Abb. 394 gibt Durchschnittswerte über Schweißzeit, Leistungsaufnahme und Stromverbrauch bei Stumpfschweißungen bis 80 mm Rundeisendurchmesser. Die Leistungsaufnahme (dem entsprechend auch der Kraftbedarf) ist bei Kupfer ganz wesentlich höher als bei Stahl, die Schweißzeit ziemlich dieselbe. Bei quadratischen und rechteckigen Kupferquerschnitten ist 40 bis 50 vH mehr an Leistung und 20...50 vH mehr an Zeit aufzuwenden als bei Rundkupfer (stärkerer Wärmeabfluß infolge größerer Außenfläche). Alle Werte können insbesondere je nach der Einspannlänge stark schwanken. Kürzere Einspannlängen ergeben zwar höheren Leistungsverbrauch als längere, aber wesentlich geringere Schweißzeit, sind also im allgemeinen vorzuziehen.

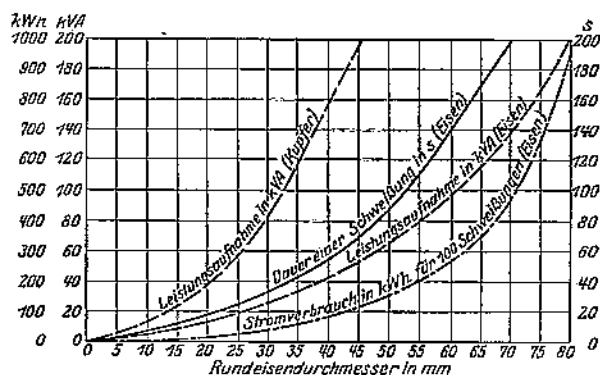


Abb. 394. Schweißzeit, Leistungsaufnahme und Stromverbrauch bei Stumpfschweißungen.

Die Leistungstabelle einer normalen Stumpf- und Abbronnsschweißmaschine für Handantrieb und Stahlquerschnitte bis 4000 mm² gibt Tabelle 23 wieder. Die Leistungsangaben sind auf Rund- und Quadratstahl von Handelsgüte und auf offene Längen beschränkt. Die Belastbarkeit der Maschine ist durch die stündlich zulässige Stückzahl festgelegt.

Zwischen der Stumpf- oder Abbronnsschweißung und der Feuerschweißung sind mehrfach Vergleichsversuche durchgeführt worden. So ergab z. B. die Gegenüberstellung der Schweißarbeit an einem 75 mm-Rundeisen:

Arbeitsaufwand usw.

für die Feuerschweißung

Arbeiterzahl	3
Arbeitszeit	20 min
Kohlenverbrauch	10 kg
Stromverbrauch für Gebläse	1 kWh

für die Abbrennschweißung

Arbeiterzahl	2
Arbeitszeit	4,15 min
Stromverbrauch	4,2 kWh

Gesamtkosten der Schweißarbeit

für die Feuerschweißung

Arbeitslohn	0,65 RM.
Unkosten	0,98 „
Kohlenverbrauch	0,25 „
Stromverbrauch	0,15 „
	<u>2,03 RM.</u>

für die Abbrennschweißung

Arbeitslohn	0,09 RM.
Unkosten	0,14 „
Stromverbrauch	0,63 „
Abschreibung	0,04 „
Zusammen	<u>0,90 RM.</u>

Zu diesem Beispiel ist noch hinzuzufügen: Die allgemeinen Unkosten wurden mit 150 vH der Löhne angesetzt. Die Schweißmaschine kostet 9400 RM.; ihre Abschreibung ist mit 15 vH angenommen. Zum Ausgleich für die bei der elektrischen Schweißung fehlenden Kühlwasserkosten sind bei der Feuerschweißung die Abschreibungskosten der Anlage fortgelassen. Das Beispiel läßt erkennen, daß die Widerstandsschweißung auch bei großen Querschnitten noch wirtschaftlich günstig dasteht.

Tabelle 23.

Einspannlänge mm	Querschnitt mm ²	Schweißzeit s	Zulässige Stückzahl je Stunde	Stromverbrauch für 10 Verbödn. kWh
7...10	100	20...12	140...170	0,15
12...16	250	25...20	100...140	0,45
15...20	400	28...22	85...115	0,75
20...25	600	30...25	65...85	1,3
25...30	900	50...30	50...65	2,2
30...35	1200	80...45	40...45	3,4
35...40	1600	120...80	25	5,0
40...50	2500	180	12	10,0
40...58	3200	280	6	18,5
55...65	4000	380	3	30,0

Auf Grund einer größeren Anzahl von Eisenbahnwerkstättenarbeiten ließ sich feststellen, daß im Gesamtdurchschnitt die Kosten der Widerstandsschweißung nur 13 vH der Kosten und der Zeitaufwand nur 11 vH der Zeit bei Schmiedefeuerarbeit betragen. Außerdem ist noch zu berücksichtigen, daß das wesentlich schnellere Arbeiten der Schweißmaschine oft zur Beschleunigung anderer Arbeiten, z. B. zum Schnellausbessern von Fahrzeugen in Eisenbahnwerkstätten, beitragen kann.

Kettenschweißungen. Die Leistung elektrischer Kettenschweißmaschinen ergibt sich aus Tabelle 24. Ein tüchtiger Kettenschmied stellt demgegenüber z. B. bei

Tabelle 24.

Drahtdurchmesser in mm	2...6	5...8	7...12	10...16	12...20	20...26
Zahl der Ketten- schweißungen in der Minute	12...10 20...14	12...10 15...10	10...6 12...7	— 9...5	— 7...4	— 3...2
Leistungsaufnahme in kW	2...4	4...8	8...15	12...20	14...25	20...30
Stromverbrauch in kWh für 1000 Schweißstellen	5...25	15...60	40...150	90...320	150...500	180...800
Durchschnittliche Jahreslei- stung einer Maschine in t . .	50	75	150	300	500	750

einer 10 mm-Kette in der Stunde nur 15 Glieder her. Mit Feuerschweißung und Federhämmern sind in Amerika 60 Glieder in der Stunde bei 22 mm-Ketten erzielt worden.

B. Lichtbogenschweißungen.

Grundlegende Angaben über Handschweißungen von Stahl. Zunächst seien in Abb. 395 und 396 die Ergebnisse früherer Versuche der Verfasser angeführt, wobei

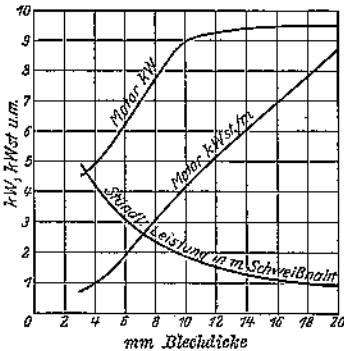


Abb. 395. Motorleistung, Motorstromverbrauch für 1 m Naht und stündliche Leistung in m Naht bei der Lichtbogenschweißung.

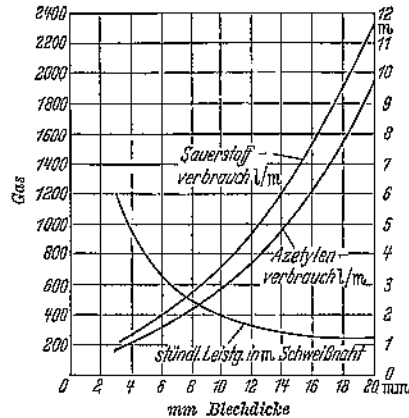


Abb. 396. Sauerstoff- und Azetylenverbrauch in l/m Naht und stündliche Leistung in m Naht beim Gasschweißen.

zu beachten ist, daß diese Ergebnisse weitgehend mit den heutigen übereinstimmen und daher zum Teil für die nachfolgenden Rechnungen übernommen werden können. Zu den angegebenen

Schweißleistungen sei noch bemerkt, daß sie ohne weiteres von geübten Schweißern kürzere Zeit (z. B. 1 h lang) erreicht werden können. Zur praktischen Verwertung der gefundenen Stundenhöchstleistungen sind in Abb. 397 vier Leistungskurven eingetragen. Die Kurve *a* zeigt die aus Abb. 395 entnommene, höchsterreichbare Stundenleistung in m Schweißnaht für die Lichtbogenschweißung. Gibt man zu der bei dieser Leistung gebrauchten Zeit etwa 25 vH Zuschlag, so kommt man auf die Leistungskurve *b*, die als die Normalleistung eines Schweißers im Betrieb bei kurzen Schweißungen bis zu etwa 1 h Schweißzeit auch einschließlich Nebenarbeiten angesehen werden kann. Für eine Tagesleistung von 8 h sind auf Grund der vorliegenden Unterlagen aus der Praxis etwa 40...70 vH (der Vornhundertersatz mit steigender Blechdicke stei-

