

Schweißtechnik im Stahlbau

Bearbeitet von

G. Bierett · E. Diepschlag · K. Klöppel
A. Matting · C. Stieler

Herausgegeben von

Dr.-Ing. K. Klöppel
o. Professor a. d. Techn. Hochschule
Darmstadt

Dr.-Ing. C. Stieler
Reichsbahnrat, Wittenberge

Erster Band
Allgemeines

Mit 216 Textabbildungen



Berlin
Verlag von Julius Springer
1939

ISBN-13: 978-3-642-98814-1 e-ISBN-13: 978-3-642-99629-0
DOI: 10.1007/978-3-642-99629-0

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

Copyright 1939 by Julius Springer in Berlin.

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1939

Zum Geleit!

Es lag nahe, die technischen und wirtschaftlichen Vorzüge, welche die Schweißtechnik im Maschinen-, Wagen- und Schiffsbau gebracht hatten, auch dem Stahlbau nutzbar zu machen.

Nun liegen aber die Verhältnisse für das Schweißen im Stahlbau weit schwieriger als auf den anderen Gebieten, weil im Stahlbau, namentlich im Stahlbrückenbau, das Versagen einer einzigen Naht schon zu einer Katastrophe führen kann, während auf den anderen Gebieten diese Gefahr im allgemeinen nicht besteht.

Es bedurfte deshalb im Stahlbau einer ganz umfangreichen Versuchs- und Forschungsarbeit und theoretischer Studien, um die Grundlagen für die nötige Sicherheit der neuen Bauweise zu schaffen. Einige Rückschläge geschweißter Stahlbauten aus hochwertigem Stahl machten in neuerer Zeit weiter eingehende Studien auf dem Gebiete der Baustoffe geschweißter Brücken notwendig.

Man kann sagen, daß keine neue Bauweise im Stahlbau so umstritten war, so zögernd begonnen wurde, so eingehend erforscht und wissenschaftlich unterbaut wurde, so gefördert wurde, dann wieder angezweifelt und schließlich wieder vorwärts getrieben wurde wie die Schweißtechnik.

Es ist einleuchtend, daß diese Umstände ein außerordentlich umfangreiches Schrifttum in den Fachzeitschriften und mündliche Erörterungen in Sitzungen und Vorträgen verursacht haben.

Für den Fachmann und für den Nachwuchs ist es daher sehr zu begrüßen, daß von anerkannten Wissenschaftlern die Ergebnisse der jahrelangen, umfangreichen Arbeiten über die Anwendung der Schweißtechnik im Stahlbau in einem Buche niedergelegt wurden.

Ich wünsche dem Buche weite Verbreitung zum Nutzen des Stahlbaues.

Berlin, den 4. Oktober 1939.

SCHAPER.

Vorwort.

Nachdem die Schweißtechnik im Stahlbau in überraschend schneller Zeit sich so erfolgreich eingeführt hatte, daß zahlreiche Stahlbauten aller Art — vom vorwiegend ruhend belasteten Hochbau bis zur dauerbeanspruchten Eisenbahnbrücke — auf Grund eingehender Berechnungs- und Bearbeitungsvorschriften hergestellt werden konnten, war es an der Zeit, möglichst alle Grundlagen für die Anwendung der Schweißtechnik im Stahlbau in Buchform zusammenzufassen.

Im Stahlbau ist das Interesse an der Schweißtechnik noch weit größer, als es auf Grund der gewiß nicht kleinen wirtschaftlichen und konstruktiven Vorteile dieser fortschrittlichen Technik gerechtfertigt erscheint. Man erkennt dies schon an dem unverhältnismäßig großen Anteil einschlägiger Aufsätze in den letzten Jahrgängen unserer Fachzeitschriften. Offenbar ist die außerordentliche starke Anteilnahme an dieser Entwicklung einmal in der Freude am Fortschritt an sich begründet, zum anderen wird sie aber vielleicht auch aus der Erwartung verständlich, daß die Weiterverfolgung der letzten schweißtechnischen Probleme die Klärung noch mancher interessanten Frage erfordert, die vielleicht sogar an den bisher in der Niettechnik als ausreichend erwiesenen Grundlagen des Stahlbaues rüttelt. Dafür bestand aber zu aller Zeit unter den Fachgenossen großes Interesse, nicht zuletzt auch deshalb, weil man weiß, daß solche neuen Erkenntnisse rückwirkend den gesamten Stahlbau vorwärts bringen müssen. Keinesfalls ist es so, wie man anfangs bei Einführung der Schweißtechnik im Stahlbau vielfach annahm, daß die Umstellung von der Niettechnik zur Schweißtechnik lediglich den Ersatz des Nietes durch die Schweißnaht erfordert. Vielmehr wird die letzte Beherrschung der Schweißtechnik und damit ihre weitestgehende Anwendung im Stahlbau zur Voraussetzung haben, daß die Kenntnisse des Stahlbauingenieurs auf *werkstofflichem* Gebiet, in der *Werkstoffmechanik* und in der *Herstellungstechnik* wesentlich erweitert werden.

Einer solchen umfassenden Umstellung sollte das vorliegende Buch nach Möglichkeit gerecht werden. Sein Inhalt konnte sich deshalb nicht nur auf die Behandlung der Berechnung und Herstellung von geschweißten Stahlbauten beschränken. Gerade in den letzten Jahren haben unvermeidliche, entwicklungs-technisch aber außerordentlich wertvolle Rückschläge gelehrt, daß nur ein *umfassender* Einblick in alle wichtigen Fragen der Schweißtechnik vor unliebsamen Überraschungen schützen kann. Der Stahlbauingenieur wird sich also in Zukunft in stärkerem Maße als bisher auch mit den Grundlagen der Eisenhüttenkunde, der Technologie und der übrigen Herstellungstechnik beschäftigen müssen. Demgemäß umfaßt der erste Band des Buches eine geschlossene Darstellung der wichtigsten Kenntnisse aus den vorgenannten Gebieten. Die Verfasser haben

sich bemüht, diese Grundlagen so mitzuteilen, daß sie der Bauingenieur auf Grund seiner Vorbildung nicht nur verstehen, sondern auch verarbeiten kann. Die Benutzung des Buches wird dem Bauingenieur sehr viel Zeit ersparen, die er sonst durch Nachschlagen in den verschiedenen Büchern und Fachzeitschriften des Eisenhüttenfaches, der Technologie und des Maschinenbaus verlieren würde. Darüber hinaus dürfte die Geschlossenheit der Darstellung dieser Grenzgebiete des Stahlbaus aber auch den Anreiz zur Beschäftigung mit fruchtbaren Einzelfragen erhöhen, deren Wichtigkeit durch ihre Einordnung in die gesamten Grundlagen der Schweißtechnik klar zu erkennen ist.

Der zweite Band des Buches wird sich mit den Grundlagen für das Berechnen und das Entwerfen geschweißter Stahlbauten beschäftigen. Diese Trennung, die ursprünglich nicht beabsichtigt war, ergab sich zwangsläufig, weil das letzte Jahr noch wesentliche Umänderungen der Vorschriften brachte, die durch die oben schon angedeuteten Rückschläge sowie durch neue Forschungsergebnisse notwendig wurden. Eine entsprechend lange Zurückstellung der Herausgabe des ersten Bandes war aber bei dem steten und raschen Fortschritt der Schweißtechnik nicht tragbar.

Wir hoffen, daß dieser Aufbau der Bücher, der auch einer steten Weiterentwicklung gerecht werden kann, von den Fachgenossen begrüßt wird, so daß die Bücher Anklang finden und ihre Aufgabe erfüllen, wie sie von Herrn Geheimrat Prof. Dr.-Ing. Dr. rer. techn. SCHAPER in seinem dankenswerten Geleitwort umrissen worden ist. Für Anregungen und Verbesserungsvorschläge sind wir jederzeit sehr dankbar.

Dem Verlag *Julius Springer* haben wir sowohl für die Anregung zur Herausgabe dieses Buches als auch für seine Bemühungen um eine gediegene drucktechnische Ausgestaltung des ersten Bandes zu danken. Von seiner Seite wurde keine Mühe und Arbeit gescheut, um das Buch in der bestgeeigneten Form herauszubringen.

Darmstadt und Wittenberge, im Oktober 1939.

K. KLÖPPEL.

C. STIELER.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Die Erzeugung von Eisen und Stahl. Von Professor E. Diepschlag, Breslau.	
I. Übersicht	1
II. Aufgabe des Stahlwerkers	3
III. Der Stahlprozeß	4
IV. Elektrostahl	5
V. Walzwerkserzeugnisse	6
VI. Walzverfahren	7
1. Profilmasse	8
2. Walzbarkeit	9
3. Walztemperatur	10
4. Schmiedbarkeit	10
5. Kaltverformung	10
VII. Stahlguß	11
VIII. Gußeisen	11
IX. Stahlvorgeschichte	13
1. Stahlanalyse	13
2. Sauerstoff im Stahl	13
3. Verteilungssatz	14
4. Gleichgewichte	14
5. Einschlüsse im Stahl	15
6. Stickstoff	15
7. Wasserstoff	15
X. Abkühlungserscheinungen	16
1. Gießverfahren	16
2. Blockseigerung	16
3. Lunker	17
4. Blockfehler	17
5. Abkühlungsvorgänge	17
6. Korngröße	19
7. Alterung	20
8. Warmbehandlung	20
 Die Metallurgie des Schweißens. Von Professor Dr.-Ing. habil. A. Matting, Hannover, und Dr.-Ing. C. Stieler, Wittenberge.	
A. Die im Stahlbau vorwiegend verwandten Baustoffe	22
B. Kurze Einführung in die Metallographie	23
C. Chemische Umsetzungen und Wärmeeinwirkung beim Schweißvorgang	25
D. Die Reißgefahr in Abhängigkeit von der Baustoffzusammensetzung	27
 Grundlagen des Schweißens. Von Dr.-Ing. C. Stieler, Wittenberge.	
I. Übersicht über die Schweißverfahren	33
A. Begriff des Schweißens	33
B. Arten des Schweißens	33
C. Grundsätzliches über die einzelnen Schweißverfahren	33
1. Preßschweißung	33
2. Schmelzschweißung	36
II. Die elektrische Widerstandsschweißung	38
A. Stumpfschweißung	38
1. Anwendungsgebiete	38
2. Stumpfschweißmaschinen	39
3. Stumpfschweißverfahren	41

	Seite
B. Punkt- und Nahtschweißung	43
1. Anwendungsgebiete	43
2. Punkt- und Nahtschweißmaschinen	44
III. Thermitschweißung	49
1. Grundlagen	49
2. Preßschweißung	49
3. Schmelzschweißung	50
4. Vereinigte Preß- und Schmelzschweißung	51
5. Hilfsgeräte	53
IV. Elektroschmelzschweißung	54
A. Der Lichtbogen	54
B. Der Schweißstrom	57
C. Die Schweißstromerzeuger	58
1. Allgemeine Anforderungen	58
2. Bauarten	66
D. Selbsttätige Schweißeinrichtungen	75
E. Zubehör	79
F. Unfallverhütung bei der Elektroschmelzschweißung	82
V. Zusatzstoffe für die Elektroschmelzschweißung	86
A. Eigenschaften des Schweißgutes	86
B. Chemische Zusammensetzung des Schweißgutes	87
C. Die Schweiß Eigenschaften	89
1. Abschmelzen der Schweißdrähte	90
2. Eigenschaften der Schlacke	90
3. Verhalten des niedergeschmolzenen Schweißgutes	91
D. Eigenschaften der Schweißverbindungen	92
1. Gefüge	92
2. Mechanisch-technologische Gütwerte	97
3. Widerstand gegen Rosten	98
E. Schweißdrahtlieferbedingungen	98
F. Gesichtspunkte für die Auswahl der Schweißdrähte	100
1. Vorschriften	100
2. Wirtschaftliche und praktische Gesichtspunkte	102
3. Güte der Schweißverbindungen	103
VI. Gasschmelzschweißen und Brennschneiden	104
A. Azetylen	104
1. Azetylerzeuger	105
2. Azetylenflaschen	108
B. Sauerstoff	110
C. Zubehör	110
1. Wäscher und Reiniger	110
2. Azetylen- und Sauerstoffleitungen	110
3. Wasservorlagen	110
4. Absperrventile und Druckminderer	112
5. Schweiß- und Schneidbrenner	113
D. Ausführung von Schweiß- und Schneidarbeiten	115
E. Unfallverhütung beim Gasschweißen und Brennschneiden	117
VII. Vorbereitung, Ausführung und Kosten von Schweißnähten	119
A. Nahtformen und ihre Vorbereitung	119
B. Ausführung	122
C. Kosten von Schweißnähten	123

Schrumpfung und Spannung. Von Professor Dr.-Ing. G. Bierett, Berlin.

I. Allgemeines. Maßgebende Wärmeeigenschaften, mechanische und metallurgische Eigenschaften	128
1. Wärmeeigenschaften	128
2. Mechanische Eigenschaften	128
3. Metallurgische Vorgänge	129
II. Schrumpfung	130
A. Querschrumpfung von Stumpfnähten	130
1. Parallelschrumpfung, Winkelschrumpfung, Gesamtschrumpfung	130
2. Berechnung der Querschrumpfung	131
3. Einige wichtige Versuchsergebnisse	134

	Seite
B. Querschrumpfung von Kehlnähten	137
C. Längsschrumpfung	139
III. Schweißspannungen	140
A. Zusammenhänge und Erkenntnisse	140
1. Allgemeines	140
2. Schrumpfspannungen beim „verspannungsfreien Schweißen“	141
3. Längsschrumpfspannungen	142
4. Querspannungen	144
5. Die Rißgefahr	150
6. Besondere Maßnahmen zur Vermeidung der Rißgefahr und zur Spannungsverbesserung	154
B. Bestimmung der Schweißspannungen	156
1. Zweck der Schweißspannungsbestimmung	156
2. Meßverfahren	156
3. Berechnung der Schweißspannungen	160
4. Einige wichtige Versuchsergebnisse und Spannungsschema	161
C. Schweißspannungen und Festigkeit	164
1. Allgemeines	164
2. Schweißspannungen und statische Festigkeit	164
3. Schweißspannungen und Dauerfestigkeit	165
4. Schweißspannungen und Knickfestigkeit	167

Die Prüfung von Schweißverbindungen.

Von Professor Dr.-Ing. habil. **A. Matting, Hannover.**

I. Mittelbare Prüfmaschinen mit Zerstörung der Schweißnaht	170
A. Der Zugversuch	170
B. Die Verformungsprüfung	171
C. Der Kerbschlagversuch	173
D. Die Dauerprüfung	174
E. Technologische Prüfungen	176
F. Sonstige zerstörende Prüfverfahren	176
II. Unmittelbare Prüfverfahren ohne Zerstörung der Schweißnaht	177
A. Die Röntgenprüfung	177
1. Das Wesen der Röntgenstrahlen	177
2. Die Erzeugung der Röntgenstrahlen. — Die Röntgenröhre	178
3. Die Anordnung der Röntgenröhre, Werkstück und Film	180
4. Die Deutung der Röntgenaufnahmen	182
B. Die übrigen zerstörungsfreien Prüfverfahren	184
1. Die Gammastrahlen	184
2. Die magnetischen Prüfverfahren	184
3. Die übrigen Verfahren	186
Zusammenstellung von Richtlinien und Vorschriften für die zerstörungsfreie Prüfung	186
Sachverzeichnis	187

Vorläufiges Inhaltsverzeichnis des zweiten Bandes.

Bearbeitet von Dr.-Ing. **K. Klöppel**, o. Professor
an der Technischen Hochschule Darmstadt.

1. Grundlagen der Berechnung von Schweißverbindungen.
 - a) Theorie der Berechnung.
 - b) Statische und Dauerfestigkeitsversuche.
2. Berechnungsvorschriften und einschlägige Normen.
3. Konstruktion und Herstellung geschweißter Stahlbauten.
4. Ausgeführte Bauwerke.

Die Erzeugung von Eisen und Stahl.

Von Professor E. DIEPSCHLAG, Breslau.

I. Übersicht.

Die Erzeugung von Eisen und Stahl geschieht in der heutigen Großeisenindustrie ausschließlich nach einem indirekten Verfahren, d. h. aus den von der Natur gegebenen Rohstoffen, insbesondere den Eisenerzen wird zuerst ein Vorzeugnis hergestellt, das infolge seiner geringwertigen Eigenschaften wenig verwendbar ist, und daher auch den Namen Roheisen führt. Anschließend wird aus diesem in den Stahlwerken ein gebrauchsfertiger Stahl hergestellt. Dieser Umweg muß beschritten werden, weil es technisch unmöglich ist, in einem Schachtofen, wie er beim Hochofen vorliegt, eine Eisenlegierung zu erzeugen, die allen notwendigen und von Fall zu Fall verschiedenen technischen Anforderungen entspricht, und die die Zusammensetzung des Stahles hat. Der Hochofen hat lediglich die Aufgabe, die in den Eisenerzen enthaltenen Eisen-Sauerstoff-Verbindungen zu spalten und anschließend dieses so freigewordene Eisen von den übrigen verschiedenen Mineralien, die in den Erzen enthalten sind, zu trennen. Die Reduktion vollzieht sich im Hochofen unter Anwendung von Kohlenoxydgas bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen. Die Rohstoffe des Hochofens — Erze, Zuschläge und Koks — werden ununterbrochen eingefüllt und wandern langsam vermöge ihrer Schwere nach unten, indem sie von den aufsteigenden heißen Gasen erwärmt und geschmolzen werden. Dadurch trennt sich das Metall von allen übrigen nunmehr flüssigen Bestandteilen. Indem man aber auf hohe Temperaturen geht, werden unvermeidlich mehrere andere Reaktionen ausgelöst mit dem Ergebnis, daß sich eine Reihe von Elementen, die in der Beschickung enthalten sind, in dem so gewonnenen Eisen auflösen und eine Eisenlegierung liefern mit einer erheblichen Menge von Legierungselementen. In erster Linie sind es die Stoffe Si, C, P und S, die von dem Eisen aufgenommen werden.

Es ist anschließend die Aufgabe der Stahlwerksprozesse, dieses Zuviel an Legierungselementen durch Verbrennung derselben zu entfernen. Zu diesem Zweck sind zwei Stahlgewinnungsverfahren im Laufe der geschichtlichen Entwicklung ausgestaltet und heute in Benutzung, die nebeneinander den größten Anteil unserer gesamten Stahlerzeugung hervorbringen, nämlich der Thomas-Stahlwerks- und der Siemens-Martin-Prozeß. Im Thomas-Stahlwerk wird das vom Hochofen kommende Roheisen, nachdem es einen Mischer durchlaufen hat, in großen Birnengefäßen verblasen, wodurch in etwa 12 Minuten das Roheisen in Stahl umgewandelt wird. Es ist dieses das einfachste und leistungsfähigste Herstellungsverfahren von Stahl, setzt aber voraus, daß das Roheisen flüssig angeliefert wird und daß der Phosphorgehalt desselben mindestens 1,8% beträgt. Der Phosphor des Roheisens stammt aus Mineralien der im Hochofen verhütteten Erze, und da nicht alle Erze entsprechend hohe Phosphorgehalte besitzen, werden notgedrungen auch Roheisensorten hergestellt mit niedrigerem Phosphorgehalt, also solche, die für den Thomas-Betrieb ungeeignet sind, sie müssen im Siemens-Martin-

Ein kleiner Teil des im Hochofen erzeugten Roheisens wird in den Gießbetrieben unmittelbar in fertige Maschinenteile oder Bauelemente umgewandelt. Auch in diesen Betrieben findet Alteisen Verwendung.

Für die Erzeugung besonders hochwertiger Stähle stehen neben dem Siemens-Martin-Ofen noch das Elektrostahlwerk und Tiegelstahlwerk zur Verfügung.

Der gesamte Fabrikationsverlauf ist in einer Übersicht dargestellt worden (Abb. 1). Ausgehend von den Rohstoffen zeigen Pfeillinien den stofflichen Verlauf und mit Linien eingefaßte Namen die wichtigsten Betriebs- und Umwandlungsstätten. Die in den einzelnen Betriebsabschnitten verwendeten Stoffe und die daraus hervorgehenden Erzeugnisse sind in der Übersicht gekennzeichnet.

II. Aufgabe des Stahlwerkers.

Die Eigenschaften des in den Stahlwerken erzeugten Stahls sind von der chemischen Zusammensetzung desselben und unter Umständen auch von der Wärmebehandlung, die der Stahl bei der Fertigung erfahren hat, abhängig. Die Güteeigenschaften werden von dem Verbraucher oder Besteller vorgeschrieben und sollen nach Möglichkeit den für die verschiedenen Verwendungszwecke vorliegenden Bedürfnissen und Wünschen angepaßt werden, wobei darauf hinzuwirken ist, daß überspitzte Forderungen und Bedingungen, die für den Verwendungszweck ohne Belang sind, nicht in die Liefervorschriften aufgenommen werden. Der Stahlwerker ist auf Grund seiner Kenntnisse und Erfahrungen derjenige, der durch geeignetes Legieren und Schmelzen die jeweilig richtige Legierung erzeugt. Da die Verwendungsmöglichkeiten des Stahles außerordentlich vielfältig sind, können eine große Zahl von Erzeugnissen in Gruppen zusammengefaßt werden, so daß für jede derselben eine ein für allemal vereinbarte und festgelegte Legierung erzeugt wird.

Normung. Diese Maßnahmen sind in größtem Umfange durch die Einführung der Normung entwickelt worden, die auf dem Gebiete der Stahlerzeugung und Verwendung eine der wichtigsten Anwendungsgebiete besitzt. Träger dieser Vereinheitlichungsarbeiten ist der Deutsche Normenausschuß, dessen Arbeiten sich auf eine außerordentlich große Zahl von Gebieten erstrecken und in der Fortentwicklung der Technik nie zu einem Abschluß kommen. Befaßt mit der deutschen Normung sind die im deutschen Normenausschuß und dessen Fachnormenausschüssen zusammengeschlossenen Erzeuger und Verbraucherorganisationen, Behörden und Vertreter der Wissenschaft. Zugeordnet ist die Normenprüfstelle, die sich aus ehrenamtlich tätigen Fachleuten aus Praxis und Wissenschaft zusammensetzt. Sie hat die Aufgabe, die deutschen Normen in ihrer äußeren Erscheinung in einheitlicher Gestalt herauszubringen und Widersprüche der Normen untereinander zu vermeiden. Über eine erfolgreich durchgeführte Normung wird ein Normenblatt herausgegeben, versehen mit dem gesetzlich geschützten Zeichen „DIN“.

Markenbezeichnung. Im Rahmen dieser großen Organisation unterliegen auch die Eisen- und Stahlerzeugnisse der Normung, die sich sowohl auf die Güte eines Stahlerzeugnisses, die Anwendung von Prüfverfahren zur Bestimmung seiner wichtigsten Eigenschaften, teilweise auch auf die Zusammensetzung oder das Herstellungsverfahren bezieht. Abgesehen von besonderen legierten und sonstigen hochwertigen Stählen besitzen die häufig vorkommenden und verwendeten Stähle eine bestimmte Markenbezeichnung. Diese besteht gewöhnlich aus drei Teilen: die Bezeichnung des Werkstoffes, der Hinweis auf den Gütewert und die Angabe der DIN-Blattnummer, in der die genauen Ausführungen über Abnahme, Lieferung und Prüfung enthalten sind. Die Normenblätter für Stahl und Eisen haben die Nummern DIN 1600 bis 1699. Der Werkstoff wird durch Buchstaben gekennzeichnet. Es bedeutet:

St	Stg	Ge	Te
Stahl	Stahlguß	Gußeisen	Temperguß.

Wird in besonderen Fällen das Herstellungsverfahren vorgeschrieben, so werden die Stähle außer der Markenbezeichnung noch mit folgenden Buchstaben versehen:

B	Th	M	T	E
Bessemer-	Thomas-	Martin-	Tiegel-	Elektrostahl.