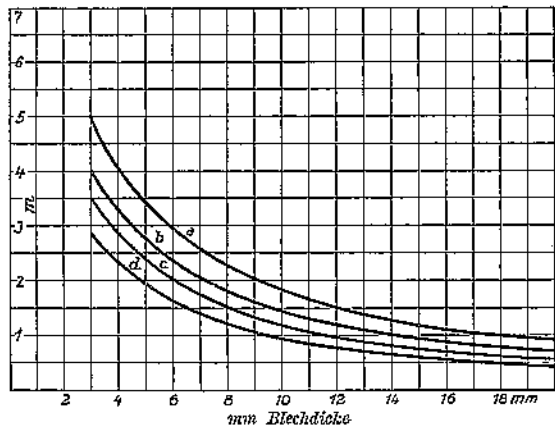


Abb. 397. Stündliche Höchst- und Normalleistungen in m Schweißnaht (Lichtbogenschweißung) bei kurzer und langer Arbeitszeit.

gung eines Schweißers im Betrieb bei kurzen Schweißungen bis zu etwa 1 h Schweißzeit auch einschließlich Nebenarbeiten angesehen werden kann. Für eine Tagesleistung von 8 h sind auf Grund der vorliegenden Unterlagen aus der Praxis etwa 40...70 vH (der Vornhundertersatz mit steigender Blechdicke stei-

gend) Zuschläge zu den für Kurve *a* gebrauchten Zeiten zu geben, um in Kurve *c* auf die erreichbare Leistung bei achtstündiger Schweißzeit zu kommen. Unter wiederum 25 vH Zuschlag zu den Schweißzeiten, die der Kurve *c* entsprechen, erhalten wir in Kurve *d* schließlich die durchschnittliche Betriebsleistung eines Schweißers bei achtstündiger Arbeitszeit. Hervorgehoben sei noch, daß sich alle Leistungskurven auf einfache Blechschweißungen, ohne wesentliche Ummendearbeiten usw., beziehen. In entsprechender Weise erhält man die Durchschnittsleistung beim Gasschweißen aus der Höchstleistung in Abb. 396, indem man wieder etwa 25 vH mehr an Zeit rechnet. Bei der Tagesleistung sind 50 bis 100 vH an Schweißzeit zuzuschlagen.

Man kann nun den im vorigen schon teilweise wiedergegebenen Grundlagen für die Selbstkostenermittlung von Schweißungen planmäßig durch weitere Versuchsschweißungen, Messungen bei praktischen Schweißarbeiten und durch Rechnung nachgehen. Nach den Unterlagen der Verfasser ergibt sich folgendes Bild¹. Für die Gasschweißung können die Angaben der Abb. 396 als erreichbare Betriebsleistungen übernommen werden, wobei im Hinblick auf die manchmal zu ungünstigen Angaben über die Gasschweißung besonders darauf hinzuweisen ist, daß allein die Anwendung der Rechtsschweißung eine Leistungssteigerung ergibt, die die Werte der Abb. 396 schon zu durchschnittlich erreichbaren macht. Bei der Lichtbogenschweißung kann die reine Schweißzeit auch aus den Abschmelzgeschwindigkeiten der verwendeten Elektroden hergeleitet werden, wie man dies des öfteren in Tabellenform findet. Es ist jedoch in jedem Fall erforderlich, diese Abschmelzgeschwindigkeiten durch Versuche zu ermitteln, da Elektrodendurchmesser, Ummantelung und die für die betreffende Elektrode zulässige Stromdichte die Abschmelzgeschwindigkeit beeinflussen.

Abb. 398 gibt einen Überblick über den Elektrodenverbrauch, wobei zu beachten ist, daß im Durchschnitt mit einem Gewichtsverlust von 30 vH (bezogen auf das Nahtgewicht) durch Abfall und Spritzer gerechnet werden muß; das reine

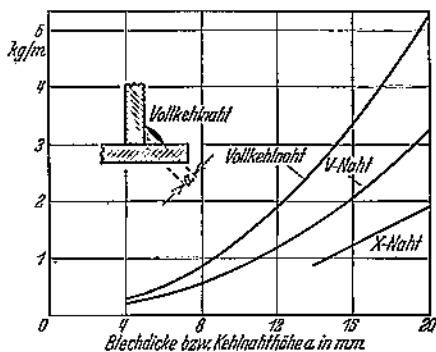


Abb. 398. Elektrodenverbrauch bei Lichtbogenschweißungen.

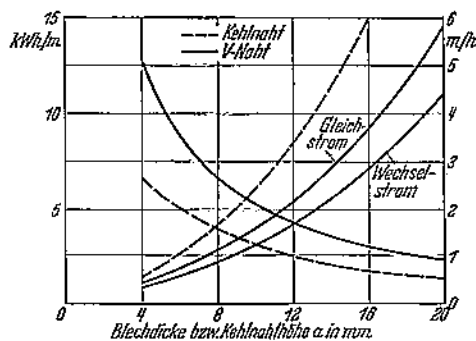


Abb. 399. Stromverbrauchs- und Leistungsangaben bei Lichtbogenschweißungen.

Schweißnahtgewicht ist also entsprechend geringer. In dieser und in den folgenden Abbildungen sind übrigens nur die Werte für 4...20 mm Blechedicke eingetragen, weil die z. T. errechneten Werte wegen der angenommenen Nahtformen (Kehlnaht, v- und x-Naht) nur für dieses Blechedickengebiet Gültigkeit haben. Abb. 399 bringt die Stromverbrauchs- und Leistungsangaben, die ersteren auf der Grundlage, daß, um 1 kg Nahtgewicht einzuschweißen, bei Gleichstromumfor-

¹ Siehe auch Horn-Schäfer: Werkst.-Technik 1933, S. 8.

mern (mit einem Wirkungsgrad von 50 vH) etwa 6 kWh und bei Wechselstromumspannern (mit einem Wirkungsgrad von 80 vH) etwa 4,5 kWh Stromverbrauch in Frage kommen. Bei allen Kehlnahtangaben sei besonders darauf hingewiesen, daß sie sich nicht auf die Blechdicke, sondern auf die Kehlnahthöhe α (Abb. 398) beziehen. Die Schweißzeiten in Abb. 399 sind gut erreichbare reine Schweißzeiten. Die Gesichtspunkte, die zu einer Erhöhung der Schweißzeit führen, sind zu zahlreich, um alle hier einzeln berücksichtigt werden zu können. Es sei nur auf das Auswechseln der Elektroden, das Reinigen und Ausrichten der Schweißnähte, die Zugänglichkeit der Nähte je nach Größe und Form des Werkstücks, die Unterschiede infolge der verschiedenen Blechdicken usw. hingewiesen. Man muß also, um auf die Gesamtarbeitszeit zu kommen, entweder Zuschläge (wie im vorigen Absatz) machen oder, was im Grunde natürlich dasselbe ist, mit einem Ausnutzungsfaktor rechnen, der in mittleren und größeren Schweißbetrieben etwa 0,6...0,7 sein wird, in kleineren Betrieben aber oft niedriger ist, wenn z. B. der Schweißer auch die Heft- und Zusammenbauarbeiten zu erledigen hat.

Schweißkostenaufstellung für den Einzelfall. Das Beispiel bezieht sich auf die reine Schweißarbeit. Die Vorbereitungskosten sind weggelassen, da sie nicht so einheitlich wie die Schweißung selbst behandelt werden können. Aufzustellen sind die Kosten an elektrischem Strom (bzw. an Gasen für die Gasschweißung), an Elektroden (Schweißdraht), an Lohn und an allgemeinen Werkstattunkosten; die letzteren werden als Vomhundertsatz der Löhne in den Werkstätten festgelegt. Die Kosten für Verzinsung, Abschreibung und Instandhaltung des Anlagekapitals sind, umgerechnet auf die Arbeitsstunde oder auf 1 m Schweißnaht, bei der Gasschweißung verhältnismäßig unbedeutend. Rechnet man als Gesamtkosten eines Schweißplatzes mit Entwickler 350 RM., so ergeben sich bei 6 vH Zinsen, 15 vH Abschreibung und 5 vH Instandhaltungskosten rund 90 RM. Jahreskosten oder für 1 m Schweißnaht = 0,18 RM. (bei 500 m Jahresleistung) bzw. 0,036 RM. (bei 2500 m Jahresleistung). Der Gleichstromumformer erfordert dagegen bei 1800 RM. Anschaffungskosten, einschließlich Einrichtung der Schweißstelle und Netzanschluß, und bei 6 vH Zinsen, 15 vH Abschreibung und 5 vH Instandhaltungskosten rund 470 RM. Jahreskosten oder für 1 m Schweißnaht 0,94 RM. bzw. 0,19 RM. Es seien nun zunächst die Kosten von 1 m Naht eines 10 mm-Blechs ausgerechnet und eine ungünstige Ausnutzung der Anlage mit 500 m Jahresleistung

Tabelle 25. Kosten einer Lichtbogen- bzw. Gasschweißung.

1 m Schweißnaht (V-Naht), 10 mm Blech (Handschweißung)						
Elektrische Lichtbogenschweißung	500 m	500 m	2500 m	Gasschweißung	500 m	2500 m
	20 Rpf.	20 Rpf.	4 Rpf.		Klein- betrieb	Groß- betrieb
	RM.	RM.	RM.		RM.	RM.
Stromverbrauch 4 kWh	0,80	0,80	0,16	Sauerstoff 0,7 m ³ (0,70 bzw. 0,20 RM./m ³)	0,49	0,14
Kapitaldienstkosten (470 RM. im Jahr)	0,94	0,94	0,19	Azetylen 0,6 m ³ (1,00 bzw. 0,90 RM./m ³)	0,60	0,54
Elektroden 0,8 kg	0,64	0,32	0,28	Kapitaldienst (90 RM. je Jahr)	0,18	0,04
Lohn 1/2 h	0,60	0,60	0,50	Schweißdraht 0,8 kg	0,32	0,28
Allgemeine Unkosten (125 vH vom Lohn)	0,75	0,75	0,63	Lohn 1/2 h	0,60	0,50
				Allgemeine Unkosten	0,75	0,63
Gesamtkosten	3,73	3,41	1,78	Gesamtkosten	2,94	2,13

(gleichzeitig auch mehr dem Kleinbetrieb entsprechend) einer günstigen Ausnutzung mit 2500 m Jahresleistung und vorteilhaften Strom- bzw. Gaspreisen

gegenübergestellt. Für den günstigeren Fall (gleichzeitig Großbetrieb) sind auch sinngemäß Schweißdrahtkosten und Lohn etwas niedriger angesetzt. Um die bei gleichem nacktem Draht besseren technologischen Ergebnisse der Gasschweißnaht etwas zu berücksichtigen, ist an einer Stelle die teure umhüllte Elektrode in die Rechnung eingeführt worden (in dem Fall, der 3,73 RM. Gesamtkosten ergibt).

Das durchgerechnete Beispiel (Tabelle 25) soll zunächst den Aufbau einer einfachen Schweißkostenaufstellung zeigen. Darüber hinaus erkennt man aber schon deutlich, wie verschieden die Gesamtkosten je nach den Grundpreisen der Rohstoffe und je nach dem Ausnutzungsgrad der Schweißanlage sein können. Insbesondere für die Lichtbogenschweißung findet man eine starke Abhängigkeit der Gesamtkosten vom Ausnutzungsgrad (Beschäftigungsgrad).

Vergleich von Lichtbogenschweißung und Gasschweißung. Ein wirtschaftlicher Vergleich beider Schweißverfahren für den einfachen Fall der von Hand geschweißten V-Naht läßt sich in großen Zügen durchführen, wenn man die im vorigen aufgestellte Einzelrechnung sinngemäß auf die Blechdicken ausdehnt, für die in den bisherigen Unterabschnitten und Abbildungen nähere Angaben gemacht wurden. Dann finden wir die in Abb. 400 eingetragenen Grenzkostenkurven, die selbstverständlich keine absoluten, keine äußersten Grenzen nach oben und unten darstellen, aber doch annähernd den Bereich zeigen, innerhalb dessen die Schweißkosten etwa schwanken werden. Ia und IIa geben die höchsten, Ib und IIb die niedrigsten Kosten wieder. Wenn man auch aus den Kurven keine zu weitgehenden Folgerungen ziehen darf, so kann man doch wohl sagen, daß im Kleinbetrieb mit seinem geringeren Ausnutzungsgrad die Gasschweißung im allgemeinen, selbst auch bei größeren Blechdicken, wirtschaftlich vorteilhafter sein wird, denn Kurve IIa bleibt stets deutlich unter Ia. Im größeren Betrieb und bei starker Ausnutzung liegt die Grenze für die wirtschaftliche Anwendung der Gasschweißung je nach den örtlichen und Betriebsverhältnissen etwa zwischen 4 und 6 mm Blechdicke. Darüber hinaus wird fast immer die Lichtbogenschweißung im Vorteil sein. Da jedoch im Einzelfall die technischen Vor-

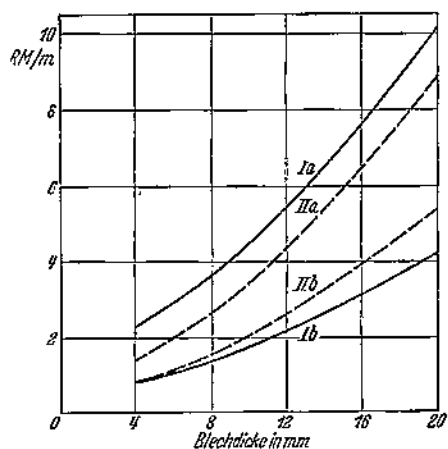


Abb. 400. Grenzkosten der V-Naht lichtbogen- und gasgeschweißt (I) und gasgeschweißt (II).

teile oder Verfahren, die Güte der Schweißnaht u. a. m. eine entscheidende Rolle spielen können, sei ausdrücklich noch einmal eine zu weitgehende Verallgemeinerung voriger Ergebnisse abgelehnt.

Angaben über Maschinenschweißungen von Stahl. Die bisher genannten Werte gelten sämtlich für Handbetrieb. Demgegenüber kommt man bei dem allerdings nur für Massenfertigung in Frage kommenden Maschinenbetrieb auf wesentlich höhere Leistungen, wie sie aus Tabelle 26 ersichtlich sind. Die Leistungen gelten sogar einschließlich der Nebenzeiten. Die reinen Schweißgeschwindigkeiten sind zum Teil noch wesentlich höher. Zum Beispiel hat man bei Widerstandsschweißmaschinen und 0,5 mm Blechdicke bis zu 540 m/h = 9 m/min erzielt. Die Rohrschweißmaschinen kommen auf so günstige Werte, weil sie eine fast ununterbrochene Arbeitsweise haben. Auf Angaben über Stromverbrauch usw. wird mit Absicht verzichtet, um eine gewisse Grenze im Umfang der wirtschaftlichen Betrachtungen nicht zu überschreiten.

Für die Arcatom-Maschinenschweißung werden gegenüber den in Tabelle 26 angeführten Werten von Lichtbogenschweißmaschinen noch höhere Werte angegeben¹, z. B. für 1 mm-Blech etwa 90 m/h, für 3 mm-Blech etwa 30 m/h, für 5 mm-Blech aber auch schon auf 10 m/h fallend. Beim Ellira-Schweißverfahren sind die reinen Schweißleistungen dickerer Bleche besonders hoch, z. B. beim 10 mm-Blech etwa 40 m/h, beim 30 mm-Blech etwa 14 m/h, beim 70 mm-Blech noch etwa 6 m/h. Aureden² weist aber besonders darauf hin, daß die Nebenzeiten (Auflegen des Kesselschusses auf die Schweißbahn, Ausrichten, Kupferschiene einbauen und abbauen, Ablegen des Schusses) bei einer Blechdicke von 22 mm z. B. etwa 6mal so hoch sind wie die reine Schweißzeit. Allgemein steigen die Ersparnisse und Vorteile des Elliraverfahrens mit zunehmender Wanddicke. 12 mm Blechdicke wird etwa die untere, gerade noch lohnende Grenze sein. Über 30 mm Blechdicke sind die Vorteile bereits erheblich.

Tabelle 26. Leistungen von Längsnahtschweißmaschinen in m/h.

Schweißverfahren	Blechdicke in mm						
	0,6	1,0	1,5	2	3	4	5
Gasschweißmaschinen	30	20	15	12	10	9	8
Lichtbogenschweißmaschinen	—	45	32	24	18	15	12
Widerstandsschweißmaschinen	120	100	60	—	—	—	—
Röhrenschweißung (Gas)	—	230	200	150	70	30	12
Röhrenschweißung (Widerstands- schweißung, Amerika)	—	—	—	180	100	60	30

Die Arcatomhandschweißung. Auf Grund praktischer Erfahrungen bei umfangreichen Schweißungen der Verfasser ergeben sich die in Tabelle 27 eingetragenen

Tabelle 27. Leistungs- und Verbrauchswerte der Arcatomschweißung (für 1 m Naht).