Der Hinweis auf den Gütewert bringt bei den Baustählen die Angabe einer Mindestzugfestigkeit zum Ausdruck

Baustähle. Normale Baustähle sind einfache Kohlenstoffstähle, die ohne Zusatz besonderer Legierungselemente hergestellt werden und die sich im wesentlichen nur durch einen verschiedenen hohen Kohlenstoffgehalt unterscheiden. Sie sind in den DIN-Normen 1611, 1612, 1613 als St 00 . 11 bis St 70 . 11; St 00 . 12 bis St 44 . 12, St 34 . 13 bis St 38 . 13 festgelegt und gelten für Walzwerkerzeugnisse. Bei den Baustählen St 00 . 12 bis St 44 . 12 sind in bezug auf den Phosphor- und Schwefelgehalt keine besonderen Vorschriften gegeben. St 37 . 12 ist z. B. ein Flußstahl mit einer Mindestzugfestigkeit von 37 kg/mm², einer Höchstzugfestigkeit von 45 kg/mm², einer Mindestbruchdehnung von 20% am langen Normalstab und näheren Bedingungen nach DIN 1612. — Ge 14.91 ist ein Gußeisen mit einer Mindestzugfestigkeit von 14 kg/mm² und näheren Bedingungen nach DIN 1691.

So werden für Lieferungen von Eisen- und Stahlerzeugnissen bestimmte Forderungen gestellt, gekennzeichnet durch die Markenbezeichnung und den Hinweis für genormte Bedingungen. Für den Stahl- und Walzwerker bilden sie die Grundlage seines täglichen Arbeitsplanes. Bei den einfachen Kohlenstoffstählen steigt erfahrungsgemäß mit der Zunahme des Kohlenstoffgehaltes um 0,1% die Zugfestigkeit um etwa 9 kg/mm². Bei den höher gekohlten Stählen wird diese Beziehung durch die Möglichkeit einer unterschiedlichen Wärmebehandlung des Werkstückes überdeckt. Bei hochwertigen Stählen kommen in den Lieferbedingungen Analysenvorschriften hinzu. In den technischen Lieferbedingungen für Baustahl St 52 und Nietstahl St 44 ist z. B. zwar keine bestimmte chemische Zusammensetzung vorgeschrieben, doch soll der Kohlenstoffgehalt höchstens 0,20% betragen. Der Siliziumgehalt soll 0,50%, der Mangangehalt 1,2% nicht überschreiten. Der Schwefel- und Phosphorgehalt soll im allgemeinen höchstens 0,06%, zusammen höchstens 0,1% sein. Zur Erhöhung seiner Widerstandsfähigkeit gegen Rostangriff soll er einen Gehalt von nicht über 0,55% Kupfer haben. Zusätzlich zugelassen sind entweder 0,3% Mangan oder 0,4% Chrom, oder 0,2% Molybdän.

Die ungefähre chemische Zusammensetzung einiger Baustähle ist aus folgender Aufstellung zu ersehen.

	C	Si	Mn	P	C	Cr	Cu	Mo	Ni
St 34.11	0,12	—	0,45	0,05	0,04				
St 42.11	0,25	—	0,55	0,05	0,04				
Siliziumbaustahl	0,15	0,25	0,80	0,04	0,03	0,40	0,5		
Chrommolybdänstahl	0,31	—	0,52	0,04	0,03	1,35	—	0,22	
Nickelmolybdänstahl	0,14	0,26	0,33	0,04	0,03	2,48	—	0,25	1,44

III. Der Stahlprozeß.

Wie ein Stahl vorgeschriebener Zusammensetzung im basischen Siemens-Martin-Ofen hergestellt wird, geht aus folgendem Beispiel hervor. Der zu erzeugende Stahl möge, damit er die geforderten Eigenschaften besitzt, folgende Analyse haben: Kohlenstoff 0,06%, Mangan 0,52%, Phosphor 0,12% und Schwefel 0,05%. Um diese Werte zu erreichen, wird ein Ofen, der etwa 50 t Fassungsvermögen hat, mit folgenden Rohstoffen beschickt: 12300 kg Roheisen, 5800 kg Stahlblockabfälle aus dem Walzwerk, 32700 kg Blechschrott, dazu kommen dann 1400 kg Kalk. Während des Einschmelzens dieser Beschickung verbrennt ein Teil des Eisens und die entstehenden Oxyde vermischen sich in der Schmelze, zum Teil lösen sie sich auch darin auf. Die so zugeführten Sauerstoffmengen

verbinden sich im Laufe des Schmelzvorganges mit den Legierungselementen des eingesetzten Roheisens Kohlenstoff, Mangan, Phosphor und teilweise dem Schwefel, die auf diese Weise als Schlacken aus dem flüssigen Metall entfernt werden. Wie diese Veränderungen sich vollziehen, geht aus Abb. 2 hervor, die den letzten Abschnitt der Schmelzarbeit betrifft. Das Bild zeigt auf der linken Seite, wie die Zusammensetzung des Einsatzes ist, nachdem der Ofen fertig beschickt und der Einsatz geschmolzen war. Er enthält dann 1,02% Kohlenstoff, 0,38% Mangan, 0,022% Phosphor und 0,052% Schwefel. Im Laufe des weiteren Schmelzens fällt der Kohlenstoffgehalt stark ab, weil er sich mit dem in der Schmelze gelösten Sauerstoff verbindet unter Bildung von Kohlenoxyd, das als Gas entweicht. Das Mangan wird zunächst verbrannt und verschlackt, später wird aber ein Teil des Manganoxys infolge der steigenden Ofentemperatur, die bis auf 1700° kommt, wieder zerlegt, so daß der Mangangehalt des Metalls wieder ansteigt. Phosphor und Schwefel werden während des Schmelzverlaufes auch teilweise oxydiert und in die Schlacke überführt. Man arbeitet stets mit einem gewissen Überschuß an Sauerstoff, den man notfalls erreicht, indem man von Zeit zu Zeit kleine Mengen Eisenerz in den Ofen wirft. Zum Schluß bleibt eine flüssige Eisenschmelze arm an Legierungsstoffen, aber mit einem so hohen Sauerstoffgehalt, daß in dieser Zusammensetzung ein Stahl von sehr geringwertigen Eigenschaften entstände. Dieser Zeitpunkt tritt in der Abbildung bei etwa der 110. Minute deutlich hervor. Die weitere Behandlung des Bades wird durch zwei Maßnahmen gekennzeichnet, nämlich die Desoxydation und die Legierung. Man gibt hier hochhaltige Legierungen in den Ofen, um einmal den Sauerstoff zu binden und unschädlich zu machen und außerdem die vorgeschriebene Endanalyse des Stahles zu erreichen. In vorliegendem Beispiel sind 300 kg Ferromangan und 80 kg Spiegeleisen verwendet worden. Auswahl und Mengen der Zusätze werden auf Grund von Erfahrungen bestimmt und mit Rücksicht auf den anzustrebenden Kohlenstoff- und Mangangehalt des Stahles berechnet. Je nach Stahlsorte und Schmelzverfahren ergeben sich für das Fertigmachen der Stahlschmelze besondere Arbeitsmethoden. So werden namentlich bei höherwertigen Stahlsorten die Zusätze nicht nur in den Stahlofen, sondern erst in die Gießpfanne gegeben.

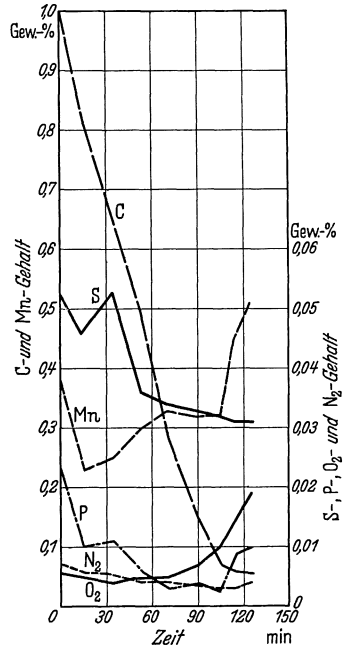


Abb. 2. Ablauf der Stahlreaktion im basischen Siemens-Martin-Ofen (BARDENHEUER).

IV. Elektrostahl.

Während der Siemens-Martin-Ofen meistens mit Generatorgas beheizt wird, hat man auch die Energie des elektrischen Stromes als Wärmequelle auszunutzen verstanden und für die Erschmelzung von Stahl herangezogen. Im Laufe der Zeit entstanden eine große Zahl von Ofenbauarten, die man in zwei Gruppen zusammenfassen kann, die Lichtbogenöfen und die Induktionsöfen (Hoch- und Niederfrequenzöfen).

Die Beschickung des Ofens kann entweder, wie beim Siemens-Martin-Verfahren, mit Roheisen und Schrott unter Kalkzusatz stattfinden, oder aber man entnimmt

dem Siemens-Martin-Ofen flüssiges Metall, um es im Elektroofen noch weiter zu verfeinern und mit wertvollen Legierungsstoffen zu versetzen. Da wegen der Stromkosten die Schmelzung im Elektroofen teurer ist als im Siemens-Martin-Ofen, wird der Ofen überwiegend für die letztere Betriebsweise angewendet. Die Überlegenheit des Elektroofens besteht darin, daß eine weitergehende Entschwefelung und Desoxydation möglich ist, und daß man Legierungszusätze ohne großen Abbrand geben kann.

Das Vergießen des Stahles in Blockformen und die dabei auftretenden Erscheinungen sowie die Erstarrung und Abkühlung des vergossenen Stahles werden noch eingehend erörtert, da diese Vorgänge mit dem stofflichen Aufbau der fertigen Stahllegierung in unmittelbarer Beziehung stehen.

V. Walzwerkserzeugnisse.

Der im Stahlwerk erzeugte Stahlblock wird dem Walzwerk übergeben, wo er auf den Walzenstraßen zu Fertigerzeugnissen verwalzt wird. Zwischen beiden Betrieben sind solche chemischen und technologischen Prüfungsverfahren eingeschaltet, die gestatten, in kürzester Zeit einen Anhalt für die Güte des erschmolzenen Stahles und seine Geeignetheit für bestimmte Fertigerzeugnisse zu schaffen. Die Walzwerkserzeugnisse sind sehr mannigfaltig und je nach Größe und Lage des Betriebes ist das Walzprogramm mehr oder weniger umfangreich. Die zuständige Verkaufsvereinigung ist der Stahlwerksverband in Düsseldorf, der eine einheitliche Unterteilung aller Erzeugnisse vorgenommen hat und zwar in folgender Weise: Sämtliche Walzwerkserzeugnisse werden in zwei Hauptgruppen eingeteilt: Erzeugnisse A und Erzeugnisse B.

Die Erzeugnisse A umfassen wiederum die Gruppen:

a) Halbzeug. b) Eisenbahn-Oberbau. c) Formstahl.

a) Unter Halbzeug versteht man:

1. Rohblöcke und Rohbrammen. Das sind Blöcke, wie sie das Stahlwerk liefert, ohne daß eine Walzung stattgefunden hat. Blöcke haben einen quadratischen Querschnitt, Brammen einen rechteckigen, letztere sind vornehmlich die Ausgangsblöcke für Blechwalzwerke.

2. Vorgewalzte Blöcke. Es sind solche, die ein Walzwerk durchlaufen haben. Ihr Querschnitt ist quadratisch, kann aber in einer Abmessung bis zu einem Drittel davon abweichen. Dicke in keiner Richtung unter 115 mm.

3. Vorgewalzte Brammen. Rechteckiger Querschnitt, Mindestbreite 115 mm, Mindestdicke 75 mm.

4. Knüppel. Walzstäbe von quadratischem Querschnitt von 30 mm bis unter 115 mm Dicke. Stablängen im allgemeinen 900—6000 mm.

5. Flachknüppel. Walzstäbe von rechteckigem Querschnitt von einer Breite von 50 mm bis unter 115 mm und bei einer Dicke von 30 mm und mehr, mit abgerundeten Kanten.


6. Platinen. Flachstabprofile, im allgemeinen in den Abmessungen $150 \cdot 6$, $200 \cdot 7\frac{1}{2}$, $250 \cdot 8$ und $300 \cdot 12$ mm. Höchstdicke unter 75 mm, Stablänge im allgemeinen 2000—6000 mm.

7. Breitstahl. Walzstäbe mit 45 bis unter 115 mm Breite und 15 bis unter 30 mm Dicke, sowie von 115 bis unter 150 mm Breite und 30—75 mm Dicke. Stablängen im allgemeinen 2000—6000 mm.

8. Puddelluppen. Zerteilte Eisenballen, die unter einem Dampfhammer zusammenschweißt und dann zu Rohschienen ausgestreckt werden.








Halbzeug ist ein Vorerzeugnis und dient als Ausgangsstoff zur Herstellung von Walzwerksfertigware.

b) Die Erzeugnisse für den Eisenbahn-Oberbau sind Schienen jeglicher Art, Schwellen, Laschen, Unterlagsplatten, Radlenker, Leitschienen usw.

c) Unter Formstahl versteht man alle I und C-Stähle von ≥ 80 mm Höhe, sowie  (Belagstahl). Nicht einbegriffen sind breit- und parallelfianschige IP- und die übrigen Breitflanschträger.


Unter die Erzeugnisse B fallen die Gruppen:

- a) Stabstahl. b) Bleche. c) Stahlguß- und Schmiedestücke.
- d) Walzdraht. e) Röhren.

a) Die Gruppe Stabstahl umfaßt Flachstahl von 8—150 mm Breite und 3 bis 100 mm Dicke, außer Bandstahl; Röhrenstreifen und Weichenplatten; ,  und -Stahl; sonstiger Stab- und Stabformstahl; gleich- und ungleichschenkliger L-Stahl; hochstegiger und breitflüssiger I-Stahl; I- und C-Stahl mit einer Höhe kleiner als 80 mm; -Stahl; , , -Stahl; Gitterstahl u. dgl.

b) Unter Blechen sind zu verstehen: Fein-, Mittel- und Grobbleche jeder Art, Riffel- und Warzenbleche, sowie Bleche mit sonstigen Walzmustern. Grobbleche sind solche von mehr als 4,75 mm Dicke, Mittelbleche haben 3—4,75 mm Dicke und Feinbleche unter 3 mm.

Auch die Profilmasse der gebräuchlichen Baustähle sind festgelegt, sie sind in den Profilanangaben über Formstahl, Stabstahl und Breitflachstahl enthalten. Sie betreffen:

1. Formstahlwalzprofile I und C ≥ 80 mm Höhe, sowie  nach DIN 1025, 1026, 1031.
2. Sonderwalzprofile für Schweißung nach DIN 1025 und andere Profile.
3. Stabstahl-Walzprofile nach DIN 1024, 1026, 1027, 1028, 1029 u. a., sowie DIN Vornummern 1014, 1013, 1015 u. a. Profile.
4. Bleche, unter Bezugnahme auf DIN 1055 und andere Angaben.

VI. Walzverfahren.

Die Walzwerkserzeugnisse entstehen im Walzwerk, indem die Rohblöcke des Stahlwerkes in warmem Zustande in einer Anzahl von Durchgängen in profilierten Walzen allmählich auf kleinere Querschnitte und schließlich auf die Endquerschnitte des Erzeugnisses gebracht werden. In jedem Walzenpaar liegen mehrere Kaliber nebeneinander und der Walzstab wird im Hin- und Hergang auf immer kleinere Profile gebracht, wodurch er immer dünner und länger wird. Die schweren Blockstraßen müssen nach jedem Durchgang des Walzblockes ihre Drehrichtung umkehren, damit das Walzgut durch das durch eine Anstellvorrichtung verkleinerte Kaliber zurückgegeben werden kann. Bei leichteren Blockgewichten wählt man die Triowalzwerke, bei denen in jedem Walzgerüst 3 Walzen liegen. Der Walzstab geht einmal durch ein Kaliber zwischen Unter- und Mittelwalze und kommt dann zurück zwischen Mittelwalze und Oberwalze. Die Walzen laufen ständig in einer Drehrichtung weiter.

In Abb. 3 ist eine Trioblockstraße schematisch dargestellt, Unter- und Oberwalze sind nur halb gezeichnet. Der Block geht zuerst durch die Kaliberöffnung auf der linken Seite unten und nimmt dabei einen Querschnitt von 270 · 316 mm an. Er kommt zurück zwischen Mittel- und Oberwalze mit einem Querschnitt von 230 · 316 mm, er geht dann durch das zweite Profil unten mit einem Querschnitt von 275 · 241 mm, kommt oben zurück usw., er kann in diesem Walzgerüst ausgewalzt werden bis zu einem Querschnitt von 132,5 · 130 mm.

Von dieser Knüppelstraße geht aber der Walzstab zu den Fertiggerüsten und je nach dem herzustellenden Fertigprofil ist die Querschnittsverminderung auf

der Block- bzw. Knüppelstraße vorzunehmen, der Block geht also nicht immer durch sämtliche Kaliber eines Walzgerüsts. Bei Stabstahlstraßen läuft häufig der Walzstab nur durch ein Kaliber des Walzgerüsts und sofort in ein nächstes eines zweiten und anschließend dritten Walzgerüsts usw. Die Walzgerüste stehen dicht hintereinander und bilden ein kontinuierliches Walzwerk.

Aus Abb. 4 ist zu ersehen, wie ein Knüppel beim Durchgang durch 8 Walzkaliber zu Stab- bzw. Flachstahl umgewandelt wird. Zum Beispiel wird ein Knüppel von $101 \cdot 101$ mm Querschnitt in den links gelegenen Kalibern des ersten und zweiten Gerüsts flach gedrückt, geht im dritten Gerüst in ein Oval über, im vierten in ein Quadrat, wird im fünften Gerüst gestaucht, erreicht im sechsten wieder Quadratform und erhält nach nochmaliger Stauchung im siebenten im letzten den endgültigen Querschnitt von 25 mm Quadrat.

Jedes Fertigprofil eines Walzwerkserzeugnisses erfordert seine eigene Kalibrierung und eine bestimmte Zahl von Durchgängen durch die Walzenpaare.

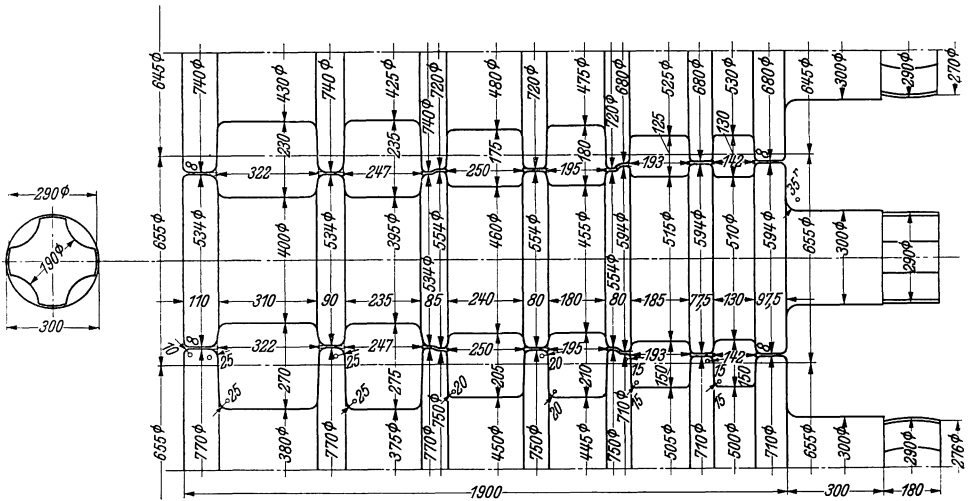


Abb. 3. Schema eines Triowalzwerks. (EMICKE.)

Bei den gängigen Walzprofilen liegen die Kalibrierungen fest, sie sind im Laufe der Zeit auf Grund von Erfahrungen entwickelt worden. Bei neu auftretenden Profilen und auch beim Verwalzen von Sonderstählen müssen sie durch Berechnung und Versuch ermittelt werden.

1. Profilm Maße.

Der Walzwerker hat die Aufgabe, die in den Profilmäßigungsverzeichnissen angegebenen Abmessungen möglichst genau einzuhalten. Kleine Abweichungen sind allerdings gestattet, man bezeichnet sie mit Abmaßen und versteht darunter jede Abweichung der Abmessungen vom Nennmaß. Eine genaue Einhaltung aller Nennmaße ist bei keinem Walzprofil praktisch möglich, weil eine ganze Anzahl von einzelnen Einflüssen, die durchweg unabhängig voneinander sind, auf die endgültigen Maße des erkalteten Werkstückes einwirken, wie Zusammensetzung des Stahles, seine Gefügeentwicklung, die während des gesamten Walzvorganges herrschenden Temperaturen und andere. Die Größe der zulässigen Abmaße muß vom Standpunkt der Aufgaben bei der Weiterverarbeitung des Werkstückes beurteilt werden, in dem Sinne, daß sie sich in Grenzen bewegen, die die für den jeweiligen Verwendungszweck benötigte Genauigkeit des Zusammenpassens mit anderen Bauteilen ermöglichen.

Für die geläufigen Walzwerksprofile sind bei niedrig gekohlten Stählen die Höchstwerte der zulässigen Abmaße in DIN 1520, 1543, 1542, 1541, 1612, 1613 festgelegt, sowohl für Formstahl, als auch für Stabstahl, letztere für Profile mit und ohne besondere Vorschriften für Querschnittsabmaße. Mit den Maßabweichungen der Walzprofile steht auch eine entsprechende Gewichtsabweichung je laufenden Meter Walzstab in Beziehung, daher enthalten auch die genannten Normblätter Angaben über zulässige Gewichtsabweichungen. Abmaße und Gewichtsabweichungen stehen selbstverständlich mit der Größe des Profilquerschnittes in Beziehung in dem Sinne, daß bei größeren Profilen auch größere Abweichungen zugelassen sind. Jedes Normalmaß und Normalgewicht läßt also einen kleinen Spielraum nach oben und unten zu. In besonderen Fällen kann auch ein Spielraum nur nach oben oder nur nach unten vereinbart werden.

Mitunter kommen Oberflächenfehler an Walzstäben vor, die durch die Walzung hervorgerufen sein können: Überwalzungen von Gasblasen, Kratzer durch Vorbeistreifen an Führungen, Fehler durch Schneiden von Walzrändern, Kaliberfaltungsrisse durch Aufschweißungen und Rauwerden der Kaliber, Härterisse, die im Laufe der Gebrauchszeit in der Oberfläche von Hartgußwalzen entstehen können, Druckfaltungsrisse bei ungeeigneter Kalibrierung. Ihre Bewertung muß von den Lieferungsvereinbarungen und den Verwendungsabsichten ausgehen.

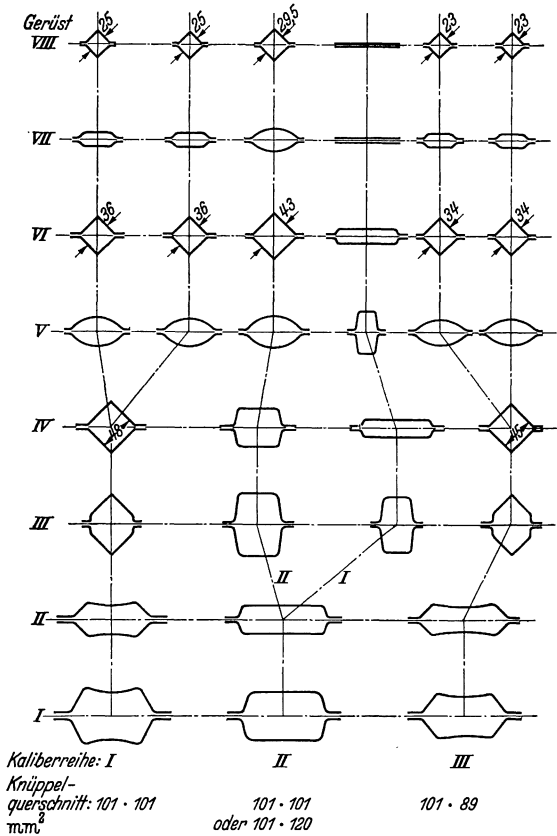


Abb. 4. Schema einer Stabstahlwalzung. (EMICKE.)

2. Walzbarkeit.

Die Herstellung eines jeden Walzwerkserzeugnisses vom Rohblock bis zum fertigen Walzprofil ist nur bei genauer Kenntnis der Walzbarkeit eines Werkstoffes möglich. Der Grad der Walzbarkeit ist die Grundlage für die Kunst des Kalibrierens. Stahl besitzt die Eigenschaft, sich in warmem Zustande plastisch verformen zu lassen, wenn Kräfte bestimmter Größenordnung auf ihn einwirken. Allerdings besitzt diese Verformungsfähigkeit eine Grenze, wird diese überschritten, so tritt an Stellen, die die größten Zugkräfte aufzunehmen haben, ein Spalten oder Aufbröckeln ein, der stoffliche Zusammenhalt wird zerstört. So besitzt jeder Stahl ein Warmformänderungsvermögen, das mit Zusammensetzung des Werkstoffes und der Arbeitstemperatur in Beziehung steht, es kann durch Stauchversuche ermittelt werden. Niedrig gekohlte Stähle, sowie solche mit Nickel oder Mangan legierte Baustähle zeigen ein besseres Formänderungs-

vermögen, als hochgekohlte Werkzeugstähle, ein Kohlenstoffgehalt von 1,7% stellt etwa die obere Grenze einer möglichen Verformbarkeit dar. Steigende Gehalte an Schwefel, insbesondere bei gleichzeitiger Anwesenheit von Sauerstoff im Stahl, vermindert sehr stark das Formänderungsvermögen. Bei Temperaturen zwischen 700 und 1100° tritt bei der Bearbeitung solcher Stähle ein Aufspalten der Kanten und Enden auf, eine Erscheinung, die mit Rotbruch bezeichnet wird. Ein gegossener Stahl hat ein geringes Formänderungsvermögen, da der Zusammenhalt der einzelnen Kristalle, die in der flüssigen Schmelze auskristallisierten, an manchen Stellen recht locker ist. Durch leichte Formänderungsarbeit muß zunächst das Gußgefüge zerstört werden, um ein starkes Verformen dann ohne Schaden vornehmen zu können.

Dem Verformen setzt jeder Stahl einen bestimmten Widerstand entgegen, es muß eine Mindestkraft aufgewendet werden, um eine Verformung überhaupt zu erzielen. Diese Größe bedeutet den Formänderungswiderstand, er ist der maßgebende Wert für die Bestimmung des Kraftbedarfes für den Arbeitsvorgang. Sowohl Formänderungsvermögen eines Werkstoffes als auch Formänderungswiderstand sind temperaturabhängig in dem Sinne, daß mit steigender Temperatur das Formänderungsvermögen zu- und der Formänderungswiderstand abnimmt. Bemerkenswert ist schließlich noch die Tatsache, daß der Formänderungswiderstand von der Schnelligkeit beeinflußt wird, mit der die Verformung durchgeführt wird. Dieser Umstand muß bei der Beurteilung der Formänderungsfähigkeit ebenfalls berücksichtigt werden, da der Kraftaufwand mit zunehmender Schnelligkeit der Formänderung steigt.

3. Walztemperatur.

Nach Möglichkeit wird vermieden, daß die Arbeitstemperatur sich unterhalb der Umwandlungstemperatur der festen Legierung befindet, die bei den gewöhnlichen Stählen bei etwa 900° liegt. Dem Walzwerker sind damit seine Arbeitsbedingungen gegeben, indem er die Größen Formänderungsvermögen und Formänderungswiderstand des Werkstoffes auf der einen Seite und Walzgeschwindigkeit, sowie Temperaturabfall während der Walzung auf der anderen Seite gegeneinander abgleichen muß.

4. Schmiedbarkeit.

Diese Begriffe finden sinngemäße Anwendung beim Schmiedevorgang. Auch hier handelt es sich um die Berücksichtigung des Formänderungsvermögens, des Formänderungswiderstandes und der Formänderungsgeschwindigkeit. Eine langsame Durchführung der Formänderung findet bei der Anwendung der Schmiedepressen statt. Allerdings nimmt das Preßschmieden, namentlich bei großen Werkstücken, mehr Zeit in Anspruch als das Hammerschmieden, wodurch eine starke Abkühlung des Werkstückes in Berührung mit den Preßwerkzeugen verursacht wird.

Man unterscheidet das Reckschmieden, das Vorschmieden und das Formschmieden. Bei leichten Stücken benutzt man Dampf- und Lufthämmer, bei schweren Stücken hydraulische Pressen. Unter Gesenkschmieden versteht man solche Arbeiten, bei denen das Werkstück, das schon eine bestimmte Vorform und Größe besitzt, in eine Matrize eingeschlagen wird. Zur Durchführung der Arbeiten dienen Fallhämmer, Exzenterpressen, Spindel- und Kurbelpressen. Bei der Auswahl des jeweils geeigneten Verformungsverfahrens spielen wirtschaftliche Erwägungen, sowie der Gesichtspunkt der geringsten Beanspruchung des Werkstoffes und der Werkzeuge eine Rolle.

Jede Warmverformung, die von einem gegossenen Block ausgeht, hat eine bedeutende Verbesserung der Festigkeitseigenschaften zur Folge, weil ein feinkörniges, regelmäßiges Gefüge erzielt wird, wenn bei genügend hoher Temperatur

der Walz- oder Schmiedevorgang so ist, daß eine gleichmäßige und gute Durchschmiedung vorgenommen wird.

5. Kaltverformung.

Außer der Warmverformung findet beim Stahl in manchen Fällen auch eine Kaltverformung statt, d. h. eine solche, die bei Raumtemperatur vorgenommen wird, denn auch bei niedrigen Temperaturen besitzt der Werkstoff ein gewisses, wenn auch geringes Formänderungsvermögen. Man benutzt das Verfahren beim Kaltwalzen von Blechen und Bändern, beim Drahtziehen, beim Tiefziehen von Hohlgefäßen usw. Bei der Kaltverformung erfährt der Stahl je nach dem Grad der Verformung eine Veränderung seiner Eigenschaften, Zugfestigkeit, Streckgrenze und Härte steigen an, Dehnung und Einschnürung nehmen ab, hervorgerufen durch eine Verzerrung oder Zertrümmerung von Kristallen. Ausgeglichen werden diese Wirkungen durch ein an die Kaltverformung angeschlossenes Glüh- oder Vergütevorgang. Bei wiederholter Kaltverformung, beispielsweise bei mehrfachem Kaltwalzen und Kaltziehen, müssen Zwischenglühungen vorgesehen werden. Die Glühtemperaturen liegen bei 600—650°, da hier eine Rekristallisation eintritt.

VII. Stahlguß.

Der weitaus größte Teil des in Stahlwerken erzeugten Stahls wird in Blockformen (Kokillen) gegossen, nach dem Erstarren des Stahls werden die Formen abgezogen und die Blöcke dem Walzwerk zugeführt zur Verwalzung auf Fertigerzeugnisse. Ein kleiner Teil geht in die Preß- und Hammerwerke zum Verschmieden. Es wird aber auch Stahl erzeugt, der in solche Formen vergossen wird, die die Gestalt eines Fertigerzeugnisses schon besitzen und aus einer tonreichen Formmasse bestehen. Solche Werkstücke, die durch Vergießen von Stahl in Formen hergestellt sind, werden nach DIN 1681 als Stahlguß bezeichnet. Sie erhalten nachträglich keine Warm- oder Kaltformgebung, wohl kommt eine Glühung in Betracht. Die Bedingungen nach DIN 1681 für unlegierten Stahlguß beziehen sich nur auf die Vorschrift der Zugfestigkeit und Bruchdehnung und umfassen die Normal- und Sondergüten Stg 38 . 81 und Stg 38 . 81 R, Stg 45 . 81, Stg 50 . 81 R, Stg 52 . 81, Stg 60 . 81, sowie Stg 38 . 81 S, Stg 40 . 81 S und Stg 52 . 81 S. Die Sondergüten haben bei gleicher Zugfestigkeit eine höhere Bruchdehnung. Zu diesen geläufigsten Stahlgußsorten kommen noch hochwertiger Kohlenstoffstahlguß, legierter und vergüteter Stahlguß, Manganstahlguß, Nickel-, Chrom- und Chromnickelstahlguß und einige andere. Für eine Reihe von Verwendungszwecken sind besondere Arten entwickelt worden.

Der Stahl kann im Siemens-Martin-Ofen, aber auch im Elektroofen oder im Tiegel erschmolzen werden. Zur Erzeugung der einfachen Legierungen benutzt man auch den Kleinkonverter. Bei der Herstellung der Formen werden Modelle in Sand eingeformt. Der Sand ist in feuchtem Zustand bildsam formbar. In vielen Fällen muß die Form vor dem Abgießen getrocknet werden. Es ist für die Herstellung eines einwandfreien Gußstückes wesentlich, daß schon bei der Konstruktion desselben gießtechnische Bedingtheiten, wie Vermeidung ungleichmäßiger Wandstärken, Anhäufung großer Stahlmassen an einzelnen Punkten und scharfe Übergänge, vermieden werden.

VIII. Gußeisen.

Noch eine andere Eisenlegierung wird in Sandformen vergossen, nämlich das Gußeisen. Es ist eine hochkohlenstoffhaltige Eisenlegierung. Zur Begriffsbestimmung sei hier bemerkt, daß man nach heutiger Vereinbarung alle Legierungen des Eisens, die, ohne eine Nachbehandlung erfahren zu haben, eine bildsame Verformung durch Schmieden, Walzen, Pressen, Ziehen gestatten, mit Stahl bezeichnet.

Die obere Grenze des Kohlenstoffgehaltes liegt bei etwa 1,7%, jedoch läßt sich eine scharfe Grenze nicht ziehen, die Legierungen gehen mit steigendem Kohlenstoffgehalt allmählich in diesem Bereich in solche über, die sich nicht mehr verformen lassen. Darüber liegt das Gebiet des Gußeisens und des Roheisens, deren Kohlenstoffgehalt allerdings in den meisten Fällen bei 3% und höher liegt. Unter Gußeisen versteht man eine Eisenkohlenstofflegierung mit meist mehr als 1,7% C, deren Formgebung durch Vergießen erfolgt, sie kann anschließend einer spanabhebenden Bearbeitung unterzogen werden. Die Legierungen haben stets einen höheren Siliziumgehalt, meist über 1%. Entsprechend der vielfachen Verwendung des Gußeisens hat man dasselbe in eine Reihe von Gruppen unterteilt, die nach den Bedarfsgebieten benannt sind. Die wichtigsten sind:

1. Kunstguß.
2. Bauguß: dahin gehören Bauplatten, Säulen, Fenster, Rohre und Rohrformstücke, Kanalisationsteile.
3. Ofen- und Geschirrguß.
4. Piano- und Flügelplatten.
5. Maschinenguß ohne besondere Abnahmevorschriften.
6. Maschinenguß nach besonderen Abnahmevorschriften.
7. Zylinderguß, Dampf-, Gas-, Wasser-, Kraftfahrzeugzylinder.
8. Hartguß.
9. Walzenguß.
10. Guß mit besonderen Eigenschaften.
11. Guß für Blockformen.
12. Bremsklötze.

Außer dieser Unterteilung nach Verwendungsgebieten kann auch eine nach Sortenbezeichnung vorgenommen werden. Gütevorschriften sind in DIN 1691 enthalten. Maschinenguß ohne besondere Vorschriften entspricht Ge 12 . 91. Maschinenguß mit besonderen Vorschriften umfaßt Ge 14 . 91, Ge 18 . 91, Ge 22 . 91 und Ge 26 . 91. Als Beispiel eines hochwertigen Graugusses ist der im Hinblick auf seine Gefügebildung mit Perlitguß bezeichnete zu nennen, außerdem die Gruppe der legierten Graugußarten. Als Legierungselemente kommen Nickel, Chrom, Molybdän, Titan, Vanadin und Kupfer in Betracht. Im Grauguß ist ein Teil des Kohlenstoffs in Form von Graphit vorhanden und im metallischen Gefüge in feiner Verteilung eingesprengt. Der Anteil an Graphit ist etwa 10—30% des Gesamtkohlenstoffs. Beim Hartguß ist diese Graphitabscheidung durch Erhöhung des Gehaltes an Mangan oder auch Schwefel unterdrückt. Man erhält dadurch ein Gußerzeugnis von großer Härte. Gußeisenlegierungen, die bei langsamer Abkühlung grau erstarren, können bei geeigneter Zusammensetzung durch Abschreckung oberflächlich zur weißen Erstarrung gebracht werden, während der Kern grau anfällt (Schalenguß). Eine besondere Gußeisenart ist der Temperguß, er wird aus weiß erstarrendem Gußeisen gegossen und danach durch bestimmte Glühverfahren entkohlt, oder in seiner Kohlenstoffform so umgewandelt, daß er zäh, hämmerbar, leicht bearbeitbar und in beschränktem Maße schmiedbar wird. Die Unterlagen zu seiner Bewertung liefert DIN 1692. Beispiele von Analysen einiger Gußeisensorten:

	C _{ges.}	Graphit	Si	Mn	P	S
Ge 22 . 91	3,20	2,73	1,81	0,65	0,75	0,15
Ge 26 . 91	3,15	2,41	1,55	0,65	0,50	0,10
Perlitguß	3,25	2,43	1,20	0,75	0,60	0,14

Gußeisen wird in den meisten Fällen im Kupolofen geschmolzen, einem Schachtofen, dem als Brennstoff Koks und als Schmelzstoff Gußbruch mit einem mehr oder weniger großen Zusatz von Gießereiroheisen, mitunter auch Stahlschrott zugesetzt wird. Die Mengenanteile werden auf Grund ihrer chemischen Zusammensetzung und mit Rücksicht auf die erstrebte Analyse des Erzeugnisses berechnet, sie bilden die Gattierung des Ofens. Außer dem Kupolofen finden in Sonderfällen (z. B. Walzenguß) große Flammöfen Verwendung, auch der Elektroofen kommt in einigen Betrieben vor, da er die Erreichung höherer Schmelztemperaturen gestattet, die dazu dienen, durch Überhitzung das Gußeisen zu veredeln oder teure Legierungsstoffe zuzuschmelzen.

Gußeisen hat im Vergleich zu den einfachen Kohlenstoffstählen, abgesehen von dem geringeren Preis, den Vorteil, daß es in Bauteilen schwingungs- und zitterfrei ist, daß es in seiner Gußhaut einen natürlichen Korrosionsschutz besitzt, daß es ferner sehr kerbunempfindlich ist und sich vermöge seiner guten Vergießbarkeit auch bei verwickelten Bauformen und geringen Wandstärken verwenden läßt.

IX. Stahlvorgeschichte.

Die Eigenschaften des Stahles werden grundlegend durch seine chemische Analyse bestimmt, aber nicht allein, sondern unter anderem auch durch thermische Begebenheiten, z. B. welche Wärmevorgänge während der Herstellung vorgekommen sind, welche Temperaturhöhen durchlaufen und mit welcher Geschwindigkeit sie durchlaufen wurden; ob beim Fertigmachen des Stahles im Stahlwerk Mangan oder Silizium, oder Aluminium angewendet wurde, in welchem Zeitpunkt sie zur Stahlschmelze gegeben wurden usw. Man faßt diese Vorgänge unter dem Begriff der Vorgeschichte des Stahles zusammen. Bei einfachen Kohlenstoffstählen treten allerdings diese Zusammenhänge nur wenig in die Erscheinung, bei hochwertigen ist es jedoch angezeigt, bei vergleichender Bewertung darauf Rücksicht zu nehmen. Vergleichsprüfungen enthalten dann die Schmelzprotokolle mit Mengen-, Temperatur- und Zeitangaben.

1. Stahlanalyse.

Die chemische Analyse erstreckt sich normalerweise auf die Bestimmung von Kohlenstoff, Mangan, Phosphor und Schwefel. Sind noch andere Elemente zulegiert, wie Silizium, Chrom usw., so werden auch diese bestimmt. Aber damit ist die Analyse noch nicht vollständig, denn jede Eisenlegierung enthält noch Gase, chemisch gebunden oder gelöst oder mechanisch eingeschlossen, die bei der Verarbeitung des Werkstoffs sich, meist eigenschaftverschlechternd, bemerkbar machen. Es handelt sich um Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff, Kohlenoxyd und Kohlendioxyd.

2. Sauerstoff im Stahl.

Unter ihnen ist der Sauerstoff der wichtigste Vertreter, nach den vorliegenden Erfahrungen werden durch ihn die technologischen Eigenschaften des Stahles weitgehend, man kann oft sagen, entscheidend beeinflusst, die meisten nicht-metallischen Einschlüsse sind Sauerstoffverbindungen, eine Reihe von Werkstoff- und Oberflächenfehlern werden durch sie verursacht.

Schon bei der Herstellung des Stahles, sei es im Thomas- oder im Siemens-Martin-Verfahren, werden große Sauerstoffmengen in die flüssige Legierung eingebracht. Der Sauerstoff verbindet sich mit dem Eisen und geht als Eisenoxydul FeO in Lösung. Teilweise verbindet sich der Sauerstoff mit den Legierungselementen Silizium, Mangan, Phosphor, Kohlenstoff und wird dadurch verbraucht, aber von der Oberfläche und insbesondere aus der Schlacke wandert immer wieder Sauerstoff in das Metall.

3. Verteilungssatz.

Es bildet sich eine Verteilung zwischen Metall und Schlacke, den beiden flüssigen Phasen des Systems, und Schlacke und Flammgasen, die im Endzustand den Bedingungen des Verteilungssatzes unterliegen, der besagt: O_2 -Schlacke: O_2 -Metall = konstant und O_2 -Schlacke: O_2 -Flammgase = konstant, also O_2 -Flammgase: O_2 -Metall = ebenfalls konstant. Die Konstanten haben einen bestimmten Zahlenwert, deren Größe von der Zusammensetzung der Phasen und der Temperatur abhängig ist. Aus diesen Beziehungen geht hervor, daß nur dann das Metall sauerstofffrei sein kann, wenn der Wert O_2 -Schlacke: O_2 -Flammgase sehr groß ist. Praktisch ist das nicht der Fall. Im Elektroofen oder noch mehr im Tiegel kann O_2 -Gase sehr klein sein, so daß dann auch O_2 -Metall sehr klein wird.

Praktisch ist es möglich, aus der Schlackenzusammensetzung unter Berücksichtigung der Schmelztemperatur für den Gleichgewichtszustand den Sauerstoffgehalt des Metalls zu berechnen. Am Schluß jeder Stahlschmelze ist sowohl das Reaktionsgleichgewicht zwischen Stahl und Schlacke, als auch der Verteilungsausgleich immer erreicht. Das Metallbad nimmt, wie auch aus Abb. 2 hervorgeht, im Laufe der Schmelzung immer mehr Sauerstoff auf.

4. Gleichgewichte.

Bei hohen Schmelztemperaturen enthält das Metall am Ende der Schmelzung schon so viel Mangan, daß ein besonderer Zusatz nicht nötig ist. Sobald die Schlacke entfernt ist und die Temperatur sinkt, übernimmt das Mangan vom Eisen einen Teil des Sauerstoffs. Es entwickelt sich ein chemisches Gleichgewicht in der Form $FeO + Mn = MnO + Fe$. Das Manganoxydul MnO ist unlöslich in Eisen, es bildet also einen Bestandteil der Schlacke. Mit steigender Temperatur wandert der Sauerstoff zum Eisen und bildet FeO , mit sinkender Temperatur wächst umgekehrt die Menge des MnO . Es handelt sich um eine in diesem Sinne umkehrbare Reaktion, die temperaturabhängig ist. Enthält die Stahlschmelze beim Abstich noch Kohlenstoff oder wird zum Aufkohlen in geeigneter Form Kohlenstoff zugesetzt, so setzt sich ein Teil des Kohlenstoffs ebenfalls mit FeO um, entsprechend der Gleichung $FeO + C = Fe + CO$, dabei entsteht Kohlenoxyd, das zunächst im Stahl in der Schwebe bleibt, dann aber sich in feinen Gasbläschen spontan abscheidet. Ob nun diese letzte Gleichung vor der der Manganreaktion den Vorrang hat, hängt von der Temperatur und der Menge des Mangans ab. Je höher die Temperatur ist, desto höher ist der Anteil der Kohlenstoffreaktion und ebenso, je weniger Mangan in der Legierung ist. Die beiden Reaktionen unterscheiden sich aber grundsätzlich voneinander in dem Sinne, daß bei der Manganumsetzung ein Schlackenerzeugnis, nämlich MnO , entsteht, das noch nicht ohne weiteres aus der Metallschmelze entfernt ist, allerdings eine weniger schädliche Bindung des Sauerstoffs darstellt, als das FeO , während bei der Kohlenstoffumsetzung ein Gas entsteht, nämlich Kohlenoxyd, das entweicht und damit eine bestimmte Sauerstoffmenge aus der Metallschmelze entfernt. Man kann also endgültig den Sauerstoffgehalt eines flüssigen Stahles nur mit Kohlenstoff vermindern.

Ähnlich liegen die Verhältnisse, wenn dem fertig geschmolzenen Stahl siliziumhaltige Legierungen, z. B. Ferrosilizium, zugesetzt wird. Bei der hohen Bindekraft des Siliziums mit Sauerstoff wird ein großer Teil des an Eisen gebundenen Sauerstoffs an Silizium gebunden, entsprechend der Gleichung $2 FeO + Si = SiO_2 + 2 Fe$. Je nach Art des angewandten Desoxydationsmittels und der Zeit zwischen ihrer Zugabe und der Erstarrung der Stahlschmelze nach dem Vergießen werden die unlöslichen Ausscheidungen in verschiedenem Umfang aus dem Metall

als feine Schlackentröpfchen abgesondert. Es bleibt aber immer ein Teil der Oxyde in feiner Verteilung im Metall zurück. In ihrer Größe schwanken sie von unter dem Mikroskop leicht sichtbaren bis zu feinsten Einlagerungen.

5. Einschlüsse im Stahl.

Auch wenn beim Vergießen dem Stahl Aluminium zugesetzt wird, nimmt dieses Metall vom Eisen den Sauerstoff auf und bildet Aluminiumoxyd, das als feine Fremdkörpereinlagerung im Stahlgefüge nach dem Erstarren eingebettet ist.

Die eingelagerten Fremdkörper können zum Teil im erkalteten Stahl festgestellt werden. Sie treten entweder in unregelmäßiger Streuung, in Reihen- oder Streifenanordnungen, oder an der Oberfläche von Hohlräumen auf. Bei in üblichen Verfahren hergestellten flüssigem Stahl findet bei jeder Temperatursenkung die Abscheidung von Fremdkörpern oxydischer Natur und von Kohlenoxyd statt und zwar treten diese Fällungsreaktionen immer stufenweise auf, sobald die Gleichgewichte um einen kleinen Betrag gestört sind. Wenn aus irgendeinem Grunde eine Wiedererhitzung stattfindet, so lösen sich die Fremdkörper wieder auf. Da aber der Kohlenstoff als Kohlenoxyd entwichen ist, muß mit wiederholtem Temperatursenken und Wiedererhitzen eine Entkohlung verbunden sein.

Da die im flüssigen Stahl zurückbleibenden Eisenoxydulmengen solche Bedeutung haben, sind der Anteil der Oxydationen des Eisens im Stahlschmelzofen und die Art der Desoxydation des erschmolzenen Stahles zwei der wichtigsten Merkmale im Stahlherstellungsverfahren.

6. Stickstoff.

Stickstoff ist ebenfalls im flüssigen Eisen in geringer Menge löslich und zwar ist die Löslichkeit von dem Stickstoffdruck an den Berührungsflächen Metall—Gas abhängig. Schon während der Schmelzung im Stahlofen oder beim Verblasen im Thomas-Konverter wird Stickstoff gelöst. Abb. 2 zeigt den Stickstoffgehalt im Stahl während des Schmelzverlaufes. Beim Thomas-Verfahren kann man mit einem Höchstgehalt von 0,02% am Ende der Blasezeit rechnen. Mit sinkender Temperatur nimmt die Löslichkeit des Stickstoffs im Stahl ab. Beim Vergießen und während der Erstarrung tritt daher ein Teil des Stickstoffs aus dem Stahl aus. Dieser Vorgang kann unterdrückt werden, indem man durch Aluminiumzusatz den Stickstoff im flüssigen Stahl bindet. Möglich ist auch eine Bindung an Titan.