Blechdicke mm	Schweißzeit min	Elektroden- durchmesser mm	Wolfram- verbrauch mm	Wasserstoff- verbrauch l	Strom- stärke A	Strom- verbrauch kWh
2	6	1,5	2,8	50	20	0,2
3	8	1,5	6,0	70	23	0,24
4	11	1,5	6,8	100	23	0,45
6	16	3,0	11,0	150	46	1,32
8	25	3,0	39,0	220	70	2,25
10	32	3,0	74,0	310	76	3,80
12	46	3,0	143,0	430	87	5,70

Werte, die als gute Durchschnittswerte anzusehen sind. Der Verbrauch an Wolframelektroden hängt in hohem Maße von der Geschicklichkeit des Schweißers ab und wächst erheblich mit der Zahl der Zündungen, weshalb es praktisch wirtschaftlicher ist, den Lichtbogen im Leerlauf brennen zu lassen, anstatt ihn häufiger zu zünden. Die Schweißzeiten liegen bei 2...6 mm-Bleichen nicht viel günstiger als bei der normalen Lichtbogenschweißung, bei mehr als 6 mm Blechdicke liegen sie sogar höher, ebenso ist der Stromverbrauch im allgemeinen größer. Setzt man 1 m³ Wasserstoff mit 0,80 RM. und für 1,5 mm dicke Wolframelektroden 0,04 RM. je 10 mm Wolframverbrauch, für 3 mm-Elektroden 0,12 RM. je 10 mm Wolframverbrauch und im übrigen die bisher benutzten Werte ein, so ergibt sich, daß die Arcatomschweißung von etwa 4 mm Blechdicke an teurer wird als die Lichtbogenschweißung und daß ihre Kosten von etwa 6...8 mm Blechdicke an sehr stark

¹ Näheres siehe Elektroschweißg. 1939, S. 43.² Elektroschweißg. 1941, S. 149.

ansteigen. Bemerkenswert sind aber demgegenüber die guten Zähigkeits- und Festigkeitswerte der Arcatomschweißung, die Dichtigkeit der Naht und ihr gutes Aussehen, so daß man ihr bei hohen Ansprüchen an die Schweißnaht auch bei größeren Blechdicken trotz geringerer Wirtschaftlichkeit sehr wohl im Einzelfalle den Vorzug geben kann.

Gleichstrom- oder Wechselstromschweißung. Der Einfachheit halber seien zunächst die Kosten von 1 h Gleichstrom- bzw. Wechselstromschweißung einander gegenübergestellt. Dem Gleichstromumformer für 250 A mit Schweißplatzeinrichtung und Anschlußkosten (zusammen 1800 RM. Anlagewert) sind bei Wechselstromumspanner etwa 900 RM. entgegenzustellen. Elektrodenverbrauch (etwa 1 kg/h) und Schweißleistung (also auch der Lohn) seien in beiden Fällen zunächst gleich groß angenommen. Der Stromverbrauch für 1 kg Nahtgewicht ist nach früherem bei Gleichstrom 6 kWh und bei Wechselstrom 4,5 kWh. Unter Berücksichtigung von 30 vH Elektrodenabfall und Spritzverlust ist also der Stromverbrauch für 1 kg Elektroden bei Gleichstrom 4,6 kWh und bei Wechselstrom 3,5 kWh. Mit diesen Annahmen ergibt sich das Gesamtbild der Tabelle 28. Man erkennt, daß ein wesentlicher Unterschied zwischen den Gesamtkosten beider Schweißarten nicht besteht. Vielleicht könnte bei anderen Annahmen der Wechselstrompreis dem des Gleichstroms noch etwas genähert werden.

Tabelle 28. Gleichstrom- und Wechselstromschweißung.

	Gleichstrom RM.	Wechselstrom RM.
Gesamtkosten der Anlage	1800	900
Verzinsung (6 vH), Abschreibung (15 vH), Instandhaltung (5 bzw. 3 vH) bei 2400 h/Jahr	0,20	0,09
Stromkosten: 4,6 bzw. 3,5 kWh, je 0,10 RM.	0,46	0,35
Elektroden: 1 kg je 0,40 bzw. 0,80 RM.	0,40	0,80
Lohn: 1 h je 1,20 RM.	1,20	1,20
Kosten von 1 h	2,26	2,44

Nach diesen und früheren Ausführungen und nach sonstigen Stellungnahmen (s. z. B. Stieler, Der Einfluß der Stromart auf die Güte der Schweißnähte¹) kann man allgemein feststellen: Die Wechselstromschweißung verlangt umhüllte Elektroden und ist ungeeignet für die Kohlelichtbogenschweißung und für die Schweißung der Nichteisenmetalle. Wirtschaftlich sind Gleichstrom- und Wechselstromschweißung annähernd gleich zu bewerten, ebenso sind die Abschmelzgeschwindigkeiten ungefähr die gleichen. Der Wechselstromlichtbogen ist magnetischen Blaswirkungen gegenüber unempfindlicher als der Gleichstromlichtbogen. Das Schweißen mit Wechselstrom ist wegen der höheren Spannungen gefährlicher als das Schweißen mit Gleichstrom. Die mechanisch-technologischen Güterwerte und das Gefüge der Schweißungen sind bei beiden Verfahren gleichwertig.

Blanke oder umhüllte Elektroden. Wirtschaftlich gesehen ist nach Möglichkeit die billigere nackte Elektrode vorzuziehen. Auf eine Brückenschweißung mögen etwa 2 vH des Brückengewichts (von 1000 t) an Schweiße kommen; dies sind 20 t. Um 20 t Schweiße herzustellen, brauchen wir 26 t nackte oder etwa 30 t umhüllte Elektroden, bei letzteren mehr wegen der mitgewogenen und also mit bezahlten Umhüllung, was wir übrigens früher — der kleinen Mengen halber — nicht berücksichtigt hatten. Bei einem Großhandelspreis von 0,30 RM. je kg nackter Elektroden kostet der gesamte Elektrodenwerkstoff für die Brücke

¹ Elektroschweißg. 1937, S. 61.

7800 RM.; bei 0,80...1,20 RM. je kg umhüllter Elektroden kostet er 24000 bis 36000 RM., ein gewaltiger Unterschied. Nun könnte man vielleicht bei einer hochwertigen umhüllten Elektrode — aber nur bei dieser, die im vorliegenden Fall mindestens 1,20 RM. je kg kosten würde — den Querschnitt und damit das Gewicht der Schweißnähte verringern, entsprechend etwa der angenommenen höheren Zugfestigkeit. Nimmt man aber selbst einmal an, daß dann nur die Hälfte des Gewichts an Schweiß erforderlich wäre — was praktisch bis auf weiteres nicht zugelassen werden dürfte —, so kommt man immer noch auf die im Vergleich zu nackten viel zu hohen Kosten der umhüllten Elektroden von 18000 RM.

Glühkosten von Schweißungen. Das Glühen geschweißter Kesseltrommeln kommt nach einer Umfrage bei verschiedenen Herstellerwerken beim Spannungsfreiglühen auf etwa 7...10 vH und beim Normalglühen auf etwa 10...15 vH des Herstellungswertes zu stehen. Diese Zahlen gelten für mittlere Blechdicken und Kessellängen von 5...6 m. Bei größeren Abmessungen werden die Glühkosten höher, bei kleineren entsprechend niedriger liegen.

Ausbesserungsschweißungen. Aus einer sehr großen Zahl von Ausbesserungsschweißungen auf Hüttenwerken, die hauptsächlich mit Hilfe der Lichtbogenschweißung ausgeführt wurden, sind in Tabelle 29 einige kennzeichnende Beispiele wiedergegeben. Sie zeigen einmal die verschiedensten Gewichtsverhältnisse, u. a. auch besonders große Schweißungen, und sodann den großen wirtschaftlichen Vorteil der Schweißung als Ausbesserungsmittel. Meistens liegen, wie bei den Stücken der Tabelle 29, die gesamten Schweißkosten zwischen nur 15...50 vH der Kosten eines neuen Werkstücks.

Dabei ist noch zu betonen, daß der Wert der Schweißung in diesen Fällen nicht nur in der Kostenersparnis am Arbeitsstück, sondern vor allem auch in derjenigen Zeit- und Kostenersparnis liegt, die durch schnellere Wiederinbetriebsetzung der Maschinen- und Werksanlagen erzielt wird.

Tabelle 29. Ausbesserungsschweißungen.

Gegenstand	Gewicht kg	Neuwert RM.	Gesamte Schweiß- kosten RM.
Steuerbock	47	28	15
Lagerbock	175	105	18
Kammwalze	620	560	141
Zylinderdeckel . . .	2970	1930	210
Walzenständer . . .	17000	6120	1734

Lichtbogenschweißungen von Leichtmetallen. Für die Lichtbogenschweißung von Aluminium wird eine Schweißgeschwindigkeit von 0,2 m/min bei 3 mm-Blech, 0,25 m/min bei 5 mm-Blech, 0,3 m/min bei 7 mm-Blech und 0,3...0,35 m/min bei 10 mm-Blech angegeben. Beim Weibelfverfahren wurde für Bleche von 0,5...2 mm Dicke eine Schweißgeschwindigkeit von 0,5...1,3 m/min festgestellt. Die Tabelle 30

Tabelle 30. Arcatom-Aluminiumschweißung.

Blechdicke mm	Elektroden- durchmesser mm	Stromstärke A	Schweißzeit min/m	Wasserstoff- verbrauch l/m	Strom- verbrauch kWh/m
1	1,5	15	3...3,5	34	0,10
2	1,5	20	3,5...4	45	0,14
4	1,5 bzw. 2	29	6...7	80	0,34
6	2	37	9...10	145	0,68
10	2	48	18...20	300	1,70

bringt sodann noch Leistungsangaben für die Arcatomschweißung von Aluminium und Aluminiumlegierungen. Die Werte gelten für Stumpf- und Außenkantennähte. Man rechnet je Arbeitstag mit dem Verbrauch eines Wolfram-Elektrodenpaares.