7. Wasserstoff.

Wasserstoff löst sich in beschränktem Umfange in flüssigem Stahl und zwar ist die Gelegenheit dazu sowohl im Thomasverfahren als auch im Siemens-Martin-Verfahren gegeben, indem Wasserdampf der Gase bzw. Luft in Berührung mit dem flüssigen Metall zerlegt wird. Eine Eigentümlichkeit dieses Lösungsvorganges ist, daß der Wasserstoff atomar sich spaltet. Die Löslichkeit ist temperaturabhängig, sie nimmt mit sinkender Temperatur ab. Leider gibt es keine Möglichkeit, den Wasserstoff durch eine geeignete chemische Bindung unschädlich zu machen. Da auch im festen Zustand der Stahl noch eine begrenzte Löslichkeit für Wasserstoff besitzt, die mit sinkender Temperatur abnimmt, können unter Umständen in dem erstarrten Metall örtlich sehr hohe Gasdrucke auftreten, die mitunter zu einem Zersprengen des Stahlstückes führen. Wasserstoffgehalte, bestimmt an erkalteten Stahlproben, liegen zwischen 0,0001 und 0,0035%. Man kann annehmen, daß der in die Blockform vergossene Stahl stets einen Sauerstoffgehalt besitzt, der mindestens dem Sättigungsvermögen der jeweiligen Legierung für Sauerstoff vor dem Vergießen entspricht. Jede Abkühlung liefert daher einmal eine Abscheidung von Eisenoxydul aus übersättigter Lösung, ferner

eine Ausfällung von Manganoxydul und schließlich eine Gasentwicklung durch die Entstehung von Kohlenoxyd, sowie durch Entwicklung von Stickstoff und Wasserstoff. Nur bei Schmelzen mit Siliziumgehalten oder Aluminiumzusätzen, oder anderen Stoffen mit hohen Verbrennungswärmen ist eine Übersättigung der Legierung mit Eisenoxydul nicht zu erwarten. Beispielsweise wurden folgende Sauerstoffgehalte ermittelt: Stahl bei 1600° mit 0,306% O₂, bei 1527° mit 0,21%.

Außer den oxydischen Abscheidungen gibt es noch andere im erstarrenden Stahl, nämlich Sulfid-, Phosphid- und Nitrideinschlüsse. Zur ersten Gruppe zählen die Verbindungen des Schwefels mit Mangan und Eisen, als reine Sulfide wohl selten, vielmehr als während der Abkühlung entstehende Lösungen von MnS in FeS, unter Umständen können auch die sich gleichzeitig ausscheidenden Oxyde an diesen Lösungen beteiligt sein. Der Schmelzpunkt des MnO liegt bei 1610°, der des FeO bei 1365°, derjenige von Mischungen beider Stoffe zwischen diesen beiden Temperaturen. Das Manganoxydul ist also schon fest, wenn der Stahl noch flüssig ist, dessen Erstarrungsbeginn bei 1520° liegt. Der Schmelzpunkt der Sulfide liegt für MnS bei 1610° und FeS bei 1175°.

X. Abkühlungserscheinungen.

Nachdem der Stahl noch einige Zeit flüssig in der Blockform steht, steigen Gase auf, die unter Umständen den Stahl zum Aufschäumen bringen. Durch Zusatz von Aluminium, bis zu 60 g je Tonne Stahl, kann dieser Vorgang unterdrückt werden. Man unterscheidet in diesem Sinne unberuhigt und beruhigt vergossenen Stahl.

1. Gießverfahren.

Die Gießgeschwindigkeit ist für die Erzielung eines guten Blockes von großer Bedeutung. Sie steht, abgesehen von den gegebenen Verhältnissen, wie Blockgröße, Blockform, Gießart, mit der Gießtemperatur in Verbindung. Geringe Gießgeschwindigkeit hebt die Schäden einer zu hohen Gießtemperatur in etwa auf. Je niedriger die Gießtemperatur ist, desto feiner entwickelt sich die Primärkristallisation und desto geringer werden die Blockseigerungen. Bei zu hoher Gießtemperatur können nach der Erstarrung Blockrisse entstehen, die beim Auswalzen aufreißen oder Überlappungen am fertig gewalzten Stab zeigen.

2. Blockseigerung.

An den Wandungen der Blockformen entstehen, sobald der Stahl mit sinkender Temperatur in seinen Erstarrungsbereich kommt, Kristalle, die senkrecht zu den Blockwandungen nach dem Innern der Schmelze wachsen. Die Bildung dieser stengeligen oder säulenförmigen Kristalle wird durch hohe Gießtemperatur und Gießgeschwindigkeit begünstigt. Die Kristalle schieben die schon abgeschiedenen und sich weiter abscheidenden oxydischen und sulfidischen Fremtteilchen vor sich her, ebenso werden die entstehenden Gasblasen nach innen geschoben, bis sie sich durch ständiges Wachsen so vergrößert haben, daß sie in der Restschmelze nach oben steigen. Zum Teil bleiben sie aber auch zwischen den Kristallspitzen haften. Das Ergebnis dieses Vorganges ist die Anreicherung des Blockes in seinem Innern an Legierungselementen, insbesondere an Phosphor und Schwefel, Blockseigerung, und ferner die Entstehung eines oder mehrerer Blasenkränze in einem mehr oder weniger großen Abstand vom Blockäußeren. Abb. 5 zeigt einen gegossenen Stahlblock in der Längsrichtung durchschnitten, der eine normale Anordnung der Gasblasen in einem unberuhigt vergossenen Stahl zeigt. Die Gasblasen beeinträchtigen bei dieser Anordnung nicht die Güte des Stahles, da sie beim Walzen oder Schmieden fehlerfrei verschweißt werden.

3. Lunker.

Im oberen Teil des Blockes bildet sich bei der Erstarrung ein gewöhnlich trichterförmiger Hohlraum, Lunker, der dadurch entsteht, daß der Stahl mit der Abkühlung schrumpft und die zuletzt flüssigen Teile im Kopf des Blockes so lange nachsinken, bis alle unteren Hohlstellen ausgefüllt sind. Außer der Blockseigerung macht sich im Stahlblock noch eine Gasblasenseigerung bemerkbar, dadurch hervorgerufen, daß sich im erstarrenden Stahl an einzelnen Stellen mit Gasen gefüllte Hohlräume bilden, die anschließend mit Legierungselementen angeereicherte Restschmelze in sich aufsaugen. Bei den einfachen Kohlenstoffstählen übersteigen im allgemeinen die Seigerungen nicht ein solches Maß, daß beim Fertigerzeugnis ein Nachteil sich bemerkbar macht.

4. Blockfehler.

Das Blockäußere wird fehlerhaft, wenn z. B. beim Gießen Spritzer an der Kokillenwand haften bleiben, Verschweißungen mit der Kokillenwand auftreten und beim Erstarren und Abkühlen sich Oberflächenrisse einstellen. Kaltschweißen sind Überlappungen der Oberflächenhaut, die durch zu kaltes oder unterbrochenes Gießen entstehen können. Die Risse in der Oberfläche des Blockes können durch Aufplatzen der zuerst erstarrten dünnen Haut durch den Druck des noch flüssigen Innern (Längsrisse) oder durch Hängenbleiben des Blockes an der Kokille auftreten, so daß beim Abkühlen die Schrumpfung behindert wird (Querrisse), schließlich kann die Ursache noch in einer ungeeigneten Blockform liegen.

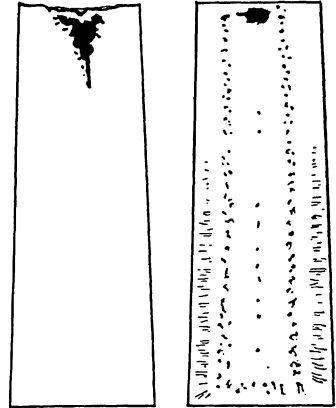


Abb. 5. Lunker und Blasen in einem Stahlblock.

5. Abkühlungsvorgänge.

Die Deutung der Erstarrungs- und weiteren Abkühlungsvorgänge ist bei allen technischen Eisen- und Stahllegierungen sehr verwickelt, weil sie keinen Erstarrungspunkt besitzen, sondern eine mehr oder weniger große Temperaturspanne, innerhalb der der Übergang von flüssig zu fest vonstatten geht, weil weit unterhalb der Erstarrungstemperaturen nochmals eine grundlegende Umwandlung des metallischen Gefüges eintritt, die nur mit besonderen Mitteln ausnahmsweise unterdrückt werden kann und weil alle technischen Legierungen nicht nur aus zwei oder drei Elementen (Komponenten) bestehen, sondern aus einer größeren Zahl. Die Grundlage aller Untersuchungen bildet indessen bei den gewöhnlichen Stählen in erster Annäherung das Mengenverhältnis Eisen zu Kohlenstoff, weil in diesen Fällen der Kohlenstoff der wichtigste Eigenschaftsträger ist. Auf Grund der einschlägigen Forschung ist für die Abkühlungsvorgänge des Systems Eisen—Kohlenstoff ein Schaubild entwickelt worden, das in Abb. 6 dargestellt ist. Auf der Abszisse sind die Kohlenstoffgehalte von 0% bis zu etwa 7% aufgetragen, entsprechend Eisengehalten von 100—93%, auf der Ordinaten stehen die Temperaturen. Ohne auf die Einzelheiten dieses verwickelten Schaubildes einzugehen, sei darauf hingewiesen, daß in dem Bereich von 0—1,7% Kohlenstoff das Gebiet der Stähle liegt, darüber hinaus bei höheren Kohlenstoffgehalten das Gebiet der Guß- und Roheisenlegierungen.

Nur an zwei Beispielen seien die mit der Abkühlung verbundenen Vorgänge erläutert. Eine Legierung von 0,5% Kohlenstoff ist bei 1600°, wie das Schaubild aussagt, vollständig

flüssig. Wenn nun die Temperatur langsam und stetig absinkt, so erfolgt bei Durchschreiten des Schnittpunktes der Senkrechten auf 0,5% C mit der Linie *BC* die Abscheidung von kohlenstoffhaltigen Eisenkristallen (Mischkristallen), während noch eine Restschmelze übrig bleibt. Bei weiterer Temperatursenkung vermehren sich und wachsen die Kristalle, während der Anteil an Restschmelze immer kleiner wird. Beim Schnitt mit der Linie *GE* ist die Legierung vollständig erstarrt. In dem Temperaturbereich, von diesem Punkte abwärts, ist das Gebiet der festen Lösung; hier findet lediglich ein Konzentrationsausgleich innerhalb der gewachsenen Primärkristalle (Kristallseigerung) statt. Beim Schnitt mit der Linie *GS* vollzieht sich nun eine Umgruppierung, Umkristallisation, hervorgerufen dadurch, daß das Eisen, das bei hohen Temperaturen in der γ -Form vorliegt, nun nicht mehr beständig ist, sondern in die β -Modifikation umgewandelt wird. Eine nochmalige Umwandlung findet beim Durch-

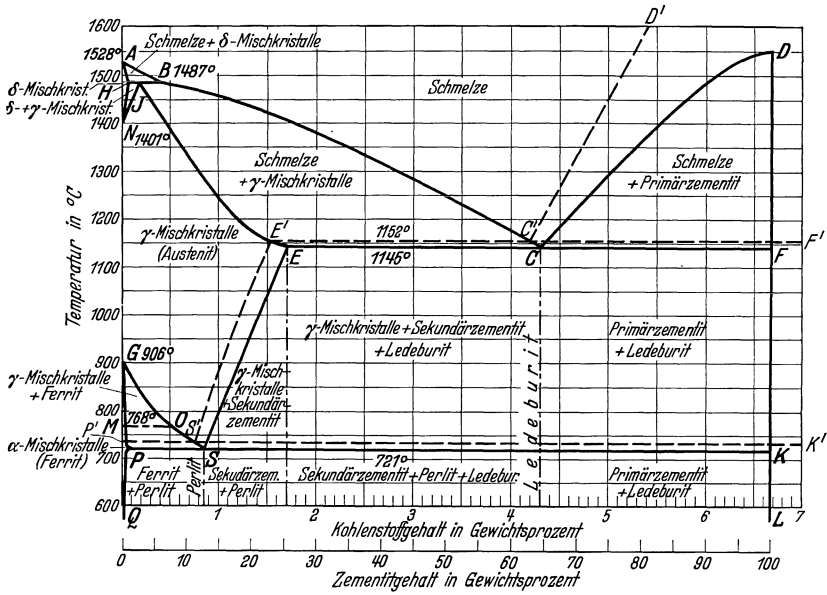


Abb. 6. Eisenkohlenstoffschaubild.

schreiten der Linie *MS* statt, hier entsteht die α -Modifikation des Eisens. Während das γ -Eisen den Kohlenstoff zu lösen vermag, besitzen die β - und α -Form diese Eigenschaft nicht, deshalb scheidet der γ -Eisenkristall den Kohlenstoff als Eisenkarbid Fe_3C ab und da diese Abscheidung fortschreitend in kleinen Stufen vor sich geht, erscheint sie in Form von feinen Lamellen oder Schalen. Metallographisch haben die entstehenden Abscheidungen feste Bezeichnungen. In dem Gebiet *AESG* liegt eine feste Lösung von Kohlenstoff im Eisen vor mit mehr oder weniger hohem Sättigungsgrad. Das Gefüge hat den Namen Austenit. Unterhalb der Linie *PS* sind zwei Gefügebestandteile vorhanden, nämlich das α -Eisen, Ferrit genannt, und die Eisen-Eisenkarbidabscheidung, genannt Perlit. Perlit hat einen unveränderlichen Kohlenstoffgehalt von 0,9% C, daher ist das Mengenverhältnis Ferrit zu Perlit linear ansteigend mit dem Kohlenstoffgehalt. Bei 0,9% C ist nur noch Perlit vorhanden. Abb. 7 zeigt das Gefügebild eines Stahles mit 0,5% C. Bei hochkohlenstoffhaltigen Legierungen sind die Abkühlungsvorgänge grundsätzlich gleichartig. Auch hier ist kein Erstarrungspunkt, sondern ein Erstarrungsintervall, mit einer einzigen Ausnahme, nämlich bei einer Legierung des Eisens mit 4,2% C. In diesem Falle scheidet sich ein einziger Gefügebestandteil aus, der Ledeburit genannt wird. Ferner ist für die hochkohlenstoffhaltigen Legierungen kennzeichnend, daß unter normalen Verhältnissen ein Teil des Eisenkarbids während der Erstarrung zerfällt und elementaren Kohlenstoff abscheidet. Der Umfang des Zerfalls ist verschieden groß, steht aber unter anderem mit der Abkühlungsgeschwindigkeit in Beziehung.

Die nach Durchlaufen der Abkühlungsstufen vorliegenden Gefügebestandteile sind aus der Abb. 7 zu ersehen. In Abb. 8 ist das Gefügebild eines Gußeisens dargestellt, deren einzelne Bestandteile durch eine Ätzung mit Säure hervorgeholt sind.

6. Korngröße.

Bei allen Erstarrungs- und Abkühlungsabläufen ist bei Eisen-Kohlenstoff-Legierungen eine Kristallisation aus der Schmelze und eine Umkristallisation in

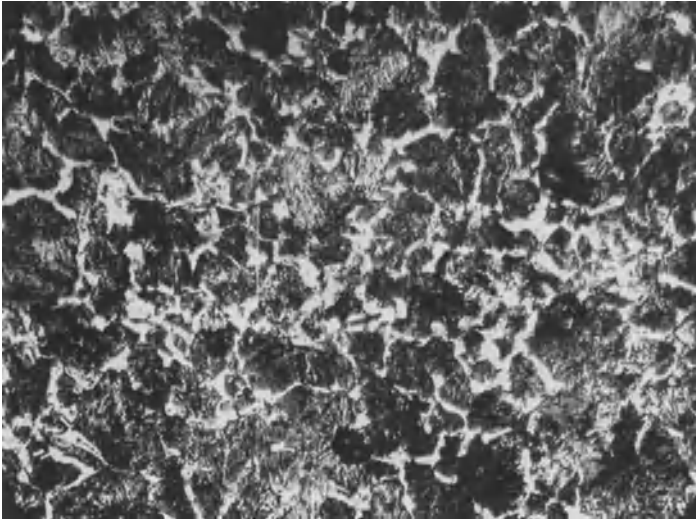


Abb. 7. Kohlenstoffstahl, 0,5 % C.

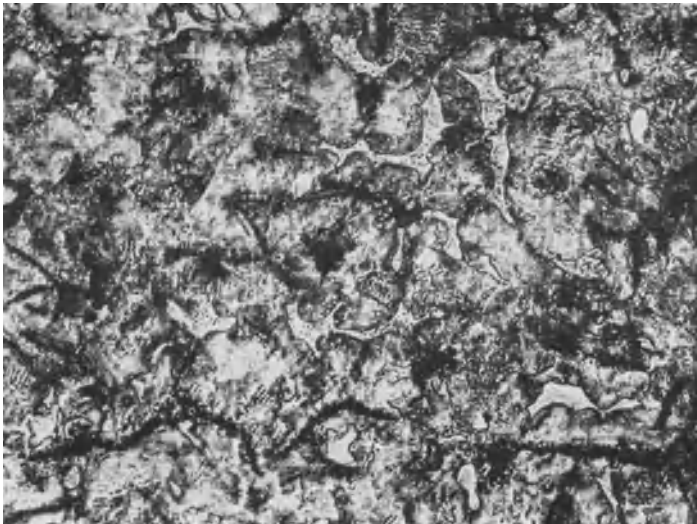


Abb. 8. Gußeisen.

festem Zustand bei etwa 700° wahrzunehmen. Das Primärkorn ist durch Wärmebehandlung in seiner Größe unveränderlich. Das Sekundärkorn entwickelt sich je nach Abkühlungsbedingungen in weiten Grenzen in verschiedener Größe. Bei steigender Abkühlungsgeschwindigkeit verliert sich der Einfluß des Primärkorns

auf die Größe der Ferrit und Zementitkörner, da der Ferrit und Zementit nicht Zeit haben, sich an den Primärkorgrenzen zu sammeln.

7. Alterung.

Die Umwandlung von dem γ - in den α -Zustand des Eisens ist naturgemäß, da er in festem Zustande sich vollzieht, von der Abkühlungsgeschwindigkeit abhängig, d. h., er verläuft unter den üblichen technischen Bedingungen nicht in vollem Umfang. Ein kleiner Rest von nicht vollendeter Umwandlung bleibt bestehen und verursacht in dem erkalteten Werkstück einen Spannungszustand, der sich bei der Messung der Festigkeitseigenschaften bemerkbar macht. Da aber noch nachträglich, auch bei niedriger Temperatur, die noch ausstehende Umwandlung weitergeht, wenn auch nur sehr langsam, so verändern sich die Festigkeitseigenschaften im Laufe der Zeit um einen kleinen Betrag. Diese Erscheinung wird mit Alterung des Stahls bezeichnet und beruht auf der Ausscheidung von Karbid, aber auch Stickstoff und Wasserstoff, die noch überschüssig im Ferrit gelöst waren. Der Grad der Alterungsvorgänge steht mit der stattgehabten Abkühlungsgeschwindigkeit in Beziehung.

8. Warmbehandlung.

Man kann im wesentlichen zwei Behandlungsarten unterscheiden: Die Vergütung und die Oberflächenhärtung. Bei der Vergütung sollen dem durch Schmieden, Pressen oder Ziehen hergestellten Werkstück oder Teilen desselben bestimmte höhere Festigkeitseigenschaften erteilt werden, die sich möglichst gleichmäßig über den ganzen Querschnitt erstrecken. Bei der Oberflächenhärtung sollen die Oberflächenschichten des Werkstückes eine gewünschte Veränderung erfahren. Die Eigenschaft, durch eine geeignete Wärmebehandlung eines Werkstückes eine Härtesteigerung anzunehmen, ist den Kohlenstoffstählen eigentümlich, sie tritt mit steigendem Kohlenstoffgehalt der Legierung immer stärker hervor. Praktisch wird sie bei solchen Legierungen ausgenutzt, die einen Kohlenstoffgehalt von 0,3% und mehr besitzen. Durch die Gegenwart von Nickel, Mangan und Chrom wird die Härtung gesteigert. Die Härtung eines Werkstückes wird dadurch hervorgerufen, daß man dasselbe bis zu Temperaturen erhitzt, die in dem Gebiet der festen Lösung liegt und dann schnell abkühlt. Zur Abkühlung werden Abschreckmittel verwandt, Wasser, Öl, Luft oder auch Zwischenbäder, die Wahl muß auf die Zusammensetzung des Stahls und auf die Abmessungen des Stückes Rücksicht nehmen. Die Abschreckwirkung des Ablöschbades ist von der spezifischen Wärme, der Wärmeleitfähigkeit, der Verdampfungswärme und der Siedetemperatur abhängig. Durch Zusätze von Salzen oder Säuren wird ein gesteigerter und gleichmäßiger Ablöschverlauf erzielt. Eine zu rasche Abschreckung hat leicht eine Rißbildung und ein Verziehen des Stückes zur Folge, um so mehr, je härter dasselbe von Natur schon ist. Um eine Milderung des Abschreckgefüges herbeizuführen und die entstandenen Spannungen zu beseitigen, werden nach dem Abschrecken die Stücke noch einmal auf eine Temperatur von mehreren 100° erhitzt, das Anlassen. Bei hochkohlenstoffhaltigen und legierten Stählen, die in dieser Beziehung sehr empfindlich sind, werden von den Herstellwerken Härte- und Vergütungsvorschriften mitgeliefert.

Bei der Oberflächenhärtung kann man zwei Verfahren unterscheiden: Die Einsatzhärtung und die Stickstoffhärtung. Die Einsatzhärtung besteht in einer Aufkohlung der Randschichten eines Werkstückes, hervorgerufen durch kohlenstoffabspaltende Zementationsmittel in der Wärme, solche können in fester, flüssiger oder gasförmiger Beschaffenheit vorliegen. Der Zweck ist eine Erhöhung des Kohlenstoffgehaltes in den Oberflächenschichten bis zu einer gewissen Ein-

dringtiefe, verbunden mit Karbidausscheidungen. Als Mittel dienen Kohlepulver, in das die Werkstücke eingepackt und erhitzt werden, zyankali- oder zyannatriumhaltige Salzgemenge, Leuchtgas. Nach der Zementation findet noch eine Wärmebehandlung statt. Bei dem Verfahren ist eine Randaufkohlung bis 0,9% anzustreben. Legierungszusätze, die besondere Karbide bilden, Chrom, Molybdän, begünstigen die Aufkohlung, verbunden mit Karbidausscheidungen und vergrößern die Eindringtiefe.

Stickstoffhärtung tritt ein, wenn der Stahl bei 400—500° mit stickstoffhaltigen Gasen behandelt wird, ein Abschrecken wird nicht angeschlossen. Die Härtung beruht auf der Bildung von Nitriden des Eisens in der Oberflächenschicht.

Ein Glühen von Stählen findet außer diesen Härtungsabsichten noch in vielen Fällen statt. Glüht man einen Stahl und kühlt ihn sehr langsam ab, so erhöht man seine Weichheit, seine Biegsamkeit, man verringert seine Härte, es gelingt damit auch, in dem Stahl enthaltene Gase zu entfernen. Für die Entwicklung der Korngröße ist die Glühtemperatur maßgebend. Die Glühtemperatur muß das γ -Gebiet der Legierung erreichen. Je höher die Erhitzung in dieses Gebiet hinaufragt, desto gröber fällt nach dem Abschrecken das Korn aus. Zu starke Überhitzung führt leicht zum Verbrennen des Stahls.

Die Metallurgie des Schweißens.

Von Professor Dr.-Ing. habil. A. MATING, Hannover, und Dr.-Ing. C. STIELER, Wittenberge.

A. Die im Stahlbau vorwiegend verwandten Baustoffe.

Im Stahlbau werden überwiegend Kohlenstoffstähle und niedrig legierte Baustähle verwendet. Für Sonderfälle wird Stahlguß gewählt. Die Kohlenstoffstähle sind nach DIN 1611, 1612 und 1613 ihrer Festigkeit entsprechend eingeteilt. Sie werden mit St 34, St 37, St 42, St 50, St 60 und St 70 bezeichnet. Die Steigerung der Festigkeit wird ausschließlich durch Zunahme des Kohlenstoffgehaltes bewirkt. Unter St 00 wird ein Stahl verstanden, für den keine Mindestfestigkeit vorgeschrieben ist.