C. Schweißen gegenüber Nieten und Gießen.

Geschweißt oder genietet. In Abb. 401 ist ein grundsätzliches Beispiel aus weitgehenden Versuchen von Strelow wiedergegeben, worin die elektrische Lichtbogenschweißung für verschiedene Blechdicken einer zweireihigen Zickzacknietung gegenübergestellt ist. Bei anderen Nietverbindungen wird das Bild noch günstiger für die Schweißung. Im einzelnen ersieht man aus der Abbildung, daß mit wachsender Blechdicke bei der Schweißung die Lohnkosten stark steigen, bei der Nietung dagegen die Kosten des Werkstoffs der Überlappung und der Nieten. Wenn diese, was natürlich unzulässig ist, in einem Vergleich fortgelassen werden, so ändert sich das Bild sofort zugunsten der Nietung. Aus Abb. 401 ist zu erkennen,

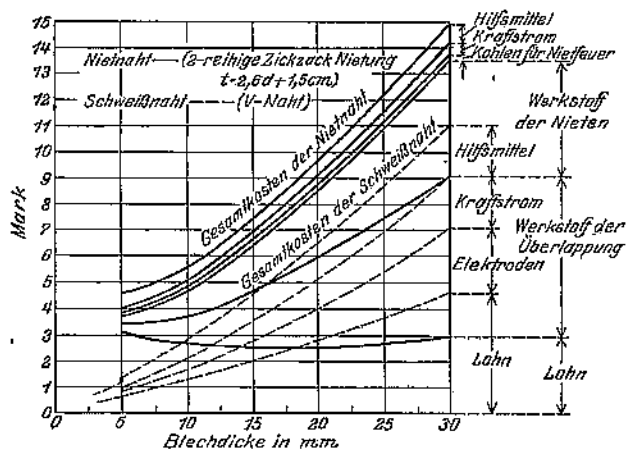


Abb. 401. Kosten von 1 m Nietnaht und 1 m Elektroschweißnaht.

daß die Schweißung bei Blechen bis etwa 10 mm Dicke nur halb so teuer ist wie die Nietung und auch bei dickeren Blechen immer noch wesentlich billiger bleibt.

Die Gewichtsparsnis durch Schweißen bei deutschen Kriegsschiffen wird zu 18...25 vH angegeben. — Ein geschweißter 70 t-Eisenbahnwagen wiegt nur 27,4 t, d. h. nicht mehr als ein 50 t-Wagen der genieteten Ausführung. Gegenüber dem früheren 70 t-Wagen wurden 4,8 t oder 18,6 vH an

totem Gewicht durch Anwendung der Schweißung gespart. — Die neue Tyrsbrücke über die Radbuza bei Pilsen ist eine der ersten vollständig geschweißten Straßenbrücken; sie hat eine Spannweite von 50,60 m und wiegt 111 t, während eine genietete Brücke 135,4 t, also 22 vH mehr gewogen hätte. — Im Mittel dürften geschweißte Konstruktionen etwa 12 vH, in Einzelfällen bis zu 30 vH leichter sein als genietete.

Geschweißt oder gegossen. Neuere Untersuchungen über diese Frage stammen u. a. von Stieler¹ und von Krug². Hiernach und auf Grund allgemeiner praktischer Erfahrungen kann gesagt werden: Die Vorteile des Gußstücks liegen in der besseren Bearbeitbarkeit, Gleitfähigkeit, Verschleißfestigkeit und im allgemeinen im geringeren Preis bei höherer Stückzahl. Die Vorteile des geschweißten Stücks liegen in der wesentlich geringeren Ausschußgefahr, kürzerer Herstellungszeit, im geringeren Gewicht und in dem wohl immer geringeren Preis bei Einzelherstellung. Die Gewichtseinsparungen betragen in zahlreichen Fällen nach Kegler³ 15...50 vH, eine Angabe, die aber nicht ohne weiteres verallgemeinert werden darf. Zur Frage der größeren oder geringeren Dämpfungsfähigkeit ist darauf hinzuweisen, daß das Gußeisen als Werkstoff dem Stahl an Dämpfungsfähigkeit weit überlegen ist. Der 1938 von Kienzle vorgelegte Bericht „Über das Verhalten von Drehbankbetten im Stahlleichtbau“ ergab aber, daß stahlbaugerechte Konstruktionen schwingungstechnisch keine Nachteile besitzen, daß sogar eine ge-

¹ Gießerei 1938, S. 496. ² Z. VDI 1940, S. 11.

³ Elektroschweißg. 1938, S. 201.

schweißte Stahlbaugruppe besser als die gleiche gegossene dämpfen kann. Die Dämpfung einer Konstruktion ist nicht in erster Linie eine Frage des Werkstoffs, sondern der sachgemäßen Gestaltung. Alles in allem kann die Frage „Schweißen oder Gießen?“ nicht allgemeingültig, sondern nur von Fall zu Fall entschieden werden.

IX. Förderung des elektrischen Schweißens.

Die folgenden Ausführungen sollen nur einen zusammenfassenden Überblick geben. Hinsichtlich der Einzelheiten wird auf die angeführten genaueren Unterlagen verwiesen.

Forschung, Vorträge, Zeitschriften. Auf dem Gebiet aller neueren Schweißverfahren arbeiten die Laboratorien einiger Hoch- und Fachschulen und industrieller Werke und die Großlehrwerkstätten des Deutschen Verbandes für Schweißtechnik und Azetylen (DVSA)¹ in Berlin, Duisburg, Halle, Kattowitz und Wien, der Fachausschuß für Schweißtechnik im VDI und hinsichtlich der Elektroschweißung noch die Deutsche Gesellschaft für Elektroschweißung. Vorträge werden insbesondere seitens der genannten Stellen und von Vertretern der Fachindustrie abgehalten. Als Zeitschriften kommen in Frage: Die Elektroschweißung, Einzelnummern der Z. d. VDI, des Maschinenbaus, des Technischen Zentralblatts, Mitteilungen des Fachausschusses für Schweißtechnik u. a. m., während die Autogene Metallbearbeitung in erster Linie die Gasschweißung vertritt.

Schweißerlehrgänge. In richtiger Erkenntnis der außerordentlichen Bedeutung, die eine weitgehende Verbreitung der grundlegenden Kenntnisse über die neueren Schweißverfahren sowohl für gute Schweißungen als auch für die Verbesserung und Weiterausgestaltung der Verfahren hat, sind bereits in den Jahren von 1908 ab Schweißlehrgänge eingerichtet worden, und zwar zuerst für die Gasschweißung von Ing. Kautny, dem Altmeister der deutschen Gasschweißtechnik, an der Maschinenbauschule in Köln und von Prof. Richter an den Technischen Staatslehranstalten in Hamburg. Später und auch noch bis etwa Mitte der 20er Jahre ging die Weiterentwicklung der Schweißer Ausbildung nur verhältnismäßig langsam vor sich. Im Jahre 1924 gründete der Verband für autogene Metallbearbeitung einen Ausschuß zur Hebung des Schweißerhandwerks und 1925 bildete der Fachausschuß für Schweißtechnik im VDI eine Gruppe für Personalangelegenheiten, deren Leitung zunächst Dr. Mies, Hamburg, und von 1926 ab Prof. Dr. Schimpke übernahm.

Bereits im Jahre 1928 konnten auf Grund der Gemeinschaftsarbeit des Fachausschusses für Schweißtechnik im VDI und des DVSA die ersten „Richtlinien für Schweißkurse“ herausgegeben werden. Sie unterschieden schon zwischen Einführungs-, Fortgeschrittenen- und Sonderlehrgängen, und zwar sowohl für Gas- als auch für Lichtbogenschweißung, und dauerten zunächst 30 bis etwa 80 Stunden. Im Jahre 1930 trat zu den genannten Verbänden die Deutsche Gesellschaft für Elektroschweißung (DGE) hinzu, und der Gesamtverband Deutscher Metallindustrieller schuf zusammen mit diesen und anderen an der Schweißer Ausbildung interessierten Stellen eine „Arbeitsgemeinschaft für Schmelzschweißer Ausbildung“. Die von ihr herausgegebenen Richtlinien nebst Prüfungsordnung waren eine wertvolle Grundlage für die neue Auflage der „Richtlinien

¹ Früher Verband für autogene Metallbearbeitung (VAM) und Deutscher Azetylenverein (DAV).

für Schweißlehrgänge“. Diese Richtlinien wurden 1934...1936 von den früher genannten schweißtechnischen Verbänden bearbeitet, zu denen noch das Amt für Arbeitsführung und Berufserziehung der DAF. hinzutrat. Außer dem Grundlehrgang von 44 Stunden wurden größere Ausbildungslehrgänge bis zu 220 Stunden (gleich 5 Wochen als Tageslehrgang) eingeführt und erstmalig eine Prüfungsordnung für den Abschluß des 220 Stunden-Lehrgangs aufgestellt. Die Richtlinien wurden in dieser Form Mitte 1936 veröffentlicht und erhielten später noch in einem Anhang Unfallverhütungsvorschriften. Der Plan, die Richtlinien als DIN-Vornorm herauszubringen, wurde zurückgestellt.

Im Jahre 1937 wurde der Deutsche Ausschuß für Technisches Schulwesen — jetzt Reichsinstitut für Berufsausbildung in Handel und Gewerbe — vom Reichswirtschaftsministerium beauftragt, die Richtlinien für Schweißlehrgänge mit den schweißtechnischen Verbänden zusammen auf eine derartige Form zu bringen, daß sie vom Reichswirtschaftsministerium als allgemeinverbindlich erklärt werden konnten. Zur Durchführung der sich aus den Richtlinien ergebenden Prüfungen bei den 220 Stunden-Lehrgängen war ebenfalls im Jahre 1937 vom DVSA, der DGE und der DAF, als den mit der Durchführung der Schweißlehrgänge hauptsächlich betrauten Stellen, ein „Hauptausschuß für die Prüfung angelernter Schweißer“ gegründet worden, der sich bereits um die Aufstellung und Einführung einer Reihe von Bezirks- bzw. Orts-Prüfungsausschüssen verdient gemacht hat. Im Laufe des Jahres 1939 wurde dieser Hauptprüfungsausschuß in eine „Arbeitsgemeinschaft für Schweißerausbildung“ umgeformt, die nunmehr aus dem Fachausschuß für Schweißtechnik im VDI, dem DVSA, der DGE und der DAF besteht. Diese Arbeitsgemeinschaft hat im Einvernehmen mit dem Reichsinstitut für Berufsbildung in Handel und Gewerbe im Frühjahr 1940 die Richtlinien für Schweißlehrgänge in neubearbeiteter Form herausgegeben.

Sonderlehrgänge. Erstmals wurde 1931 in DIN 4100 (Vorschriften für geschweißte Stahlbauten), dann 1935 in DIN 2470 (Richtlinien für Gasrohrleitungen mit geschweißten Verbindungen usw.) und 1937 in DIN 4101 (geschweißte Straßenbrücken) auf gute Schweißerausbildung durch Einfügung der Prüfungsvorschriften hingewiesen. Ferner gab der DVSA unter Mitwirkung seines Technischen Ausschusses in den Jahren 1937 und 1938 Lehrpläne zu Lehrgängen für Rohrschweißer und für Leichtmetallschweißer heraus. Das Reichsbahnzentralamt veröffentlichte 1938 „Vorläufige Vorschriften für die Prüfung und Ausbildung von Schweißfachingenieuren und Schweißern für Privatbahnbetriebe“, in denen bezüglich der Schweißer eine Prüfung für einfache und eine solche für hochwertige Arbeiten sowie noch Ergänzungsprüfungen für Kesselschweißer und für Schweißer an kupfernen Feuerbüchsen vorgesehen sind. Die Ausbildungsdauer beträgt für Schweißfachingenieure 4 Wochen, für Schweißer 3 bzw. 6...8 Wochen. Weiter sind am 30. November 1938 vom Reichswirtschaftsministerium „Richtlinien für die Ausbildung und Prüfung von Kesselschweißern“ erlassen worden, in denen entweder der Besuch und Abschluß des früher erwähnten 220 Stunden-Lehrgangs der Richtlinien für Schweißlehrgänge und mindestens einjährige Schweißerpraxis verlangt wird oder mehrjährige Schweißerpraxis und zusätzlich der Nachweis von Kenntnissen, die einer Ausbildung in einem großen Schweißlehrgang der Richtlinien entsprechen. Im Jahre 1939 brachte der DVSA sodann einen Lehrgang für das Gasschweißen von Landmaschinenteilen heraus und einen Lehrgang für die schweißtechnische Schulung der Gewerbelehrer. Im selben Jahre kam es erstmalig zu Sonderlehrgängen für Zinkschweißung, deren Ursache in der Einsparung von Lötzinn und im Austausch von Messing und Aluminium gegen Zink und Zinklegierungen zu suchen ist. Schließlich ist noch hervorzuheben, daß

die bereits erwähnte DIN 2470 hinsichtlich der in ihr als Anhang bisher verankerten „Richtlinien für die Prüfung von Rohrschweißern“ zur Zeit einer Neubearbeitung unterliegt. Da nicht nur für die Schweißung von Ferngasleitungen, für die der Anhang von DIN 2470 in erster Linie in Betracht kam, sondern auch z. B. im Zentral- und Fernheizungsbau, im Dampfkesselbau, Wasserleitungsbau usw. ein Bedürfnis für solche Prüfungen besteht, erschien es zweckmäßig, diese Richtlinien von DIN 2470 abzutrennen und als selbständige Norm für alle Anwendungsgebiete der Rohrschweißung herauszugeben. Die Neufassung (DIN Entwurf 2471) ist in den Zeitschriften „Autogene Metallbearbeitung“ und „Elektroschweißung“ vom Deutschen Normenausschuß veröffentlicht worden und dürfte in absehbarer Zeit verabschiedet werden.

Praktische Durchführung der Schweißlehrgänge. Sie ist einerseits vom DVSA der DGE und der DAF und andererseits von der Deutschen Reichsbahn und der Industrie sichergestellt worden. Schon 1928 wurden vom DVSA erstmalig Lehrschweißerprüfungen abgehalten. Allein bis Ende 1938 wurden in 24 Prüfungen 369 Lehrschweißer geprüft, von denen 287 die Prüfung bestanden haben. Alle Lehrschweißer werden jetzt nach je 3 Jahren erneut in mehrwöchigen Lehrgängen geschult und nachgeprüft. Ebenso müssen sich nach und nach sämtliche Lehrgangsleiter eingehenden Schulungslehrgängen unterziehen. Für alle diese Lehrgänge und Prüfungen sind vom Technischen Ausschuß des DVSA eingehende Richtlinien ausgearbeitet und in den Jahren 1937 und 1938 überprüft und weiter ausgestaltet worden. Die in den Jahren 1927...1940 gegründeten Großlehrwerkstätten (schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalten) des DVSA in Berlin, Duisburg, Halle, Kattowitz und Wien sind in erster Linie dazu da und in der Lage, die Prüfung der Lehrschweißer, die umfangreicheren Schweißlehrgänge von 220 und mehr Stunden Dauer und die Sonderlehrgänge durchzuführen, unter letzteren insbesondere auch die Lehrgänge für Privatbahnbetriebe und die für Kesselschweißer gemäß den bereits erwähnten, 1938 erlassenen Richtlinien.

Lehrlings-, Gesellen- und Meisterausbildung. Die ersten Lehrlinge wurden in großen Industrierwerken und bei der Reichsbahn ausgebildet und haben etwa 1927 ihre Gesellenprüfung abgelegt. Bei zunächst vierjähriger Lehrzeit kamen meistens etwa 1½ Jahre auf eine allgemeine Schlosserausbildung und 2½ Jahre auf eine Ausbildung als Schmelzschweißer für Gas- und Lichtbogenschweißung. Das Handwerk begnügte sich bisher damit, ausreichende Kenntnisse in der Schmelzschweißung bei den Gesellenprüfungen der Schlosser, Schmiede usw. zu fordern. Im Jahre 1929 veröffentlichte der Verband Berliner Metallindustrieller erstmalig einen „Ausbildungslehrgang für Schmelzschweißer“. Im Jahre 1936 stellte der Deutsche Ausschuß für Technisches Schulwesen Berufsbilder und Prüfungsanforderungen für Schmelzschweißer bei Industrie-Facharbeiterprüfungen auf. Er hatte auch vorher schon Lehrgänge und Anlerngänge für die planmäßige praktische Ausbildung im Gas- und Lichtbogenschweißen mit zahlreichen Arbeitsbeispielen herausgegeben.

Inzwischen hat das Reichsinstitut für Berufsausbildung in Handel und Gewerbe (früher: Deutscher Ausschuß für Technisches Schulwesen) in Zusammenarbeit mit der Reichsgruppe Industrie, der DAF. und den schweißtechnischen Fachverbänden das Berufsbild, die Prüfungsanforderungen und den Berufsbildungsplan für den Lehrberuf Schmelzschweißer erarbeitet sowie das Berufsbild und die Prüfungsanforderungen für den Schmelzschweißer-Lehrmeister und ferner hinsichtlich der Anlernberufe Gasschweißer und Lichtbogenschweißer das Berufsbild und die Ausbildungsrichtlinien. Die hiezugehörigen Prüfungsanforderungen und Berufsbildungspläne sowie die entsprechenden Unterlagen für die Lehrmeister sind noch in

Bearbeitung. Für den Anlernberuf ist eine Ausbildungszeit von $1\frac{1}{2}$ Jahren vorgesehen. Der Lehrberuf Schmelzschweißer, der am 11. November 1936 als industrieller Lehrberuf anerkannt worden ist, sieht eine auf 3 Jahre herabgesetzte Lehrzeit vor. Die vom Reichsinstitut erstellten amtlichen Berufsausbildungsunterlagen machen amtliche schweißtechnische Prüfungsausschüsse bei den Industrie- und Handelskammern erforderlich, und zwar sowohl für Facharbeiter bzw. angelernte Arbeiter als auch für die Lehrmeister. Für das Handwerk sind letzthin (1942) „Fachliche Vorschriften für die Meisterprüfung im Schweißerhandwerk“ herausgekommen. Für die Industrie ist eine entsprechende Meisterschulung und Anerkennung geplant.