Eine besondere Bedeutung besitzen diejenigen hochwertigen legierten Baustähle, die — entsprechend ihrer Festigkeit — mit St 44 und St 52 bezeichnet werden. Die höheren Güterwerte dieser Stähle werden durch andere Legierungselemente erzielt. Die chemische Analyse war bis vor wenigen Jahren den Lieferwerken freigestellt. Infolge von Schwierigkeiten und Mißerfolgen bei der schweißtechnischen Verarbeitung wurde jedoch im Frühjahr 1937 von der Reichsbahn für ihre Bauwerke und diejenigen der Reichsautobahnen die chemische Zusammensetzung dieser Stähle enger begrenzt¹. Folgende Zusammensetzung darf nach den „Technischen Lieferbedingungen für Baustahl St 52 und Nietstahl St 44“ (918156 vom Januar 1937) nicht überschritten werden: 0,20% C; 0,50% Si; 1,20% Mn; 0,55% Cu. Außerdem ist noch ein zusätzlicher Gehalt von 0,30% Mn oder 0,40% Cr oder 0,20% Mo zulässig.

Folgende drei St 52-Typen sind nach dieser Regelung von der früheren großen Zahl übrig geblieben: 1. Chrom-Kupfer-Stähle, 2. Mangan-Siliziumstähle, 3. Molybdän-Stähle².

Stahlguß wird nach DIN 1681 ebenfalls seinen Güterwerten entsprechend eingeteilt und mit Stg 38, Stg 45, Stg 50, Stg 52 und Stg 60 bezeichnet. Die im Stahlbau gebräuchlichsten Arten sind Stg 38 und Stg 45. Von den Walzstählen überwiegen im Stahlbau bei weitem die beiden Sorten St 37 und St 52. Zahlentafel I enthält die verlangten Güterwerte für St 37, St 52, Stg 38 und Stg 45. Hinsichtlich der Erzeugung des Stahles wird auf den Abschnitt von Prof. DIEPSCHLAG verwiesen.

Zahlentafel I.

	St 37	St 52		
		bis 18 mm	18 bis 30 mm	> 30 bis ≤ 50 mm
Zugfestigkeit (kg/mm ²) . . .	37—45	52—62	52—64	52—64
Streckgrenze (kg/mm ²) . . .	20—31	≥ 36	≥ 35	≥ 34
Bruchdehnung δ ₅ (%) . . .	≥ 25	—	—	—
δ ₁₀ (%) . . .	32—20	längs 20 quer 18	längs 19 quer 17	längs 18 quer 16
Brinellhärte H _n	100—130	—	—	—
	Stg 38	Stg 45		
Zugfestigkeit (kg/mm ²) . . .	≥ 38	≥ 45		
Bruchdehnung δ ₅ (%) . . .	≥ 20	≥ 16		

¹ KLÖPPEL, K.: Schweißtechnik im Stahlbrückenbau. Stahlbaukalender 1938, S. 417.

² KOMMERELL, O.: Die neuen Lieferbedingungen für St 52 als Folge neuerer Versuche und Erfahrungen. Stahlbau 1938, S. 49.

B. Kurze Einführung in die Metallographie.

Der als Flußstahl bezeichnete Baustahl wird stets in flüssigem Zustande im Siemens-Martin-Ofen, der Bessemer- oder Thomasbirne oder im Elektroofen erzeugt. Bei der Erstarrung in den Kokillen bilden sich infolge der von außen nach innen fortschreitenden Abkühlung stengelförmige Kristalle aus. Durch den anschließenden Walzprozeß wird die Form der Kristalle umgewandelt. Der Verformungsmechanismus kristalliner Stoffe bewirkt eine Gleichrichtung. Sie ordnen sich zeilenförmig an. Diese Umformung des Stahles führt zu einem sehnigen Gefüge. An geschliffenen, polierten und mit geeigneten Mitteln geätzten Probestücken kann die Zeilenstruktur gut sichtbar gemacht werden. Bei entsprechender Vergrößerung sind unter dem Mikroskop ferner die einzelnen Gefügebestandteile zu erkennen.

Die Deutung des Gefüges setzt die Kenntnis des Eisen-Kohlenstoff-Schaubildes voraus (siehe Abb. 6, S. 18). Dieses stellt die Umwandlungen des Eisens in der Wärme in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt dar¹. Auf der Senkrechten (Ordinate) werden die Temperaturen aufgetragen, auf der Waagerechten (Abszisse) die Kohlenstoff- bzw. Eisenkarbidgehalte. Eisenkarbid ist eine chemische Verbindung von Eisen und Kohlenstoff mit der Formel Fe_3C . Eisen und Eisenkarbid (Zementit) sind die beiden Bestandteile der Legierung „Stahl“.

Die im Schaubild eingezeichneten Linienzüge stellen Umwandlungen dieser Zweistofflegierung dar. Oberhalb des ausgezogenen Linienzuges *ABCD* ist alles flüssig. In den Bereichen *CEJB* und *CFD* vollzieht sich die Erstarrung, der Übergang vom flüssigen zum festen Zustand. Nur eine Legierung mit 4,3% C, die dem Punkte *C* entspricht, erstarrt plötzlich bei einer Temperatur von 1145°. Sie besteht nach der Erstarrung aus einem Gemenge von reinem Eisen und Zementit. Das Gefüge heißt Ledeburit. Die Konzentration von 4,3% C mit dem niedrigsten Schmelzpunkt ist ein Eutektikum. Bei übereutektischen Legierungen (rechts vom Punkt *C*) scheidet sich aus der Schmelze zunächst der überschüssige Zementit aus, bis die Schmelze die eutektische Konzentration angenommen hat und als solche erstarrt. Sie bestehen nach der Erstarrung aus einem Gemenge von Zementit und Ledeburit. Auf den möglichen Zerfall einzelner Bestandteile wird bewußt hier nicht eingegangen.

Links vom Punkt *C* verläuft der Erstarrungsvorgang grundsätzlich anders. Die Komponenten bleiben während der Erstarrung und links vom Punkt *E* auch im festen Zustande ineinander gelöst. Es bilden sich sog. Mischkristalle aus. Das Eisen befindet sich in diesem Bereich im γ -Zustand, d. h. es besitzt einen besonderen Gitteraufbau und ist unmagnetisch. Die Gefügeausbildung wird als Austenit bezeichnet. Beim Unterschreiten der Linien *GOS* und *SE* tritt eine Umwandlung ein, indem die feste Lösung in ihre Einzelbestandteile zerfällt. Die Legierung mit 0,9% C (Punkt *S*) hat den niedrigsten Umwandlungspunkt bei 721°. Die feste Lösung zerfällt bei dieser Temperatur in ein Gemenge aus Eisen und Zementit, das als Perlit bezeichnet wird. Die Konzentration von 0,9% C heißt Eutektoid. Bei übereutektoiden Legierungen (rechts vom Punkt *S*) scheidet sich unterhalb der Linie *SE* zunächst der überschüssige Zementit aus. Das Gefüge besteht nach der Umwandlung aus Perlit, der in ein Zementitnetz eingelagert ist. Bei untereutektoiden Legierungen (links vom Punkt *S*) scheidet sich zunächst das überschüssige reine Eisen aus. Es wird als Gefügebestandteil mit Ferrit bezeichnet. Das Eisen befindet sich am α -Zustand und ist magnetisch. Das Gebiet des δ -Eisens oben links kann vernachlässigt werden, da es in der Schweißtechnik keine Rolle spielt.

¹ Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff. Bericht Nr. 180 des Werkstoffausschusses des Vereins deutscher Eisenhüttenleute (Gruppe E, Nr. 580), 2. Aufl. Februar 1937.

Die Baustähle, deren Kohlenstoffgehalt im allgemeinen 0,2% nicht überschreitet, bestehen aus Ferrit und Perlit. Bei stärkerer Vergrößerung löst sich der Perlit in Lamellen aus reinem Eisen und Eisenkarbid auf. Abb. 100 (S. 93) zeigt den Gefügebau aus Ferrit und Perlit in zeilenförmiger Anordnung, wie er für einen Walzstahl bezeichnend ist.

Die durch die Linienzüge des Eisen-Kohlenstoff-Schaubildes dargestellten Umwandlungen treten nur bei ausreichender Abkühlungsgeschwindigkeit ein, so daß genügend Zeit zur Ausbildung eines entsprechenden Gefüges vorhanden ist. Durch schnelle Abkühlung, Abschrecken, kann die Umwandlung ganz oder teilweise unterdrückt werden. Die Unterdrückung wird durch bestimmte Legierungselemente, z. B. Mangan und Nickel, gefördert, so daß sich auch bei langsamerer

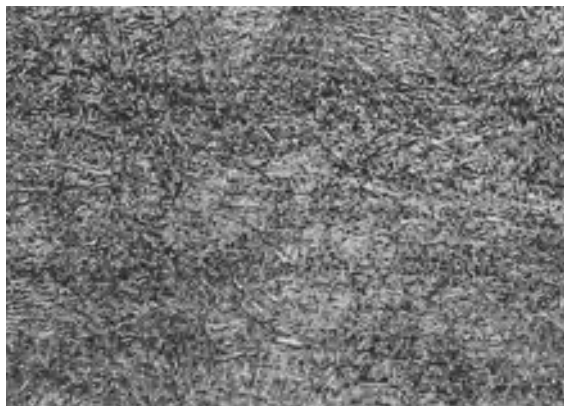


Abb. 1. Martensitisches Gefüge. $V = 100\times$.

Abkühlung Austenit bilden kann. Zwischen dem Austenit und Perlit bestehen Zwischenzustände, die dem Eisen-Kohlenstoff-Schaubild nicht entnommen werden können, das einen Gleichgewichtszustand darstellt. Am bemerkenswertesten ist der Gefügebestandteil Martensit, der sich bei ziemlich starker Abschreckung und geeigneter Zusammensetzung aus dem Austenit bildet. Bezeichnend ist seine nadelige Gefügebildung (Abb. 1), und in mechanischer Hinsicht seine hohe Härte und Sprödigkeit.

Reiner Martensit hat eine Härte von 675 Brinelleinheiten gegenüber Perlit von 175 H_B und Ferrit von nur 45—55 H_B ¹.

Durch erneutes Erwärmen, Anlassen, kann die Härte des Abschreckgefüges wieder je nach Höhe der Anlaßtemperatur gemildert werden. Abschrecken und anschließendes Anlassen wird als Vergüten bezeichnet. Wird beim Erwärmen die Umwandlungslinie *GOSE* nur um 30—60° überschritten, so werden alle Auswirkungen einer vorhergehenden Härtung oder Verarbeitung rückgängig gemacht. Der Werkstoff erscheint nach der Abkühlung feinkörnig. Der Glühvorgang wird als Normalglühen oder Normalisieren bezeichnet. Er ist die wichtigste und weitestgehendste Glühbehandlung überhaupt. Neben der Temperatur (etwa 920° bei Baustählen) ist auch der Glühdauer und den Abkühlungsverhältnissen Beachtung zu schenken. Die Glühdauer richtet sich nach Blechdicke und Zusammensetzung. Die Abkühlung soll in ruhender Luft erfolgen. Auf keinen Fall darf sie verzögert werden, weil dadurch wieder ein Kornwachstum eintritt.

Andere Wärmebehandlungsarten sind Weichglühen und Spannungsfreiglühen. Durch Weichglühen bei etwas über 700° wird die Bearbeitbarkeit verbessert, indem der Perlit in Kugelform übergeht. Durch Glühen bei etwa 600° lösen sich innere Spannungen im Werkstoff aus, da die Streckgrenze auf Null gefallen ist. Die Temperatur des Spannungsfreiglühens ist unabhängig vom Kohlenstoffgehalt. Wird der Stahl längere Zeit in höheren Temperaturbereichen von etwa 1200° gehalten, so bildet sich ein grobes Gefüge aus, das als Überhitzungsgefüge

¹ Werkstoff-Handbuch Stahl und Eisen, 2. Aufl. 1937.

bezeichnet wird. Durch Normalisieren kann es wieder verfeinert werden. Oxydbildung als Folge von Verbrennen ist jedoch durch Glühen nicht rückgängig zu machen.

Neben dem besprochenen, sog. metastabilen System des Eisen-Kohlenstoff-Schaubildes, kann ein stabiles System auftreten, in dem nicht Eisenkarbid, sondern elementarer Kohlenstoff die zweite Legierungskomponente bildet. Dieses System (im Schaubild gestrichelt angedeutet) hat im allgemeinen nur für Gußeisen Bedeutung.

Als Grenze zwischen Stahl und Gußeisen wird der Punkt *E* des Schaubildes (1,7% C) angesehen. Der frühere Unterschied zwischen Stahl und Schmiedeeisen ist weggefallen, weil die Grenze nicht eindeutig festlag. Sämtliche schmiedbaren und härtbaren Eisensorten werden heute als Stahl bezeichnet.

C. Chemische Umsetzungen und Wärmeeinwirkung beim Schweißvorgang.

Der Schweißvorgang ist ein metallurgischer Prozeß. Er kann mit dem Schmelzvorgang bei der Stahlerzeugung verglichen werden. In chemischer Beziehung ist bemerkenswert, daß ein Teil der Eisenbegleiter herausgebrannt wird und daß sich das Schweißgut mehr oder weniger mit Sauerstoff und Stickstoff anreichert. Durch das Herausbrennen der Eisenbegleiter, den Abbrand, wird das Eisen selbst vor der Verbrennung geschützt. In erster Linie werden hiervon — neben dem Kohlenstoff — Mangan, Silizium und etwaige Legierungselemente betroffen. Bezeichnende Unterschiede bestehen in dieser Beziehung zwischen nackten und umhüllten Elektroden, weil bei der Nacktdrahtschweißung der flüssige Werkstoff in unmittelbare Berührung mit dem Sauerstoff und Stickstoff der Luft kommt, bei Verwendung umhüllter Elektroden jedoch durch den Schlackenfluß und einen Gasmantel hiavor geschützt wird.

Bei der Nacktdrahtschweißung verbrennt der größte Teil des Mangangehaltes im Lichtbogen. Auch Silizium verbrennt fast vollständig. Ein Teil des Kohlenstoffes verbrennt zu Kohlenoxyd. Stickstoff wird von der Schweiße aus der Luft aufgenommen. Zum Teil verbindet er sich mit dem Eisen zu Nitriden, zum Teil wird er gelöst. Unter dem Metallmikroskop erscheinen die Nitride als kleine nadelförmige Gebilde. Härte und Festigkeit werden dadurch zwar erhöht, Verformungsvermögen und Kerbschlagzähigkeit jedoch stark herabgesetzt. Stickstoff ist in der Naht daher auf jeden Fall unerwünscht. Auch erhöhte Sauerstoffaufnahme, die zum Verbrennen des Eisens und zur Ablagerung von Oxyden an den Korngrenzen oder als Einschlüsse führt, ist sehr schädlich.

Schwefel muß gebunden und damit unschädlich gemacht werden, weil er sonst mit dem Eisen eine Eutektikum bildet, das sich an den Korngrenzen der Ferritkörner ablagert und wegen seines niedrigen Schmelzpunktes zu Rotbrüchigkeit führt. Zur Bindung dient in erster Linie Mangan, das darum nicht zu stark herausbrennen darf.

Alle diese Vorgänge sind bei Verwendung nackten Drahtes in hohem Maße von der Länge des Lichtbogens abhängig. Je länger der Lichtbogen gehalten wird, um so größer ist die Gefahr der Einwirkung der Atmosphäre. Auch durch zu hohe Stromstärke kann die Gasaufnahme begünstigt werden.

Die wichtigste Aufgabe der Umhüllung besteht neben der Förderung der Elektronenemission und Ionisation des Lichtbogens (d. h. dem Leitendmachen der Luftstrecke) darin, aus verdampfenden und verbrennenden Bestandteilen einen Schutzgasmantel um den Lichtbogen und das Schmelzbad zu bilden. Die übergehenden Werkstofftropfen werden mit einer Schlackenhaut überzogen. Die

Stickstoffaufnahme wird damit praktisch verhindert. Die Kerbschlagzähigkeit von derartigen, mit stark ummantelten Elektroden geschweißten Verbindungen liegt daher um ein Vielfaches höher als bei Verwendung nackten Drahtes. Ebenso ist das Verformungsvermögen wesentlich besser. Auch der Sauerstoff der Luft wird ferngehalten, jedoch kann auch aus der Umhüllung — als Folge ihrer Zusammensetzung — Sauerstoff abgegeben werden. Es wird zwischen neutralen und oxydierenden Umhüllungen unterschieden, die bestimmte Unterschiede in ihren Schweiß Eigenschaften aufweisen. Gern wird die Umhüllung mit Legierungsbestandteilen vermischt, die das Schweißgut auflegieren und seine Eigenschaften verbessern. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß die sich auf der fertigen Schweißnaht ablagernde Schlackenschicht das Schweißgut vor zu starker Wärmeabgabe an die Luft schützt. Diese Wirkung darf jedoch nicht überschätzt werden, da weitaus der größte Teil der Wärme an das umgebende Blech abgegeben wird.

Dünn umhüllte und Seelenelektroden nehmen eine Mittelstellung zwischen der nackten und stark ummantelten ein. Die Eigenschaften des Schweißgutes nähern sich mehr denen von nackten Elektroden.

Im Schweißbad mischen sich Zusatzstoff und der aufgeschmolzene Grundwerkstoff. Die Einwirkung des Grundwerkstoffes ist um so stärker, je mehr er aufgeschmolzen wird, d. h. je tiefer der Einbrand ist. Die Elektrode muß auf den Grundwerkstoff abgestimmt sein. Eine hochwertige Elektrode kann an hochwertigen Baustoffen unbrauchbare Schweißnähte ergeben, wenn diese Forderung nicht erfüllt ist. Anzustreben ist möglichst gleiche chemische Zusammensetzung von Schweiß und Baustoff, obgleich gelegentlich bewußt von dieser Regel abgewichen wird.

Von Bedeutung ist nicht nur die chemische Analyse, sondern in gleichem Maße die Ausbildung des Gefüges, bedingt durch die Wärmeeinwirkung beim Schweißen¹. Der niedergeschmolzene Werkstoff kühlt verhältnismäßig schnell ab. Kohlenstoffgehalt und sonstige Legierungselemente können dadurch Härtungserscheinungen herbeiführen. Die Schweiß selbst hat Gußgefüge. Es entstehen stengelige Gußkristalle, die sich bevorzugt in Richtung des Wärmeflusses senkrecht zu den Abkühlungsflächen ausbilden. Durch die Wärme wird auch der angrenzende Baustoff beeinflusst. Die Zonen, die unmittelbar an die Schweißnaht grenzen, können überhitzt werden, wodurch eine Kornvergrößerung eintritt (Abb. 103, S. 94). Bei weichen Stählen hat diese Überhitzungszone im allgemeinen wenig Bedeutung, bei Stählen höherer Festigkeit kann sie gefährlich werden. An diese Zonen schließen sich in Richtung zum unbeeinflussten Baustoff Zonen an, deren Gefüge normalisiert wurde. Dieses feinkörnige Gefüge geht dann in die Zeilenstruktur des unbeeinflussten Baustoffes über.

Durch Mehrlagenschweißen glühen die oberen Lagen die unteren aus. Auch dieser Vorgang kann im wesentlichen als Normalglühen angesehen werden. Das Gefüge wird dadurch verbessert. Die Glühwirkung kann sich unter Umständen soweit steigern, daß auch der überhitzte Grundwerkstoff am Übergang noch feinkörnig wird. Nur die oberste Schweißlage bleibt grobkörnig. Eine Schweißung in mehreren Lagen ist daher in dieser Beziehung einer Einlagenschweißung mit dicken Elektroden vorzuziehen.

In vielen Fällen, z. B. im Dampfkesselbau, müssen hochwertige Werkstücke nach dem Schweißen einem normalisierenden Glühprozeß unterworfen werden. Nicht immer wird durch Wärmebehandlung eine Verbesserung, besonders der Kerbschlagzähigkeit, gewährleistet. Bei Nacktdrahtschweißungen kann sogar eine Verschlechterung eintreten. Eine ausschlaggebende Rolle spielt hierbei das Verhalten des Stickstoffes.

¹ TEWES, K.: Das Gefügebild der Schweißnaht. Autogene Metallbearb. 32 (1939) H. 2, S. 17 u. H. 3, S. 33.

D. Die Rißgefahr in Abhängigkeit von der Baustoffzusammensetzung.

Im Vordergrund eingehender wissenschaftlicher Untersuchungen stand in den letzten Jahren das schweißtechnische Verhalten des St 52 wegen der hieran mehrfach beobachteten Rißgefahr. Restlos geklärt sind diese überaus schwierigen Fragen noch nicht. Im einzelnen werden folgende Rißerscheinungen unterschieden:

Mit *Schweißnahttrissigkeit* wird das Auftreten von Rissen in den Schweißnähten selbst bezeichnet. Die Risse entstehen teilweise unmittelbar nach der Schweißung bei hohen Temperaturen, teilweise im Gebiet verringerter Formänderungsfähigkeit zwischen 200° und 300° (Blaubruchgebiet). Besonders gefährdet sind die Wurzel-lagen und Kehlnähte. Die Schweißnahttrissigkeit ist bei gegebenem Spannungszustand im wesentlichen von den Eigenschaften des Schweißgutes abhängig.

Bei St 52 handelt es sich meistens um die sog. *Schweißempfindlichkeit*. Sie äußert sich in Rissen, die von Härtungs-zonen ausgehen und weit in den Baustoff hineinreichen können. Die Risse könne unmittelbar nach Beendigung der Schweißarbeit oder bei der ersten Belastung durch äußere Kräfte auftreten. Schweißempfindlichkeit ist die Folge zu harter Übergangszonen in Verbindung mit hohen Spannungen. Hierbei ist die Zusammensetzung des Baustoffes — neben derjenigen der Elektrode und den Schweißbedingungen — von ausschlaggebender Bedeutung. Auch Bauart, Werkstoffdicke und Lage der Naht in der Konstruktion wirken sich hierauf aus.

Mit *Schweißbrissigkeit* werden Rißerscheinungen neben der Naht bezeichnet, die besonders an dünnen Querschnitten von Stählen höherer Festigkeit, z. B. Cr-Mo-Stählen, beobachtet werden. Sie tritt besonders mit zunehmendem C-Gehalt des Stahles auf und wird durch einige unerwünschte Eisenbegleiter (P, S, O_2) begünstigt.

Von großem Einfluß auf sämtliche Rißerscheinungen ist selbst bei gleicher Zusammensetzung die Art der Erschmelzung des Stahles und der Schmelzföhrung^{1, 2, 3}. Wenn somit die Rißgefahr in erster Linie eine Werkstofffrage ist, so spielen doch auch die Schweißbedingungen eine ausschlaggebende Rolle. Zwei Ursachen müssen zusammentreffen: Auftreten höherer Spannungen oder Spannungsspitzen und Ausbildung eines spröden Gefüges, das den Spannungen nicht durch entsprechende Formänderung nachgeben kann. Beide Ursachen lassen sich bei einem gegebenem Werkstoff durch die Schweißbedingungen in der Regel beherrschen. (Hinsichtlich der Schrumpfspannungen und der dabei auftretenden

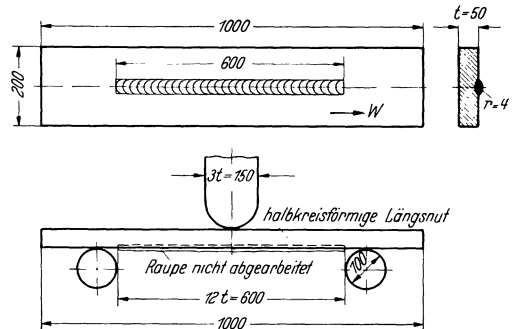


Abb. 2.
Biegeprobe zur Prüfung der Schweißempfindlichkeit.

¹ ZEYEN, K. L.: Zur Frage der Schweißempfindlichkeit. Techn. Mitt. Krupp Bd. 4 (1936) H. 4, S. 115; Z. VDI Bd. 80 (1936) Nr. 32, S. 969.

² BARDENHEUER, P. u. W. BOTTENBERG: Die Schweißbrissigkeit von Chrom-Molybdän-Stählen. Arch. Eisenhüttenw. Bd. 11 (1938) H. 8, S. 375.

³ EILENDER, W. u. R. PRIBYL: Zur Frage der Schweißempfindlichkeit von Chrom-Molybdän-Stählen. Arch. Eisenhüttenw. Bd. 11 (1938) H. 9, S. 443.