Schweißtechnische Ausbildung der Ingenieure. Sie muß schon auf den technischen Hoch- und Fachschulen einsetzen und ist nur für den Sonderfall des Schweißfachingenieurs durch entsprechende Lehrgänge zu ergänzen. Die Hoch- und Fachschule muß jedem angehenden Konstrukteur und Betriebsingenieur bereits die werkstoffkundlichen Unterlagen für das Schweißen, die Grundbegriffe und Vorgänge der wichtigsten Schweißverfahren und die Grundbegriffe des schweißgerechten Konstruierens beibringen. An einer großen Anzahl von Hoch- und Fachschulen sind, nicht zum mindesten durch Vermittlung der schweißtechnischen Verbände und durch Angliederung von Schweißlehrgängen, ausreichende Schweißeinrichtungen für Unterrichts-, Versuchs- und Forschungszwecke vorhanden. Anschauungsunterlagen und Lichtbilder haben im Laufe der Jahre sowohl die schweißtechnischen Verbände als auch die technisch-wissenschaftliche Lehrmittelzentrale und der Deutsche Ausschuß für Technisches Schulwesen, letzterer insbesondere auch in Lehrgangsblättern und Wandtafeln, zusammengetragen. Der zunächst bestehende Mangel an geeigneten Lehrkräften ist teils dadurch behoben worden, daß viele Dozenten sich an Schweißlehrgängen beteiligten und einarbeiteten, teils auch dadurch, daß jetzt doch schon mehr schweißtechnisch in Schule und Praxis vorgebildete Lehrkräfte an die Hoch- und Fachschulen kommen. Der Umfang des schweißtechnischen Unterrichts ist allerdings an den einzelnen Schulen noch sehr verschieden. Meistens wird ein Teil des technologischen Unterrichts dafür zur Verfügung gestellt. Praktische Übungen kommen vor allem dort in Frage, wo insbesondere durch gleichzeitige Abhaltung von Schweißlehrgängen genügend Einrichtungen und Anleitungen gegeben sind. Die Studierenden haben aber in diesen Fällen auch Gelegenheiten, an den verschiedenen Arten von Schweißlehrgängen teilzunehmen, da diese im allgemeinen in den Abendstunden abgehalten werden. —

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die schweißtechnische Ausbildung in Deutschland insbesondere in den letzten 15 Jahren wesentlich weiter entwickelt worden ist und heute bereits auf einer erfreulich hohen Stufe steht.

Wichtige DIN-Normen.

1901...1903 und 1908 Schläuche für Schweißbrenner und Schlauchtüllen.

1904 und 1905 Schweiß- und Schneidbrenner.

1906, 1907 und 1909 Gasdruckminderer, Manometer, Anschlußbügel.

1910...1912 Begriffe und Zeichen.

1913 (Vornorm) Schweißdraht für Gas- und Lichtbogenschweißung von Stahl.

1914 Richtlinien für die Prüfung von Schweißverbindungen mit Röntgen- und Gammastrahlen.

2470 Richtlinien für Gasrohrleitungen mit geschweißten Verbindungen von mehr als 200 mm Durchmesser und mehr als 1 kg/cm^2 Betriebsüberdruck.

2471 (Entwurf) Richtlinien für die Prüfung von Rohrschweißern.

4100 Vorschriften für geschweißte Stahlhochbauten.

4101 Vorschriften für geschweißte vollwandige stählerne Straßenbrücken.

4664...4672 Stahlflaschen und Zubehör.

Sonstige wichtige Vorschriften.

Deutsche Azetylenverordnung.

Werkstoff- und Bauvorschriften für Landdampfkessel.

Richtlinien für Schweißlehrgänge.

Deutsche Reichsbahn (Lieferbedingungen für Schweißdraht. Vorschriften über das Schweißen von Brücken, Vorschriften für geschweißte Fahrzeuge [Vogefal]).

Germanischer Lloyd (Elektrische Schweißung von Schiffen).

Regeln für die Bewertung und Prüfung von Gleichstrom-Lichtbogenschweißmaschinen.

Sachverzeichnis.

- Abbrennverfahren 45.
 Äußeres der Schweißumform-
 mer 92.
 Aldroy 35.
 Alexanderverfahren 255.
 Alloy Welding-Elektroden
 188.
 Aludur 35.
 Aluminium 34.
 Aluminiumlegierungen 35,
 251.
 Aluminiumschweißung 47, 65,
 250.
 Ampere 11.
 Ankerrückwirkung 81.
 Anschlußklemme 111.
 Anzapfregelung 85.
 Arcatomschweißung 256.
 Arcogenschweißung 259.
 Armcoeisen 221.
 Arten der Schweißverfahren
 1, 2.
 Aufschweißbiegeprobe 284.
 Ausbesserungsschweißungen
 184, 186, 193.
 Ausbildung der Schweißer
 307.
 Aussehen der Schweißnaht
 132.
 Austenit 31.
 Autogenes Schneiden 10.
 Autogenes Schweißen 7.
 Automatische Schweißung 97.
 Azotylenschweißung 7.

 Begriff des Schweißens 1.
 Behälterschweißung 177.
 Bekleidung 114.
 Belastungsprobe 271, 279.
 Benardosverfahren 19.
 Benzolschweißung 8.
 Berechnung von Schweißver-
 bindungen 159.
 Biegeversuch 274.
 Blaswirkungen 127.
 Blaugassschweißung 8.
 Blechschweißung 137.
 Blei 36.
 Bleischweißung 249.
 Blindleistung 17.
 Brennschneiden 10.
 Bronze 34.

 Bronzeschweißung 247.
 Brückenbau 208, 212.

 Charakteristik des Licht-
 bogens 67.
 Chemische Prüfungen der
 Schweißnaht 201.
 Chromstahl usw. 28.

 Dampfkesselschweißung 183.
 Dauerversuche 276.
 Dichtigkeitsprüfung 265.
 Dickblechschweißung 144.
 Doppelpunktschweißung 49.
 Drehstrom 13.
 Dreieckschaltung 87.
 Dreiphasiger Anschluß von
 Umspannern 88.
 Drosselspule 76, 79, 84.
 Dünnblechschweißung 143.
 Duralumin 35.
 Dynamische Kennlinie 69.
 Dynamomaschine 14.

 Edelstahl 24.
 Eigenerrregung 15, 80.
 Einbrand 140.
 Einheitsgewichte der Metalle
 22.
 Einspannlängen 43.
 Einspannvorrichtungen 40.
 Eisen 21, 24.
 Eisenbahnfahrzeuge 199.
 Eisenblechschweißung 137.
 Elektrische Grundlagen 10.
 Elektrische Maßeinheiten 10.
 Elektrisches Schneiden 261.
 Elektroden 116.
 Elektrodenformen 52, 62.
 Elektrodenhalter 110.
 Elektrodenhaltung 126.
 Elektrodenumhüllungen 122.
 Elektroesse 47.
 Elektrolyse 20.
 Elektrolytkupfer 33.
 Elektromaschinenbau 189.
 Elektron 36.
 Elektronen 66.
 Elektrostahl 24.
 Elfin-Hafertgutverfahren 98.
 Elhra-Verfahren 105.
 Erstarrungskurve 28.

 Erstarrungsschaubild 28.
 Eutektikum 29.
 Eutektoid 31.

 Fahrbare Umformer usw. 92.
 Fahrzeugbau 198.
 Faltversuch 274.
 Farbe der Metalle 21.
 Ferrit 30.
 Fesaverfahren 63.
 Festigkeitsprüfungen der
 Schweißnaht 271.
 Feuerschweißung 2.
 Filmaufnahmen 71.
 Flußstahl 21, 24.
 Förderanlagen 209.
 Förderung des Schweißens
 307.
 Fremderregung 15.
 Frequenz 13.
 Führung der Elektroden 128.

 Gammastrahlen 270.
 Gasbehälterschweißung 180.
 Gas-elektrische Schweißung
 254.
 Gasschmelzschweißung 7.
 Gefügebau der Schweiße
 155.
 Gegenverbundwicklung 79.
 Generator 14, 78.
 Geschlossene Längen 43.
 Getauchte Elektroden 118.
 Gewicht der Metalle 22.
 Gleichrichter 90.
 Gleichstrom 13, 15.
 Gleichstromschweißum-
 former 78.
 Glühbehandlung 285.
 Gold 37.
 Graphit (im Gußeisen) 32.
 Grundlagen, elektrische 10.
 Güte der Schweißnaht 263.
 Gußeisen 25.
 Gußeisenkaltschweißung 229.
 Gußeisenwarmschweißung
 235.
 Gußspannungen 26.
 Gußstahl 24.

 Hämmern der Schweiße 158.
 Härteprüfung 265.