Gesetzmäßigkeiten wird auf den Abschnitt von Prof. Dr. BIERETT verwiesen.)
In erster Linie ist die Abkühlungsgeschwindigkeit für die Gefügeausbildung

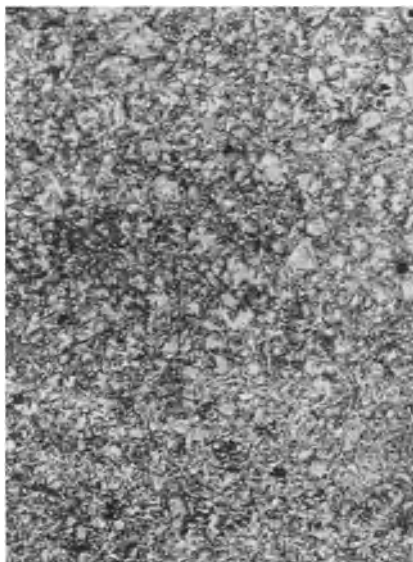


Abb. 3 b.



Abb. 3 d.

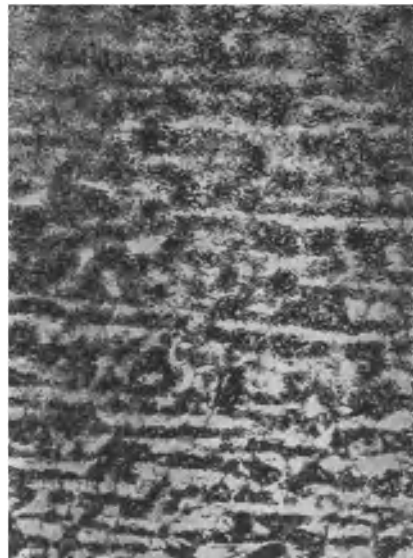


Abb. 3 a.

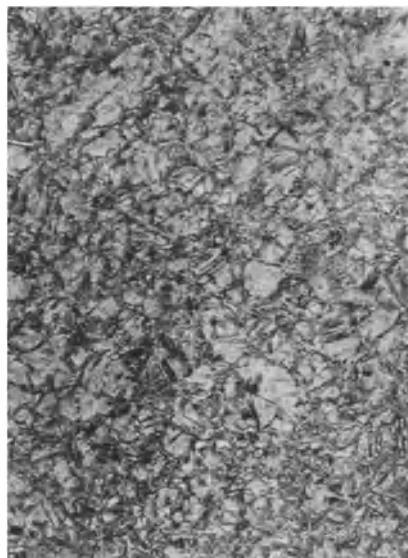


Abb. 3 c.

Abb. 3 a bis d. St 52 Mn-Cu 50 mm dick bei 20° C geschweißt. 105 kg/cm² Zugfestigkeit in der gehärteten Zone.

maßgebend. Schroffe Abkühlung ist stets zu vermeiden, wenn nötig, durch besondere Wärmemaßnahmen, da sie zur Versprödung führt. Hierdurch wird gleichzeitig die Ausbildung hoher Spannungsspitzen verhindert. Größere Schrumpfungen und — wenn die Werkstücke in ihrer Beweglichkeit behindert sind — stärkere Verspannungen müssen dabei in Kauf genommen werden.

Die Abkühlungsgeschwindigkeit ist eine Funktion der Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes, der Größe und der Abmessungen des Werkstückes und der Tem-

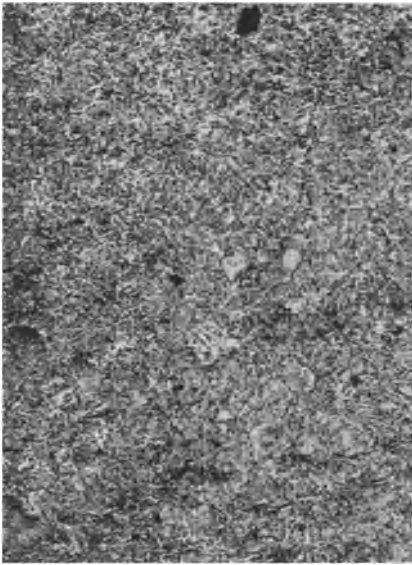


Abb. 4 b.

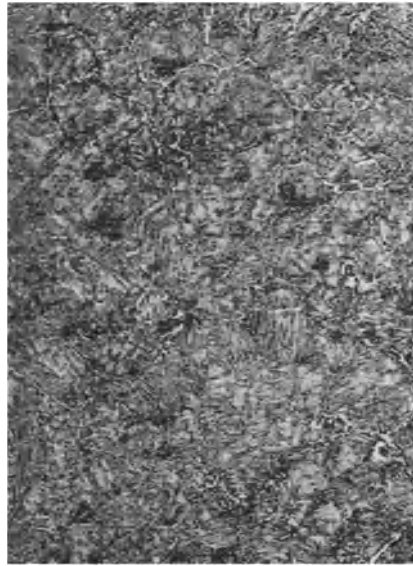


Abb. 4 d.



Abb. 4 a.



Abb. 4 c.

Abb. 4 a bis d. St 52 Mn-Cu 50 mm dick bei 200° C geschweißt, 87 kg/cm² Zugfestigkeit in der gehärteten Zone.

peratur des Werkstückes zu Beginn der Schweißung¹. Die während des Schweißens zugeführte Wärmemenge hängt von der Elektrodendicke, der Stromstärke und der Schweißgeschwindigkeit ab. Alle Faktoren sind so aufeinander abzustimmen,

¹ WERNER, O.: Über den Zusammenhang zwischen Stahleigenschaften und Schweißbarkeit von Stählen. Elektroschweißg Bd. 10 (1939) H. 4, S. 61.

Zahlentafel 2. Versuche an ungehärteten und gehärteten langen Proportional-

	St 34 16 mm-Blech				St 37 16 mm-Blech			
	ungehärtet		gehärtet		ungehärtet		gehärtet	
	längs	quer	längs	quer	längs	quer	längs	quer
Zugfestigkeit kg/mm ² .	41,0	41,5	52,5	49,0	43,1	42,9	57,2	53,9
Streckgrenze kg/mm ² .	32,4	30,4	44,6	40,7	31,4	32,8	48,6	46,4
Dehnung δ_{10} (%) . . .	27,3	25,7	24,7	25,8	26,6	25,9	26,6	24,5
Einschnürung in % . . .	63,9	61,6	60,0	61,0	53,9	52,2	57,0	54,0
Analyse: C					0,17%			
Si					—			
Mn					0,4%			
P					0,02%			
S					0,04%			
Cu					—			

daß einerseits durch zu schroffe Abkühlung Härtung und Rißgefahr, andererseits bei zu starker Wärmezufuhr hohe Schrumpfung und Verspannung sowie dadurch bedingte Nahttrissigkeit vermieden werden¹. Besonders gewarnt werden muß vor der Verwendung zu dünner Elektroden an dicken Werkstücken, wie sie früher gern zum Schweißen der Wurzellagen gewählt und zum Teil sogar vorgeschrieben wurden.

Über die Entstehung der verschiedenen Rißerscheinungen und ihre physikalische Erklärung sind die Meinungen der Forscher noch uneinheitlich. Eine Erklärung der Schweißnahttrissigkeit (Warmrisse) wird in der Aufspaltung der Korngrenzen durch Wasserstoff gesucht². Gefördert wird die Erscheinung oft durch schlechten Wurzeleinbrand. Risse im Blech sind auf die Bildung von Martensitnestern zurückzuführen. Da Warmrisse fast nur bei dick ummantelten Elektroden auftreten, wird als weitere Erklärung eine Störung des Kristallisationsgefüges bei der Erstarrung angesehen³. Bei mit Schmelzmantelelektroden geschweißten Hohlkehlnähten bilden sich zwei Erstarrungszentren. Damit erklärt sich zwanglos die stärkere Rißanfälligkeit gegenüber nacktem und Seelendraht. Unterschiedliche Wärmeausdehnung wird durch unsymmetrischen Wärmefluß, der besonders bei Kehlnahtschweißungen auftritt, bedingt. Die dadurch entstehenden Schubspannungen müssen von der erstarrenden Naht aufgenommen werden.

Durch weitere Versuche konnte nachgewiesen werden, daß eine Anreicherung der Schweißnähte mit Schwefel die Schweißnahttrissigkeit stark begünstigt⁴. Der Art der Umhüllung ist weiter ein wesentlicher Einfluß zuzuschreiben. Risse treten vorzugsweise an Kehlnähten auf, die mit dünnflüssigen Elektroden hergestellt werden und die eine ebene oder sogar konkave Form haben. Ein Zusammenhang zwischen der Analyse des Schweißgutes und der Rißanfälligkeit ist nicht festzustellen, da sich Elektroden mit fast gleicher Analyse des Schweißgutes ganz verschieden verhalten.

Bei Verwendung geeigneter Baustoffe und „rißfreier“ Elektroden, sowie durch fachmännische Schweißausführung können heute die gefürchteten Rißerscheinungen vermieden werden. Durch geeignete Abstimmung der Desoxydationsmittel,

¹ BIERETT, G.: Zur Festigkeitsfrage bei der Schweißung festerer Baustähle. Elektroschweißg Bd. 9 (1938) H. 7, S. 121.

² RAPATZ, FR. u. FR. SCHÜTZ: Schweißtechnische Fragen um den Stahl St 52. Stahl u. Eisen Bd. 58 (1938) Nr. 14, S. 378.

³ SEXAUER, W.: Beobachtungen über die Warmrißempfindlichkeit von Schweißnähten. Elektrschweißg Bd. 9 (1938) H. 2, S. 21.

⁴ STEILER, C.: Ursachen der Schweißrissigkeit. Stahl u. Eisen Bd. 58 (1938) Nr. 13, S. 346.

stäben aus St 34, St 37, St 42 und St 52 (Stabdurchmesser 10 mm).

St 42 18 mm-Blech				St 52 12 mm-Blech			
ungehärtet		gehärtet		ungehärtet		gehärtet	
längs	quer	längs	quer	längs	quer	längs	quer
46,7	47,2	90,9	76,5	55,5	55,2	137,2	139,7
33,7	33,6	85,2	68,7	42,2	41,8	—	—
25,4	24,1	25,0	24,0	23,2	20,2	4,9	5,1
56,7	53,1	54,0	55,0	59,8	51,1	28,2	18,5
					0,15%		
					0,46%		
					1,43%		
					0,022%		
					0,026%		
					0,40%		

der Herstellungsverfahren und der Legierungsanteile lassen sich besonders „umwandlungsfreudige“ Stähle herstellen¹. Die Umwandlungsfreudigkeit ist eine Maßzahl für das Umwandlungsbestreben vom Austenit zum Perlit. Je größer sie ist, um so geringer ist die Wahrscheinlichkeit, daß hartes Gefüge und Risse entstehen.

Um die Schweißempfindlichkeit des St 52 und anderer Werkstoffe versuchsmäßig zu erfassen, wurden Biegeproben mit in Rillen ($r=4$ mm) eingeschweißten Längsraupen entwickelt (Abb. 2). Die Aufhärtung des Grundwerkstoffes drückt sich besonders in einer stark verringerten Formänderungsfähigkeit aus². Geringe Biegewinkel sind Maßzahlen für hohe Schweißempfindlichkeit.

Mehr als bisher sollte auch im Stahlbau das Ausglühen Eingang finden, um mit Sicherheit jede Rißgefahr an lebenswichtigen Bauwerken aus Stählen höherer Festigkeit auszuschließen. Günstige Ergebnisse sind auch mit der Vorwärmung der zu schweißenden Bauteile auf etwa 200° erzielt worden. Die Vorwärmung kann durch geeignete Brenner oder elektrisch vorgenommen werden. Betriebliche Schwierigkeiten und erhöhte Kosten stehen dem jedoch in vielen Fällen entgegen.

Der Einfluß der Vorwärmung wurde durch Versuche zahlenmäßig ermittelt. Die Versuchsstücke wurden jedoch nicht durch Brenner, sondern im Ölbad vorgewärmt. Gewählt wurde St 52 der Type Mn-Cu mit folgender Analyse:

0,23% C; 0,47% Si; 1,32% Mn; 0,035% P; 0,04% S und 0,28% Cu. Es wurden auf 200 mm breite Platten von 20 bzw. 50 mm Dicke, die mit Nuten von $r=4$ mm in der Mitte versehen waren, Schweißraupen mit 5 mm dicken Mantel-elektroden bei Raumtemperatur aufgetragen.

Während die rechnerische Zugfestigkeit der vorher normalgeglühten Platten, ermittelt aus der Brinellhärte, vor dem Schweißen zwischen 54 und 64 kg/mm² schwankt, stieg diese nach dem Schweißen in der Übergangszone an der 20 mm dicken Platte auf etwa 95 kg/mm², an der 50 mm dicken Platte sogar auf 105 kg/mm².

Ein weiterer Versuch, bei dem die Platten auf 200° im Ölbad angewärmt wurden, ergab wesentlich niedrigere Werte, nämlich 81 bzw. 87 kg/mm² Zugfestigkeit.

Die Abb. 3 und 4 zeigen in lückenloser Folge das Gefüge von der Schweißse bis zum unbeeinflussten Baustoff an den bei 20 bzw. 200° geschweißten 50 mm dicken Platten. Der Gefügeunterschied ist beträchtlich.

¹ Siehe S. 29, Fußnote 1.

² BIERETT, G. u. W. STEIN: Prüfung der Schweißempfindlichkeit des Baustahles St 52 an Biegeproben mit Längsraupen. Stahl u. Eisen Bd. 58 (1938) Nr. 16, S. 427.

Alle üblichen Baustahlsorten lassen sich bis zu einem gewissem Grade durch Erhitzen und Abschrecken härten. Zahlentafel 2 zeigt das Ergebnis von Versuchen, bei denen Stähle aus St 34, St 37 und St 52 auf $\sim 950^\circ$ erhitzt und in Wasser abgeschreckt wurden.

Die Versuche lassen erkennen, daß bei St 34 und St 37 die Festigkeit durch Abschrecken auf etwa $50\text{--}57\text{ kg/mm}^2$, die Streckgrenze auf $40\text{--}48\text{ kg/mm}^2$ erhöht werden kann. Dehnung und Einschnürung verändern sich aber praktisch nicht, so daß diese Stahlsorten ihre guten Eigenschaften auch bei einer derartigen Wärmemißhandlung, wie sie beim Schweißen nicht vorkommt, behalten.

Bei St 42 ist der Anstieg der Zugfestigkeits- und Streckgrenzenwerte schon wesentlich höher, er beträgt rund 100%. Die Werte für die Dehnung und Einschnürung sind aber unverändert geblieben.

Anders liegen die Verhältnisse bei St 52. Hier ist die Zugfestigkeit auf etwa das $2\frac{1}{2}$ -fache angestiegen. Eine Streckgrenze konnte überhaupt nicht mehr ermittelt werden, und die Dehnungs- und Einschnürungswerte erfahren eine sehr starke Verminderung. Ein Schlibbild aus diesem gehärteten Stahl zeigt Abb. 1. Wenn auch mit einer derartigen Abschreckung und Aufhärtung beim praktischen Schweißen nicht gerechnet zu werden braucht, so geben doch die bei diesen Versuchen erzielten Werte einen guten Anhalt für die beim Schweißen möglichen Verhältnisse.

St 37 kann als praktisch unempfindlich gegen Härtung angesehen werden, während für St 52 bei einer Steigerung der Zugfestigkeit in der Aufhärtungszone auf etwa 100 kg/mm^2 mit einer Verminderung der Dehnung von ursprünglich 20 bis 25% auf etwa 10% zu rechnen ist. Dadurch ergibt sich eine starke Bruchanfälligkeit dieser Stahlsorte. Im Vorwärmen sowie in der Verwendung schwächerer Querschnitte hat man aber ein Mittel, diese Aufhärtung wesentlich zu vermindern. Hinsichtlich der in der Praxis gemachten Erfahrungen beim Schweißen von St 52 wird auf das umfangreiche Schrifttum verwiesen¹.

¹ Erfahrungen mit Stahl St 52 unter besonderer Berücksichtigung seiner Eignung für das Schweißen von Stahlbauten. Berlin: Wilhelm Ernst u. Sohn 1939. (Zusammenstellung von Aufsätzen von G. SCHAPER, K. SCHAECHTERLE, R. WASMUHT und O. KOMMERELL in der Bautechnik, 1938 und 1939.)

Grundlagen des Schweißens.

Von Dr.-Ing. C. STIELER, Wittenberge.

I. Übersicht über die Schweißverfahren.

A. Begriff des Schweißens.

Der Fachausschuß für Schweißtechnik im Verein deutscher Ingenieure hat den Begriff des Schweißens wie folgt umrissen: „Unter Schweißen wird eine Vereinigung von metallischen Werkstücken gleichen oder ähnlichen Werkstoffes unter Zuführung von Wärme verstanden derart, daß die Verbindungsstelle mit den anschließenden Teilen ein möglichst gleichwertiges Ganzes bildet.“

B. Arten des Schweißens.

Man teilt die Schweißverfahren in 2 Hauptarten ein:

1. *Preßschweißung*. 2. *Schmelzschweißung*.

Bei der *Preßschweißung* werden die Werkstücke in teigigem Zustande unter Druck miteinander vereinigt. Folgende Verfahren sind üblich:

- a) Hammerschweißung (Wärmequelle: Koksfeuer oder Wassergas);
- b) elektrische Widerstandsschweißung (Wärmequelle: elektrischer Strom);
- c) Thermitpreßschweißung (Wärmequelle: Verbrennung des Aluminiums aus einem Gemisch von Aluminium und Eisenoxyd).

Bei der *Schmelzschweißung* werden die Werkstücke bei flüssigem Zustande der Schweißstelle in der Regel ohne Druck miteinander vereinigt, wobei meistens Werkstoff gleicher oder ähnlicher Zusammensetzung hinzugefügt wird. Folgende Verfahren sind üblich:

- a) Gießschweißung (Wärmequelle: Wärmegehalt des hinzugegossenen flüssigen Eisens);
- b) Elektroschmelzschweißung (Wärmequelle: Hitze des elektrischen Lichtbogens);
- c) Gasschmelzschweißung (Wärmequelle: Hitze der Schweißflamme);
- d) gaselektrische Schweißung (Wärmequelle: Hitze des elektrischen Lichtbogens und unter Umständen einer Gasflamme);
- e) Thermiterschmelzschweißung (Wärmequelle: Verbrennung des Aluminiums aus einem Gemisch von Aluminium und Eisenoxyd).

C. Grundsätzliches über die einzelnen Schweißverfahren.

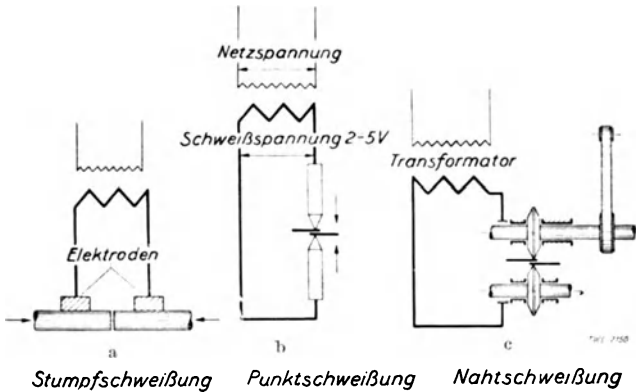
1. Preßschweißung.

a) **Hammerschweißung.** Seit uralten Zeiten ist die *Hammerschweißung* (Feuerschweißung) bekannt, bei der im Schmiedefeuere die Werkstücke auf Schweißhitze erwärmt und dann unter dem Hammer zusammengeschweißt werden. Dieses Verfahren ist bei Stahl, Kupfer, Aluminium und anderen Metallen, nicht aber bei

Gußeisen anwendbar. Es wird nur noch wenig ausgeübt, da es sehr kostspielig und nur bei sorgfältiger Ausführung zuverlässig ist.

Ein neueres Verfahren ist die *Wassergasschweißung*.

Hierbei werden die Werkstücke durch die Flamme des Wassergases, das in besonderen mit Koks oder Anthrazit unter Zusatz von Wasserdampf beschickten Erzeugern hergestellt wird, erhitzt und dann durch Hämmern oder Pressen vereinigt. Das Verfahren ist ein Sonderverfahren, das hauptsächlich bei der Herstellung von Stahlrohren bis zu einer Wanddicke von etwa 100 mm angewendet wird. Die auf diese Weise hergestellten Schweißverbindungen sind von hoher Güte.



Stumpfschweißung Punktschweißung Nahtschweißung

Abb. 1a bis c. Schema der elektrischen Widerstandsschweißverfahren.

b) Elektrische Widerstandsschweißung. Die elektrische *Widerstandsschweißung* gehört zu den neuzeitlichen Schweißverfahren und erobert sich immer neue Anwendungsgebiete. Sie ist bei fast allen Metallen und Metallegierungen anwendbar, jedoch nicht bei Gußeisen.

Bei diesem Verfahren wird die Eigenschaft des elektrischen Stromes, Leiter, die ihm einen Widerstand beim Durchgang entgegensetzen, zu erhitzen, zum Schweißen nutzbar gemacht. Es werden sehr große Stromstärken (bis zu 100000 A) bei meist sehr geringer Spannung (0,5—30 V) benutzt. Derartige Ströme lassen sich am einfachsten mit Hilfe von Umspannern erzeugen. Es wird deshalb für die elektrische Widerstandsschweißung fast ausschließlich Wechselstrom verwendet. Grundsätzlich unterscheidet man drei Verfahren:

1. *Stumpfschweißung*.
2. *Punkt- und*
3. *Nahtschweißung* (Abb. 1).

Stumpfschweißung. Stumpfschweißungen können auf zwei Arten hergestellt werden, als *Druckschweißungen* sowie als *Abschmelzschweißungen*. Für beide Arten werden die gleichen Maschinen verwendet.

Bei dem *Druckschweißverfahren* werden die beiden zu verschweißenden Werkstücke (z. B. Vierkant-, Rund- oder Flachstahlstücke) auf beiden Seiten in wassergekühlte Klemmbacken fest eingespannt und dann gegeneinander gedrückt. Wird dann der elektrische Strom eingeschaltet, so findet dieser an der Berührungsstelle der beiden Stücke den größten Widerstand und erhitzt deshalb diese Stelle. Sobald Schweißhitze erreicht ist, werden die Stücke kräftig zusammengedrückt, so daß sie miteinander verschweißt werden.

Es bildet sich hierbei ein dicker Wulst (Abb. 2a), dessen Entfernung, soweit diese erforderlich ist, meist eine Bearbeitung mit spanabhebenden Werkzeugen

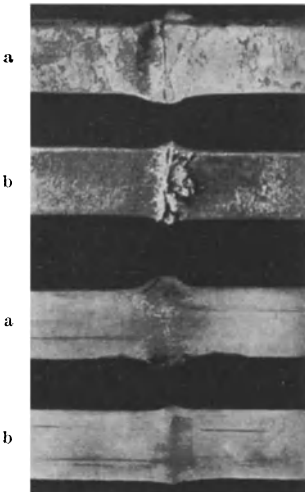


Abb. 2. Widerstandsschweißung (Ansichten und Gefügebilder).
a Druckschweißung,
b Abschmelzschweißung.

notwendig macht. Voraussetzung für ein Gelingen der Schweißung ist eine gute Vorbereitung der Schweißstellen, die möglichst genau aufeinander passen müssen, sowie, daß die zu verschweißenden Querschnitte möglichst gedrunken sind. In neuerer Zeit wird das Verfahren nur noch in Sonderfällen angewendet.

Allgemein gebräuchlich ist seit den letzten Jahren das *Abschmelzverfahren*. Bei dieser Schweißart werden die Stücke nicht aneinander gedrückt, sondern man läßt sie sich nur leicht berühren, sobald der Strom eingeschaltet ist. Es bilden sich dann Funken zwischen den Stücken, die fortwährend hin- und herbewegt werden. Dadurch wird erreicht, daß der Strom sich immer mehr über die Berührungsflächen ausbreitet. Auf diese Weise werden die Berührungsflächen glatt geschmolzen und so erhitzt, daß der eigentliche Abschmelz- oder Abbrennvorgang eingeleitet werden kann. Die Werkstücke werden dabei gegeneinander geschoben und brennen unter kräftigem Funkensprühen ab. Dann werden sie schlagartig zusammengestaucht, wodurch die Schweißung vollzogen wird. Bei diesem Zusammenstauchen werden alle flüssigen oder verbrannten Teilchen herausgeschleudert.

Es bildet sich dabei ein scharfer Grat (Abb. 2b), der leicht entfernt werden kann. Mit diesem Verfahren können sehr hochwertige Schweißungen hergestellt werden, deren Güte bei einwandfreier Arbeitsausführung dem ungeschweißten Baustoff in nichts nachsteht.

Die Verwendung von halb- oder ganzselbsttätigen Maschinen, wie sie in den letzten Jahren gebaut wurden, ermöglicht es, bei der Einzel- wie bei der Massenfertigung stets gleichmäßig gute Verbindungen herzustellen.

Im Gegensatz zum Druckschweißverfahren braucht man bei Anwendung des Abschmelzverfahrens die Schweißstellen nicht so sorgfältig vorzubereiten, da diese während des Arbeitsvorganges glattgeschmolzen werden, auch lassen sich auf diese Weise schwierige Querschnitte, wie z. B. Rohre oder Bleche, verschweißen. Die größten, bisher gebauten Maschinen ermöglichen es, Stücke bis zu 25000 mm² Querschnitt zu verschweißen.

Punktschweißung. Mit Hilfe der *Punktschweißung* können im allgemeinen Bleche bis zu einer Dicke von etwa 2×5 mm (Grenzwert 2×20 mm bei Stahl) miteinander verschweißt werden. Auch das Verschweißen mehrerer Lagen dünner Bleche ist möglich. Gewöhnlich werden die einzelnen Bleche überlappt aufeinander gelegt und so verschweißt (Abb. 1b). Die wassergekühlten, aus Kupfer oder Sonderlegierungen bestehenden Elektroden werden fest angepreßt und dann ein Strom geringer Spannung, aber großer Stärke hindurchgeleitet. An der Druckstelle werden die Bleche flüssig oder teigig und verschweißen miteinander. Da nur einzelne Punkte verschweißt werden, so weist das Punktschweißen eine gewisse Ähnlichkeit mit dem Nieten auf. Liegen die Punkte sehr nahe nebeneinander, so können auch dichte Schweißverbindungen hergestellt werden.

Es werden ortsfeste, wie auch ortsbewegliche Geräte benutzt. Die letzteren, wie z. B. Punktschweißzangen, Spreiz- und Stoßeletroden, ermöglichen vielleicht auch eine Anwendung der Punktschweißung im Stahlbau. Durch die Verwendung von selbsttätigen Maschinen kann auch bei der Punktschweißung die Güte der Schweißungen erhöht und gleichbleibend innegehalten werden.

Sollen die Schweißverbindungen gas-, wasser- oder öldicht sein, so ist das *Nahtschweißverfahren* anzuwenden (Abb. 1c). Die Elektroden sind dazu in der Regel als Rollen ausgebildet. Zwischen diesen Rollen wird das Werkstück hindurchgezogen. Je nachdem, ob der Strom ununterbrochen eingeschaltet oder zeitweise unterbrochen wird, oder ob die Stücke gleichmäßig oder ruckweise bewegt werden, werden einzelne Schweißpunkte mehr oder weniger eng aneinander gereiht, oder es entsteht eine ununterbrochene Schweißung.

c) **Thermitpreßschweißung.** Wird ein Gemisch von Aluminium und Eisenoxyd („*Thermit*“) auf 1000°C erhitzt, so entzündet es sich und entwickelt dabei eine Hitze von etwa 3000°C , wobei das Eisenoxyd zu flüssigem Stahl reduziert und flüssige Schlacke abgesetzt wird. Diese große Hitze kann dazu verwendet werden, um zwei Werkstücke, die stumpf miteinander verschweißt werden sollen, auf Schweißhitze zu bringen, worauf sie unter Druck, ähnlich wie bei einer Stumpfschweißmaschine, miteinander vereinigt werden können. Das Verfahren wird in erster Linie zum Verschweißen von Eisenbahn- und Straßenbahnschienen angewendet.

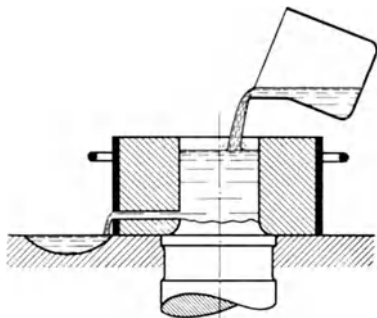


Abb. 3. Gießschweißen von Gußeisen.

Schadstelle aufgeschmolzen ist. Nunmehr wird die Öffnung verschlossen und die ganze Form mit flüssigem Eisen gefüllt. Für den Stahlbau hat dieses Verfahren keine Bedeutung.

b) **Elektroschmelzschweißung.** Wird ein *Lichtbogen* zwischen zwei Polen, die an eine Stromquelle angeschlossen sind, gezogen, so entsteht eine große Hitze. Diese bringt die Pole, wenn sie aus Metallen, wie z. B. Stahl, Gußeisen, Kupfer,

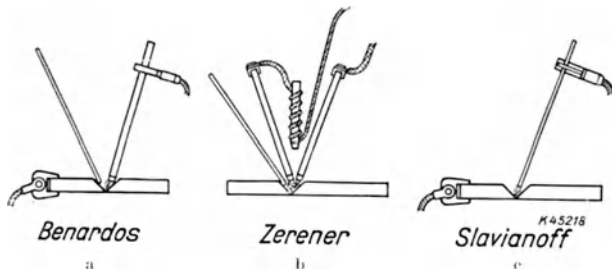


Abb. 4a bis c. Lichtbogenschweißverfahren.

Bronze oder Aluminium bestehen, an der Ansatzstelle des Lichtbogens zum Schmelzen. Auf diese Weise kann geschweißt werden, wobei 3 Verfahren zu unterscheiden sind (Abb. 4).

BENARDOS meldete schon 1885 das nach ihm benannte Schweißverfahren zum Patent an. Er zog einen Lichtbogen zwischen einer Kohle-

elektrode und dem aus Metall bestehenden Werkstück, wobei beide Teile mit einer Stromquelle verbunden waren. In dem Lichtbogen schmolz er einen aus Stahl bestehenden Zusatzstab ab (Abb. 4a).

Das Verfahren ist hauptsächlich für Auftragsschweißungen an Werkstücken aus Nichteisenmetallen geeignet. In neuerer Zeit wird es aber auch für Verbindungsschweißungen an dünnen Blechen sowie auch im Stahlbau, bei diesem besonders unter Verwendung von selbsttätigen Schweißeinrichtungen, angewendet. Bei dem nach ZERENER benannten Verfahren, das dieser sich 1889 patentieren ließ, wurde der Lichtbogen zwischen zwei Kohlelektroden gezogen (Abb. 4b), das Werkstück führt also in diesem Falle keinen Strom. Durch einen besonderen Elektromagneten wurde der Lichtbogen gegen das Werkstück geblasen und in diesem ein Stahlstab als Zusatzstoff abgeschmolzen. Dieses Verfahren ist heutzutage nicht mehr üblich.

2. Schmelzschweißung.

a) **Gießschweißung.** Das *Gießschweißen* ist hauptsächlich in Eisengießereien üblich. Schadhafte Gußstücke, wie z. B. Walzen mit abgebrochenen Zapfen, werden an der Schadhafte Stelle eingeformt und im Holzkohlenfeuer auf Rotglut erhitzt (Abb. 3). Dann wird flüssiges Eisen aufgegossen, das zunächst durch eine Öffnung am Grunde der Form wieder abfließen kann. Dieses Durchgießen wird solange fortgesetzt, bis die

Das verbreitetste Lichtbogenschweißverfahren ist das 1892 von SLAVIANOFF zum Patentschutz angemeldete Verfahren. Grundsätzlich wird hier ebenso wie bei dem BERNARDOS-Verfahren der Lichtbogen zwischen dem Werkstück und der Elektrode gezogen (Abb. 4c), diese besteht aber hier nicht aus Kohle, sondern aus Metall. Sie dient demnach nicht nur als Träger des Lichtbogens, sondern enthält gleichzeitig den Zusatzwerkstoff.

Das SLAVIANOFF-Verfahren kommt für den Stahlbau in erster Linie in Betracht. Alle anderen Schweißverfahren treten ihm gegenüber auf diesem Gebiete an Bedeutung weit zurück.

c) Gasschmelzschweißung. Von allen Verfahren, mit Hilfe einer Gasflamme zu schweißen, hat die *Azetylen-Sauerstoff-Schweißung* die größte Bedeutung gewonnen. Die anderen Verfahren, bei denen statt Azetylen Leuchtgas, Blaugas, Benzol, Wasserstoff u. a. (teilweise unter Zusatz von Luft statt Sauerstoff) verwendet werden, kommen nur für Werkstoffe mit niedrigem Schmelzpunkt in Frage. Auf dem Gebiet des Stahlschweißens kann kein anderes Gasschweißverfahren mit dem erstgenannten Verfahren in Wettbewerb treten. Die Temperatur der Azetylen-Sauerstoff-Flamme beträgt etwa 3000° C, so daß in ihr alle Zusatzwerkstoffe leicht zum Schmelzen gebracht werden können.

Aus Gründen, die in einem späteren Abschnitt ausführlich erörtert werden, kommt die Azetylen-Sauerstoff-Schweißung für den Stahlbau nur in Ausnahmefällen in Betracht, dagegen ist sie hervorragend geeignet für Schweißarbeiten an dünnen Blechen, wie z. B. im Flugzeugbau, sowie für alle Nichteisenmetalle. Ein Sondergebiet, auf dem sie sich sehr gut bewährt hat, sind Auftragsschweißarbeiten an Eisenbahn- und Straßenbahnschienen.

Für den Bauingenieur besonders wichtig ist aber das *Brennschneide-Verfahren*, das ebenfalls in der Regel mit Hilfe der Azetylen-Sauerstoff-Flamme — in manchen Fällen wird auch statt Azetylen Wasserstoff oder Leuchtgas verwendet — unter Zusatz von weiterem Sauerstoff, dem sog. Schneidsauerstoff, ausgeübt wird.

Hierbei wird durch die Azetylen-Sauerstoff-Flamme das Werkstück auf Zündtemperatur erhitzt und dann der Werkstoff an der Schnittstelle durch den darauf geblasenen Schneidsauerstoff verbrannt. Da dieser gleichzeitig den verbrannten Werkstoff wegbläst, so entsteht ein glatter Schnitt.

Nur die Metalle können ohne weiteres mit dem Brenner geschnitten werden, deren Zündpunkt unterhalb ihres Schmelzpunktes sowie auch unterhalb des Schmelzpunktes ihrer Oxyde liegt. Dies trifft für Stahl zu, nicht aber für Gußeisen, Kupfer, Bronze, Rotguß, Messing und Aluminium. Die größten bisher geschnittenen Werkstoffdicken betragen etwa 800 mm.

Das Brennschneiden ist ein unentbehrliches Mittel für die Schweißnahtvorbereitung geworden. Das Abschrägen der Schweißkanten für V- oder X-Nähte wird fast ausschließlich mit Hilfe dieses Verfahrens ausgeführt.

Brennschnitte können von Hand wie auch mit besonderen Maschinen hergestellt werden. Maschinelle Brennschnitte zeichnen sich durch besonders glatte Flächen aus. Eine Nachbearbeitung der Brennschnitte mit spanabhebenden Werkzeugen erübrigt sich deshalb in vielen Fällen, nicht nur wenn es sich um Schweißkanten handelt.

d) Gaselektrische Schweißung. Eine Mittelstellung zwischen der Elektroschmelzschweißung und der Gasschmelzschweißung nehmen die gaselektrischen Schweißverfahren ein.

Eines dieser Verfahren ist das *Arcogenverfahren*, bei dem über den elektrischen Lichtbogen eine Azetylen-Sauerstoff-Flamme gehalten wird. Dadurch wird die

Hitze des Lichtbogens sowie die der Gasflamme ausgenützt, wobei diese dazu noch den Lichtbogen in einen Schutzgasmantel einhüllt. Das Verfahren hat sich nicht bewährt und wird deshalb heute kaum noch angewendet.

Ein sehr wertvolles Verfahren ist aber das *Arcatomverfahren* nach LANGMUIR. Ähnlich wie bei dem Zenerverfahren wird hierbei der Lichtbogen zwischen zwei Elektroden gezogen, das Werkstück ist also stromlos. Diese Elektroden sollen nur als Träger des Lichtbogens dienen, sie bestehen deshalb aus Wolfram, einem Metall, das der Hitze des Lichtbogens sehr gut standhält. Die Elektroden, denen Wechselstrom zugeleitet wird, befinden sich samt ihren Stromzuleitungen in Düsen, denen Wasserstoff in molekularer Form (H_2) zugeführt wird. In der Hitze des Lichtbogens werden die Moleküle in Atome zerspalten, wobei sie Wärme aufnehmen, die am Rande der hufeisenförmigen Flamme (Abb. 5) wieder abgegeben wird, so daß wieder Wasserstoffmoleküle entstehen. Das Verfahren eignet sich sehr gut zum Verschweißen dünner Bleche bis zu etwa 3 mm. Bei diesen ist es in den meisten Fällen nicht notwendig, Werkstoff zuzusetzen, man kann die stumpf gegeneinander gestoßenen Bleche einfach zusammenschmelzen. Bei dickeren Werkstücken, wie z. B. bei Dampfkesselblechen, müssen geeignete Schweißstäbe in der Flamme abgeschmolzen werden. Im Stahlbau hat dieses Verfahren bis jetzt nur in Sonderfällen Anwendung gefunden.

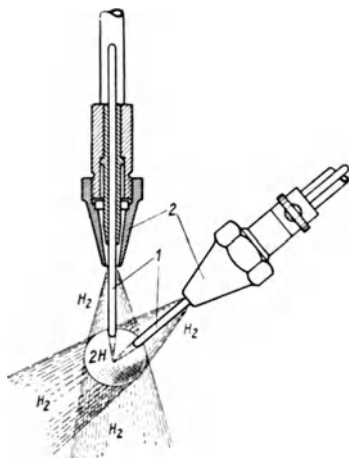


Abb. 5. Arcatom-Schweißverfahren.

e) **Thermitschmelzschweißung.** Der bei der *Thermitreaktion* entstehende flüssige Stahl kann nicht nur zum Anwärmen der Werkstücke auf Schweißhitze verwendet werden, sondern er kann auch gleichzeitig als Zusatzwerkstoff dienen. Bei diesem Verfahren wird kein Druck angewendet, es ist also eine reine Schmelzschweißung. Nicht selten werden auch beide Verfahren die Thermitschmelzschweißung und die Thermitpreßschweißung, im „kombinierten“ Verfahren vereinigt. Für den Stahlbau kommen diese Verfahren zwar wenig in Betracht, wohl aber für das Verschweißen von Eisenbahn- und Straßenbahnschienen.

II. Die elektrische Widerstandsschweißung.

A. Stumpfschweißung.

1. Anwendungsgebiete.

Im *Stumpfschweißverfahren* können Werkstücke gleichen oder ähnlichen Querschnitts an den Berührungsstellen miteinander verschweißt werden, wobei es jedoch nicht unbedingt erforderlich ist, daß sie die gleiche chemische Zusammensetzung haben. So läßt sich z. B. Stahl auch mit Kupfer, Kupfer mit Nickel, Kupfer mit Aluminium usw. verschweißen.

Für den Bauingenieur ist es wichtig, daß die im *Abschmelzverfahren* hergestellten Schweißverbindungen an Stahl auch hinsichtlich der Dauerzugfestigkeit fast die gleichen Eigenschaften aufweisen wie der ungeschweißte Baustoff. Formstähle beliebiger Art, Schienen usw., auch Stücke aus Werkzeugstahl, wie z. B. Bohrer, Schrämmtangen und sogar Rohre bereiten bei der Stumpfschweißung keine Schwierigkeiten.

2. Stumpfschweißmaschinen.

Sämtliche Arten von Stumpfschweißmaschinen werden mit Wechselstrom betrieben, da es große Schwierigkeiten bereiten würde, bei Gleichstrom den erforderlichen Strom von großer Stärke aber niedriger Spannung herzustellen.

Ihr Hauptbestandteil ist deshalb ein Umspanner (Transformator) zur Herabsetzung der Spannung bei gleichzeitiger Erhöhung der Stromstärke.

Die großen Stromstöße bedeuten in schwachen Niederspannungsnetzen eine Störung für andere Stromverbraucher.

Nachteilig ist weiter, daß diese Umspanner die einzelnen Phasen des Drehstromnetzes ungleichmäßig belasten. Sie werden nämlich in der Regel nur an 2 Phasen bzw. an eine Phase und an die Erde angeschlossen. Versuche, durch besondere Schaltungen alle 3 Phasen möglichst gleichmäßig zu belasten, führten bis jetzt noch zu keinem brauchbaren Ergebnis. Bei größeren Netzen werden die ungleichmäßige Belastung und die Stromstöße nur selten Schwierigkeiten bereiten, bei kleineren Netzen ist es aber stets angebracht, vor Aufstellung einer größeren Stumpfschweißmaschine das Elektrizitätswerk zu verständigen.

Bei sehr großen Stumpfschweißmaschinen werden diese Störungen aber auch bei ausgedehnten Netzen so groß, daß ein unmittelbarer Anschluß an das Niederspannungsnetz nicht mehr durchgeführt werden kann. In diesem Falle muß die Maschine über einen Zwischentransformator an das Hochspannungsnetz angeschlossen werden. Meistens ist dieser als Drehstromtransformator in Dreieck-Sternschaltung gebaut mit einer unbelasteten Phase auf der Niederspannungsseite. Die Belastung der drei Phasen des Hochspannungsnetzes ist dann im Verhältnis 1 : 2 : 1.

Der Leistungsfaktor der Stumpfschweißmaschinen beträgt im allgemeinen etwa 0,6—0,8 (besserer Wert bei kleineren Maschinen). Das ist erträglich, so daß es meistens nicht notwendig ist, ihn durch Einbau von Kondensatoren zu verbessern.

Steht kein Drehstrom zur Verfügung, sondern nur Gleichstrom, so muß dieser in Einphasenwechselstrom umgeformt werden. Dies kann entweder mit Hilfe eines Einankerumformers geschehen, einer Maschine, die zugleich Motor und Generator ist, oder mit Hilfe eines Motorgenerators, d. h. eines durch einen Gleichströmmotor angetriebenen Wechselstromgenerators. In beiden Fällen werden die Nachteile des Einphasenwechselstrom-Anschlusses (ungleiche Belastung des Netzes) vermieden.

Den grundsätzlichen Aufbau einer Stumpfschweißmaschine zeigt Abb. 6. Die Ansicht einer Maschine einfacher Bauart ist in Abb. 7 dargestellt. In dem aus Gußeisen oder geschweißtem Stahl bestehenden Gehäuse ist der Umspanner untergebracht, der mit Hilfe eines Fußschalters oberspannungsseitig ein- und ausgeschaltet werden kann. Häufig wird der Umspanner mit Wasser gekühlt, nur bei kleineren Maschinen genügt Luftkühlung. Die Stromstärke wird in der Regel durch Anzapfungen auf der Oberspannungsseite geregelt.

Während die Windungen der Oberspannungsseite aus Kupfer- oder Aluminiumdrähten bestehen, weist die Unterspannungsseite meist nur mehrere zu einer Windung zusammengeschaltete Lappen auf und besteht deshalb aus Kupfer- oder Aluminiumguß oder -blech.

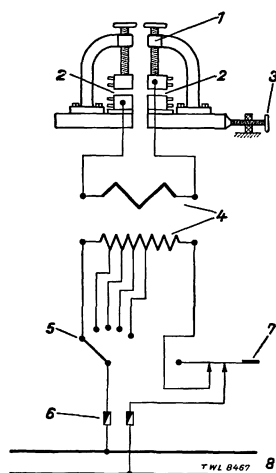


Abb. 6. Aufbau einer elektrischen Stumpfschweißmaschine. 1 Einspannvorrichtung, 2 Schweißbacken, 3 Stauchvorrichtung, 4 Umspanner, 5 Regelschalter, 6 Sicherungen, 7 Fußschalter, 8 Netz.

Auf der Unterspannungsseite wird der Strom den in der Regel aus Kupfer bestehenden, wassergekühlten Einspannbacken zugeführt.

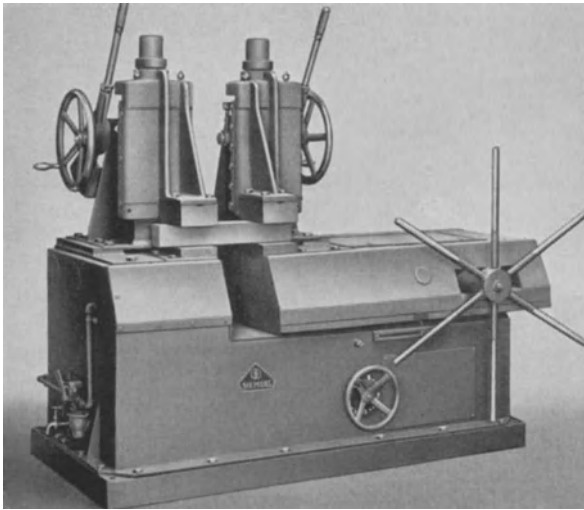


Abb. 7. Ansicht einer Stumpfschweißmaschine.

Diese sind mit der Einspannvorrichtung verbunden, die es ermöglicht, die zu verschweißenden Stücke so fest einzuspannen, daß sie dem Schweißdruck standhalten. Die eine Hälfte der Einspannvorrichtung ist beweglich, da sie während des Schweißens hin- und herbewegt werden muß. Diese Bewegung kann von Hand oder maschinell, bei manchen Maschinen auch selbsttätig vollzogen werden.

Bei kleineren Maschinen werden die Werkstücke von Hand mit Hilfe von Spindeln oder Hebeln festgespannt, bei größeren Maschinen verwendet man mit Preßluft,

Preßwasser oder elektrisch betätigte Einspannvorrichtungen. Die Einspannvorrichtungen müssen natürlich den zu verschweißenden Werkstücken angepaßt sein (Abb. 8).

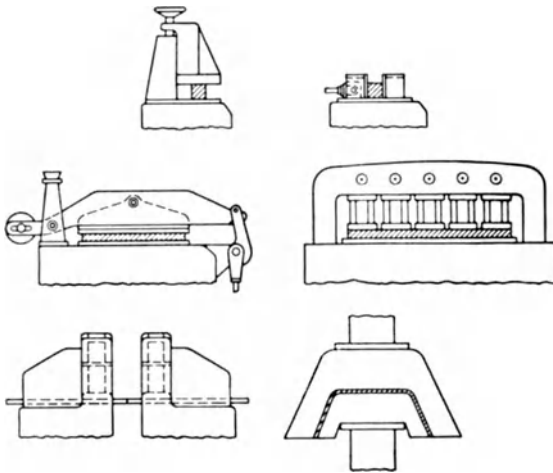


Abb. 8. Anpassung der Einspannbacken von Stumpfschweißmaschinen an die Form der Werkstücke.

Stumpfschweißmaschinen dürfen nicht überlastet werden. Die Angaben der Lieferer über die Leistung beziehen sich in der Regel auf gedrängte Querschnitte (rund oder quadratisch, voll) und offene Längen, sowie auf das Abschmelzverfahren. Sollen flache Querschnitte, wie z. B. Schwellen, verschweißt werden, oder in sich geschlossene Stücke, wie Reifen, so müssen Maschinen von wesentlich größerer elektrischer und mechanischer Leistung verwendet werden, als bei den obengenannten Querschnitten.

Die Anzahl der in einer Stunde zulässigen Schweißungen nimmt mit zunehmendem Querschnitt stark ab (Abb. 9). Es ist

deshalb ratsam, die Maschinen nicht zu klein zu bemessen, da sonst beim Schweißen der Grenzquerschnitte unter Umständen die Fertigung sehr verzögert wird.

Der Preis der Stumpfschweißmaschinen ist nicht unbeträchtlich (Abb. 10). Es muß jedoch berücksichtigt werden, daß die eigentlichen Schweißkosten sehr gering sind, und daß sachgemäß ausgeführte Stumpfschweißungen zu den hochwertigsten Verbindungen gehören.

Stumpfschweißmaschinen für größere Leistungen sind sehr schwer, also nicht ortsbeweglich. Vorschläge, die Maschinen in einzelne, leicht zusammenzubauende Teile zu zerlegen und mit Stromerzeugern auszurüsten, um sie überall verwenden zu können, wie es z. B. für Schienenschweißungen auf der Strecke notwendige wäre, sind noch nicht in die Praxis umgesetzt worden.