Hafergut 99.
 Halbwarmschweißung 241.
 Hammerschweißung 2.
 Handwerk des Schweißers 309.
 Hartguß 26.
 Hartmetalle 225.
 Hauptstrommaschine 15.
 Hilpert 71.
 Hochfrequenzstrom 69.
 Höhnsche Laschen 136, 187.
 Hohlkörperschweißung 53.
 Hoho 20.
 Hüttenkupfer 33.
 Hydronalium 35.
 Hysteresis 69.
 Ionen 66.
 Joule 11.
 Joulesches Gesetz 12.
 Kabel 109.
 Kaelverfahren 107.
 Kalkschweißung 229.
 Kastadensteuerung 61.
 Kohlschweißung 136, 142.
 Kennlinie (des Lichtbogens) 67.
 Kerbschlagversuch 275.
 Kesselschweißung 177.
 Kettenschweißmaschinen 39.
 Kilowattstunde 10.
 Klemmbacken 40.
 Klemmen 111.
 Kohlelektroden 116.
 Kohlelichtbogen 72.
 Kolben 111.
 Korrosion 23.
 Kosten des elektrischen Schweißens 296.
 Kraftmaschinen 194.
 Kriegsschiffbau 206.
 Kühlung (Stumpfschweißung) 40.
 Kupfer 33.
 Kupferschweißung 44, 47, 243.
 Kurse 307.
 Längsnahtschweißmaschine 58.
 Lagrange 20.
 Langmuirgerät 256.
 Laschenschweißung 136, 187.
 Lodeburit 31.
 Legierte Stähle 24, 203.
 Legierungen 21.
 Leistung (elektrische) 11.
 Leistungen der elektrischen Schweißverfahren 296.
 Leistungsfaktor 17.
 Leitfähigkeit 12.
 Leitungswiderstand 11.

Lesselsche Schlauchelektrode 245.
 Leuchtgasschweißung 8.
 Lichtbogen 65.
 Lichtbogenschweißverfahren 18, 65.
 Lichtstrahlen 112.
 Lokomotivrahmen 200.
 Luftspaltregelung 86.
 Magnesium 36, 252.
 Magnetpulververfahren 266.
 Magnewin 30.
 Mangan (im Eisen) 24, 26.
 Martensit 32.
 Maschinenbau (Schweißung) 189.
 Maßeinheiten, elektrische 10.
 Mehrfachschweißumformer 93.
 Mehrpunktschweißmaschinen 48.
 Meßeinrichtungen, elektrische 108.
 Messen von Schweißnähten 168.
 Messing 33.
 Messingschweißung 44, 47, 56, 246.
 Metalle, schweißbare 21.
 Metallelektroden 117.
 Metalllichtbogen 66.
 Metallographie (des Eisens) 28.
 Metallographische Prüfungen 256.
 Mischkristalle 29.
 Modulationsverfahren 60.
 Monometall 37, 249.
 Nachbehandlung der Schweißung 154.
 Nackte Elektroden 117.
 Nahtschweißung 19, 56.
 Naßgleichrichter 90.
 Nebenschlußmaschine 15.
 Netzstromschweißung 77.
 Nieterritzer 47.
 Nichtisenmetalle 21, 33.
 Nichtisenmetallschweißung 242.
 Nickellegierungen 37, 249.
 Normalglühen 157.
 Normen (für Werkstoffe) 27.
 — (für Elektroden) 119.
 Nulleiter 87.
 Ohm 11.
 Ohmsches Gesetz 11.
 Oszillogramm 71.
 Pantal 35.
 Periodenumformer 89.

Perlit 31.
 Perlitguß 26.
 Phasenvorschiebung 17.
 Phosphor (im Eisen) 24, 26.
 Phosphorbronze 34.
 Platin 37.
 Plattengleichrichter 91.
 Plattierte Bleche 227.
 Preßschweißung 1, 2.
 Programmsteuerung 61.
 Prüfung der Schweißnähte 263.
 Punktschweißung 18, 47.
 Punktschweißzange 49.
 Punktstoßelektrode 49.
 Quasi-Arc-Elektroden 118.
 Quecksilbergleichrichter 90.
 Querfelddynamo 83.
 Radiumstrahlen 270.
 Raupen (Schweiß-) 132.
 Regelung der Schweißumformer 108.
 — der Stumpfschweißmaschine 38.
 Rekristallisationsvergrütung 285.
 Rißgefahr 152.
 Röhrengleichrichter 91.
 Röntgenprüfung 268.
 Rohisen 21.
 Rohrschweißung 172.
 Rollenahtschweißung 19, 56.
 Rollenschrittschweißung 57.
 Rotguß 34.
 Sauerstoff 7, 10.
 Schallprüfung 265.
 Scheinleistung 17.
 Schienenschweißung 200.
 Schiffbauschweißung 202.
 Schild (Leistungs-) 96.
 Schlagzugversuch 274.
 Schlauchelektrode (Lessel) 245.
 Schmelzpunkte der Metalle 22.
 Schmelzschweißung 1.
 Schmiedeeisen 21.
 Schmiedeprobe 275.
 Schmucklergerät 270.
 Schneiden, elektrisches 260.
 Schnellpunktschweißmaschine 48.
 Schrumpfungen 144.
 Schwarzguß 25.
 Schwefel (im Eisen) 24, 26.
 Schutzhaube 113.
 Schutzschild 113.
 Schweißautomaten 97.
 Schweißbegrenzer 51.
 Schweißelektroden 116.
 Schweißberhandwerk 309.

- Schweißgleichrichter 90.
 Schweißkabel 109.
 Schweißklemme 111.
 Schweißkolben 111.
 Schweißkopf 100.
 Schweißbleihänge 307.
 Schweißpulver 7.
 Schweißraupen 182.
 Schweißspannungen 146, 203.
 Schweißstahl 21, 24.
 Schweißumformer 78.
 Schweißumspanner 84.
 Schweißwagen 95.
 Schweißwerkstatt 115.
 Schweißzubehör 108.
 Scottsche Schaltung 88.
 Seelendrähte 119.
 Selbsterregung 15, 80.
 Selbstinduktion 17.
 Selbsttätige Schweißleinrichtungen 97.
 Senkrechtschweißung 142.
 Silber 37.
 Silizium (im Eisen) 24, 25.
 Slavjanoffverfahren 20.
 Sonderstähle 24, 32, 218.
 Spannung, elektrische 11.
 Spannungen 26, 144.
 Spannungsreihglüh 156.
 Spezifische Gewichte 22.
 Stahl 24.
 Stahlbau 208, 211.
 Stahlguß 24, 216.
 Statische Kennlinie 68, 75.
 Sternschaltung 87.
 Stickstoffaufnahme beim Schweißen 290.
 Strahlungsschutz 112.
 Streupakete 86.
 Stromarten 13.
 Stromstoßautomat 77.
 Stumpfschweißung 18, 38, 134.
 Technik der Gußschweißung 229.
 — der Lichtbogenschweißung 124.
 — der Nahtschweißung 59.
 — der Punktschweißung 50.
 — der Stumpfschweißung 41.
 Temperguß 25, 242.
 Thermit 4.
 Thermitschweißung 3, 9.
 Thun (Filmaufnahme) 71.
 Tiegelstahl 24.
 Tombak 34.
 Transformator 16, 84.
 Trockengleichrichter 90.
 Überkopfschweißung 130.
 Überlappte Schweißung 136.
 Übersetzungsverhältnis (beim Umspanner) 16.
 Ultraviolette Strahlen 112.
 Umformer 78.
 Umhüllte Elektroden 118.
 Ummantelte Elektroden 118.
 Umspanner 16, 84.
 Unfallverhütung 114.
 Universalmaschinen 40.
 Unterricht 307.
 Untersuchung der Schweißnähte 268.
 Unterwasserschweißen und -schneiden 261.
 Verblitzen 112.
 Verbrannter Guß 26.
 Verbundmaschine 15.
 Vergütung der Schweiß 154.
 Volt 11.
 Vorrichtungen 170.
 Vorträge 307.
 Vorwärmung 230.
 Wärmeleitvermögen 22.
 Warmschweißung 235.
 Wassergas 3.
 Wassergasschweißung 2, 9.
 Wasserstoffschweißung 8.
 Watt 11.
 Wechselstrom 13, 14.
 Wechselstromumspanner 84.
 Weibelfverfahren 63.
 Wendepole 81.
 Werkstatt 115.
 Werkstoffe 21.
 Werkstoffübergang (im Lichtbogen) 70.
 Werkzeugmaschinen 195.
 Wichte 22.
 Widerstand 12.
 Widerstandsschweißverfahren 18, 37.
 Wirkleistung 17.
 Wirkungsgrad 17.
 Wissenschaftliche Arbeiten 307.
 Zacksche Schaltung 89.
 Zangen 110.
 Zeitdehner-Filmaufnahme 71.
 Zementit 31.
 Zerenerverfahren 20.
 Zink 36.
 Zubehör (Lichtbogenschweißung) 108.
 Zündgipfel 68.
 Zündung 125.
 Zugversuch 271.
 Zusammenfügungsarbeiten 1.