3. Stumpfschweißverfahren.

Druckschweißen. Die beiden fest eingespannten Werkstücke, deren Schweißflächen gut aufeinander passen müssen, werden gegeneinander gepreßt, worauf der elektrische Strom eingeschaltet wird. Dieser erhitzt die beiden sich berührenden Enden am stärksten, da ihm dort der größte Widerstand entgegengesetzt wird. Sobald die Enden genügend erhitzt sind, drückt man kräftig nach, worauf sie in teigigem Zustande miteinander verschweißt werden.

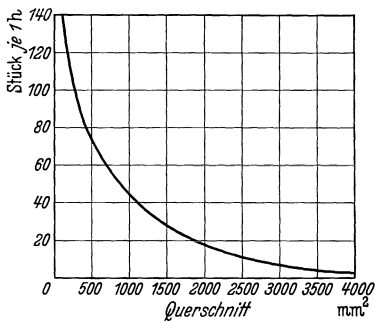


Abb. 9. Zulässige Stückzahl der Schweißungen auf einer Stumpfschweißmaschine bestimmter Größe in Abhängigkeit von den zu verschweißenden Querschnitten.

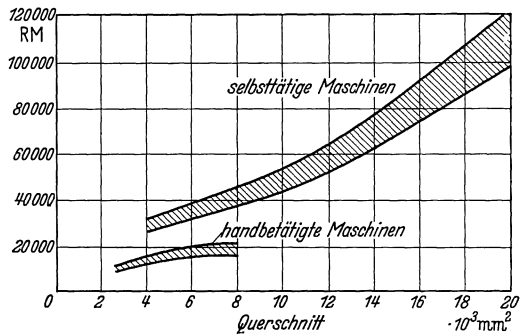


Abb. 10. Preise elektrischer Stumpfschweißmaschinen in Abhängigkeit von den größten auf diesen verschweißbaren Querschnitten.

Wie schon oben erwähnt wurde, wird dieses Verfahren nur noch selten angewendet, und zwar hauptsächlich beim Schweißen von Nichteisenmetallen, wie z. B. von Aluminium, sowie bei Stahl von geringem Querschnitt.

Abschmelzschweißen. Grundsätzlich anders wird bei der Abschmelzschweißung vorgegangen, die heute das bei Stahl fast ausschließlich übliche Verfahren ist. Man unterscheidet hier drei Arbeitsvorgänge: Vorwärmen, Abbrennen, Stauchen. Zum Vorwärmen wird das in die bewegliche Spannvorrichtung eingespannte Werkstück gegen das andere bei eingeschaltetem Strom bewegt, dann wieder zurückgezogen, wobei lebhafte Funken entstehen, durch die die Werkstücke erhitzt werden. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis eine solche Temperatur erreicht ist, daß das Abbrennen erfolgen kann.

Durch das Abbrennen soll die Erwärmung vollends auf den Höhepunkt gebracht, die Wärme über den ganzen Querschnitt gleichmäßig verteilt und die Schweißkanten gereinigt werden. Beim Abbrennen wird die bewegliche Werkstückhälfte rasch vorwärtsgeschoben, bis schließlich das Stauchen folgt, bei dem die Werkstücke unter schlagartigem Druck verschweißt werden.

Da das Abbrennen mit einem Werkstoffverlust verbunden ist, so muß gerade diesem Vorgang besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Allerdings kann man fast ohne Vorwärmung schweißen (Abbrennen aus dem kalten Zustande), dann werden aber die erforderliche elektrische Leistung und der Abbrennverlust sehr groß. Wird andererseits der Abbrennvorgang zu sehr abgekürzt, so werden die Schweißkanten nicht richtig gereinigt.

Die Größe des Längenverlustes beim Abschmelzschweißen von Stahl kann der von E. RIETSCH¹ aufgestellten Abb. 11 entnommen werden. Die dort angegebenen Werte stellen Mittelwerte dar, die mehr oder weniger stark unter- oder überschritten

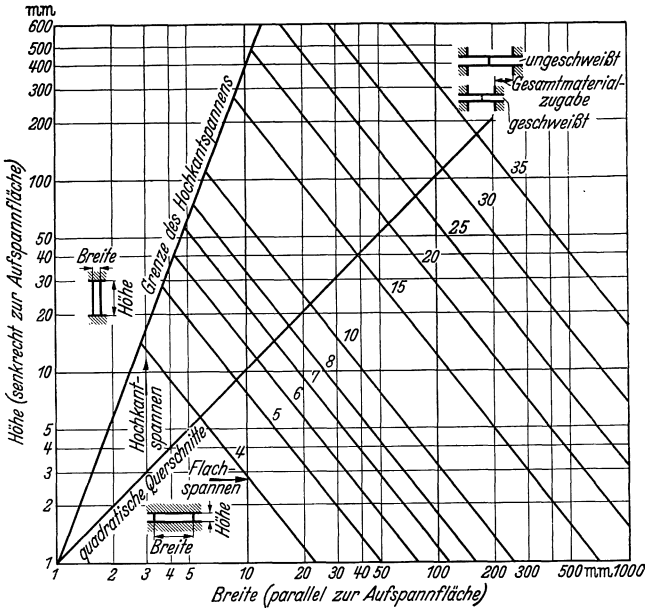


Abb. 11. Längenverluste beim Abschmelzschweißen.

werden können. Die eigentlichen Schweißzeiten sind nicht beträchtlich, wie auch der Stromverbrauch gering ist (Abb. 12 u. 13.)

Das Abschmelzschweißen verlangt vom Schweißer große Aufmerksamkeit und Erfahrung. Man hat deshalb versucht, sich durch Verwendung von besonderen

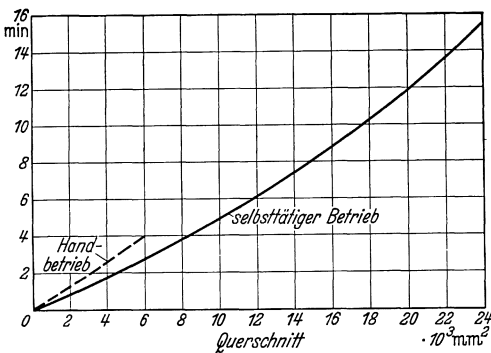


Abb. 12. Schweißzeiten beim Abschmelzschweißen.

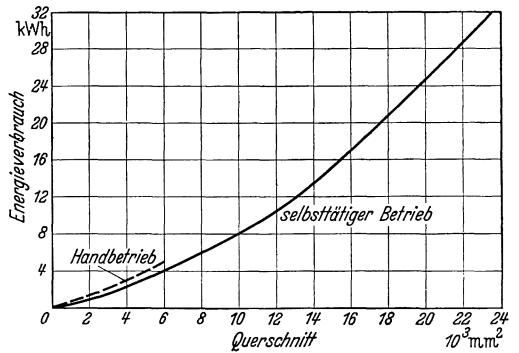


Abb. 13. Stromverbrauch beim Abschmelzschweißen.

Vorrichtungen vom Einfluß des Schweißens unabhängig zu machen. Zu diesem Zweck werden halb- und vollselbsttätige Maschinen gebaut. Bei den halbselbsttätigen Maschinen muß der Schweißer den Vorwärm- und den Abbrennvorgang mit Hilfe eines Handrades steuern, wobei eine Anzeigevorrichtung, die vorher

¹ Elektroschweißg. Bd. 8 (1937) S. 41f.

eingestellt wird, ihm den richtigen Augenblick des Überganges vom Vorwärmen zum Abbrennen anzeigt. Durch die gleiche Vorrichtung wird außerdem, wenn das Abbrennen beendet ist, ein Elektromotor eingeschaltet, der den Stauchdruck erzeugt, worauf der Strom von selbst abgeschaltet wird. Von der richtigen Einstellung der Vorrichtung hängt also die Güte der Arbeitsausführung ab.

Bei vollselbsttätigen Maschinen wird aber auch der Anwärme- und der Abbrennvorgang ebenso wie das Stauchen selbsttätig gesteuert. Zu diesem Zweck sind Relais

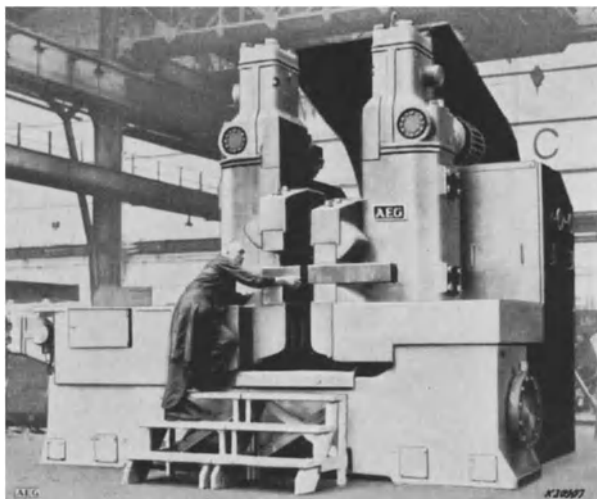


Abb. 14. Vollselbsttätige Stumpfschweißmaschine.

eingebaut, die die Steuerung leiten. Dadurch ist es möglich, besonders bei der Massenfertigung, eine stets gleichbleibende Güte der Schweißverbindungen zu gewährleisten (Abb. 14).

Das Entfernen des beim Abschmelzschweißen entstehenden scharfen Grates bereitet im Gegensatz zu dem beim Druckschweißen entstehenden Wulst keine Schwierigkeit. Besonders im rotwarmen Zustand läßt sich der Grat meist sehr leicht durch Abmeißeln entfernen.

B. Punkt- und Nahtschweißung.

1. Anwendungsgebiete.

Für die Herstellung von Blechwaren aller Art ist die Punkt- und Nahtschweißung ein unentbehrliches Verfahren geworden. Wenn dieses Fertigungsgebiet dem Bauingenieur auch etwas ferne liegt, so seien diese beiden Verfahren doch deshalb hier behandelt, weil auch der Bauingenieur immer mehr zum Leichtbau übergeht, z. B. durch Verwendung von Hohlträgern, bei denen diese Verfahren vielleicht eine große Rolle spielen werden. Außerdem ermöglichen die in letzter Zeit hergestellten Punktschweißzeuge unter Umständen überhaupt eine Anwendung der Punktschweißung im Stahlhoch- und -brückenbau.

Für das Schweißen der Nichteisenmetalle, besonders von Aluminium und Aluminiumlegierungen, haben sich diese Verfahren besonders bewährt. Sie ermöglichen eine rein örtliche, sehr kurz bemessene Erwärmung der Schweißstellen, die eine unerläßliche Voraussetzung dafür ist, daß bei den ausgehärteten Legierungen die Enthärtung durch das Schweißen auf ein Mindestmaß beschränkt bleibt.

2. Punkt- und Nahtschweißmaschinen.

Ebenso wie die Stumpfschweißmaschinen werden auch die Punkt- und Nahtschweißmaschinen in der Regel mit Wechselstrom betrieben. Auch sie besitzen einen Umspanner, durch den die einzelnen Phasen des Drehstromnetzes ungleichmäßig belastet werden. Da aber in den meisten Fällen nicht nur eine Maschine in einer Werkstatt vorhanden ist, sondern mehrere, die dann abwechselnd an die einzelnen Phasen angeschlossen werden können, so werden diese gleichmäßiger belastet als beim Anschluß einer Schweißmaschine. Außerdem kommen auch keine besonders großen Stromstöße vor, da in der Regel kleinere Stöße sehr rasch hintereinander folgen. Anschlußschwierigkeiten mit Punkt- und Nahtschweißmaschinen gibt es deshalb meist nicht.

Bei Gleichstromnetzen muß natürlich auch für diese Maschinen ein Motorgenerator oder Einankerumformer zur Erzeugung des Wechselstromes zwischen Netz und Maschine geschaltet werden.

Den grundsätzlichen Aufbau einer Punktschweißmaschine zeigt Abb. 15, die Ansicht einer derartigen Maschine Abb. 16. In dem aus Gußeisen oder geschweißtem Stahl bestehenden Gehäuse ist der bei größeren Maschinen wassergekühlte Umspanner eingebaut. Dieser wird mit Hilfe eines Fußschalters auf der Oberspannungsseite ein- und ausgeschaltet. Durch Anzapfungen auf dieser Seite wird auch die Stromstärke geregelt.

Auf der Unterspannungsseite wird der Strom den meist verstellbar angeordneten Elektrodenarmen und von diesen aus den wassergekühlten, aus Kupfer oder aus Sonderlegierungen bestehenden Elektroden zugeführt. Einer der Elektrodenarme, in der Regel der obere, ist beweglich und kann mit Hilfe eines Fußhebels gegen den anderen Arm gepreßt werden, so daß das zwischen beide Elektroden gelegte Werkstück fest eingespannt wird. Von der richtigen Bemessung und Dauer des Anpreßdruckes sowie des Schweißstromes hängt die Güte der Schweißung ab. Außerdem spielt auch die Oberfläche der zu verschweißenden Bleche eine Rolle. Blanke Bleche lassen sich besser verschweißen als verzünderte Bleche, doch ist es auch schon gelungen, mit Mennigeanstrich versehene Bleche einwandfrei zusammenzuschweißen.

Bei dickeren Blechen aus Stahl von $2 \times 0,5$ bis 2×5 mm Dicke ist es nicht schwierig, auch mit einfachen Maschinen zufriedenstellende Schweißungen zu erzielen. Sollen jedoch dünnere Bleche sowie Bleche aus Nichteisenmetallen geschweißt werden.

so wachsen die Schwierigkeiten. Für diese Zwecke werden besondere Maschinen gebaut, die den Arbeitsvorgang weitgehend mechanisieren und damit die Güte der Schweißpunkte unabhängig von der Geschicklichkeit des Bedienenden machen.

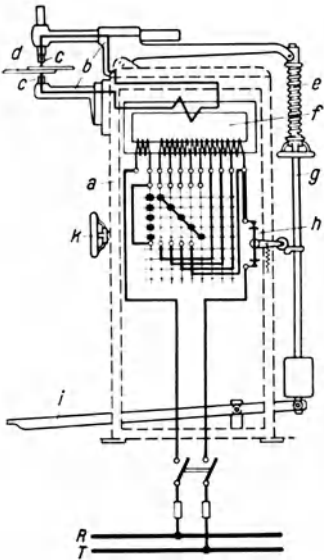


Abb. 15. Aufbau einer Punktschweißmaschine. *a* Gestell, *b* Elektrodenarme, *c* Elektroden, *d* Werkstücke, *e* Druckfeder, *f* Umspanner, *g* Gestänge, *h* Oberspannungsschalter, *i* Fußhebel, *k* Regelschalter.

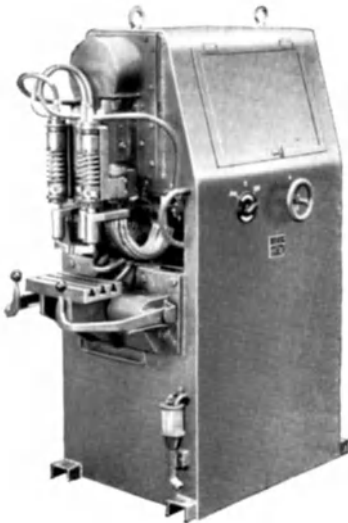


Abb. 16. Punktschweißmaschine.

Schnellpunktschweißmaschinen arbeiten mit großen Stromstärken bei sehr kurzen Schweißzeiten. Elektrische Steuerungen regeln dann die Schaltvorgänge, während ein Elektromotor über eine veränderliche Räderübersetzung die Elektroden taktmäßig anpreßt und wieder abhebt. Besonders wertvoll sind Schweißbegrenzer, die über Relais, Glüh-Kathoden- oder Quecksilberdampf-Gleichrichter-Röhren den Schweißvorgang steuern.

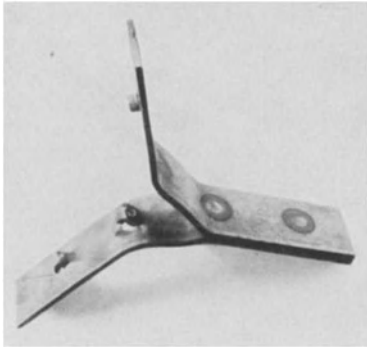


Abb. 17. Punktschweißung an Stahlblech. Zur Prüfung teilweise zerstört.

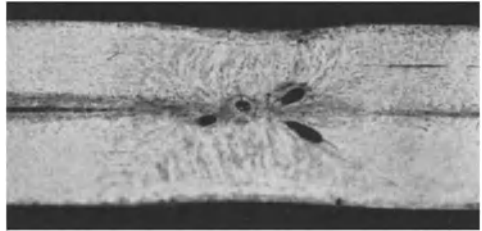


Abb. 18. Schliffbild einer Punktschweißung an Stahlblech (2 × 3 mm).

Bei sehr kurzen Einschaltzeiten, wie sie z. B. für Leichtmetalle notwendig sind, ist die *Stromrichtersteuerung* am Platze. Mit dieser gelingt es, Schweißzeiten bis zu $\frac{1}{1000}$ Sekunde zu schalten, während die geringste Schweißzeit, die mit den obenerwähnten Geräten erzielt werden kann, etwa $\frac{1}{10}$ Sekunde beträgt. Abb. 17 zeigt die Ansicht, Abb. 18 das Schliffbild einer Punktschweißung an Stahlblech.

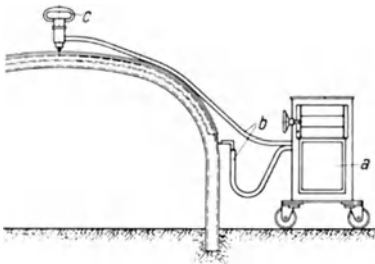


Abb. 19. Stoßelektrode. a Umspanner, b Kabel, c Elektrode.

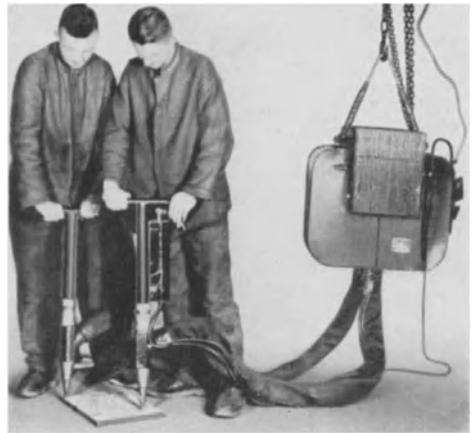


Abb. 20. Stoßelektroden in Pflasterstempel-Anordnung.

Punktschweißmaschinen werden in der Regel als ortsfeste Maschinen gebaut. Dies sowie die beschränkte Länge ihrer Elektrodenarme erschweren ihre Anwendung bei größeren, sperrigen Werkstücken. Aus diesen Gründen hat die Punktschweißung auch bis jetzt im Stahlbau noch wenig Anwendung gefunden.

Die in neuester Zeit hergestellten *Punktschweißzeuge* vermeiden aber diese Nachteile, da sie leicht beweglich sind und teilweise eine sehr weite Ausladung besitzen.

Stoßelektroden (Abb. 19) ermöglichen es, an sonst schwierig zu erreichenden Punkten zu schweißen, da nur von einer Seite aus gearbeitet wird. Allerdings

muß das zu schweißende Stück schon eine gewisse Steifigkeit besitzen, um dem Druck der Elektrode standzuhalten. Eine andere Ausführung zeigt Abb. 20.

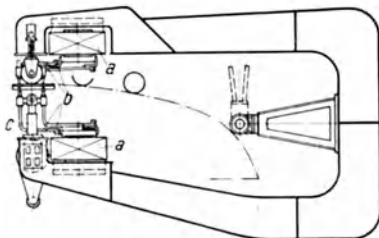


Abb. 21. Punktschweißbügel. *a* Umspanner, *b* wassergekühlte Leitung, *c* Druckluftzylinder.

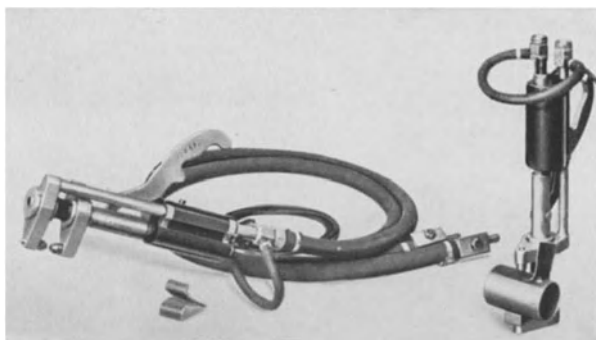


Abb. 22. Punktschweißzangen mit Handsteuerung.

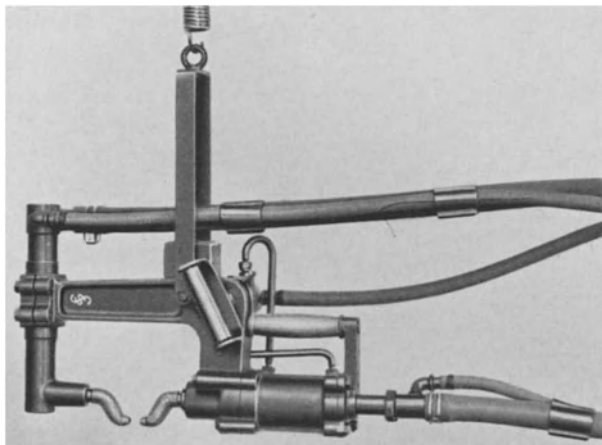


Abb. 23. Punktschweißzange mit Prebluftsteuerungen.

Bei dieser Bauart werden 2 Elektroden nebeneinander gesetzt und so immer 2 Punkte zugleich geschweißt.

Punktschweißbügel sind ähnlich (Abb. 21) wie Punktschweißmaschinen gebaut. Sie greifen von beiden Seiten an und sind verhältnismäßig schwer, müssen deshalb mit Hilfe von Hebezeugen bedient werden.

Punktschweißzangen (Abb. 22 und 23), von Hand oder durch Preßluft oder Preßwasser gesteuert, greifen ebenfalls von beiden Seiten an, sind aber sehr leicht und deshalb einfach zu handhaben.

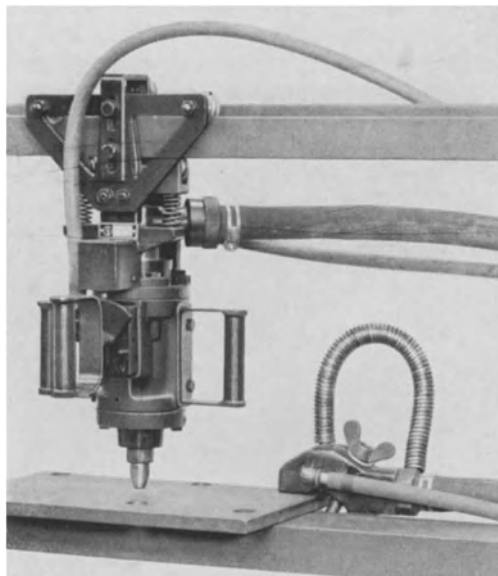


Abb. 24. Spreizelektrode.

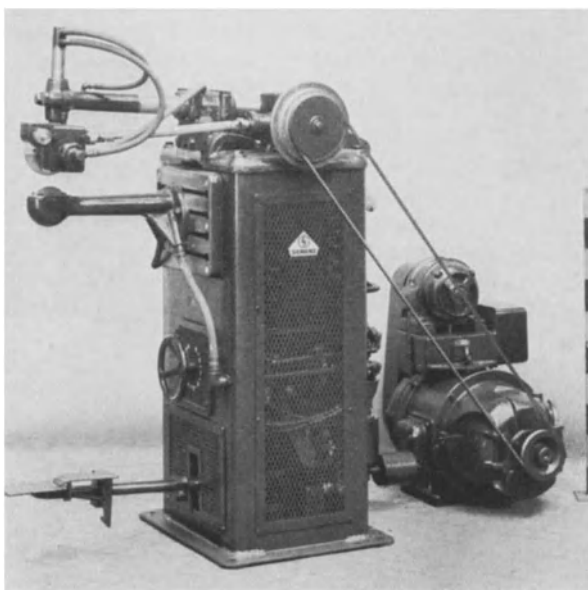


Abb. 25. Nahtschweißmaschine für Längsnähte.

Schließlich seien noch die *Spreizelektroden* (Abb. 24) erwähnt, die für Reihenfertigung an Werkstücken mit vielen Schweißpunkten geeignet sind.

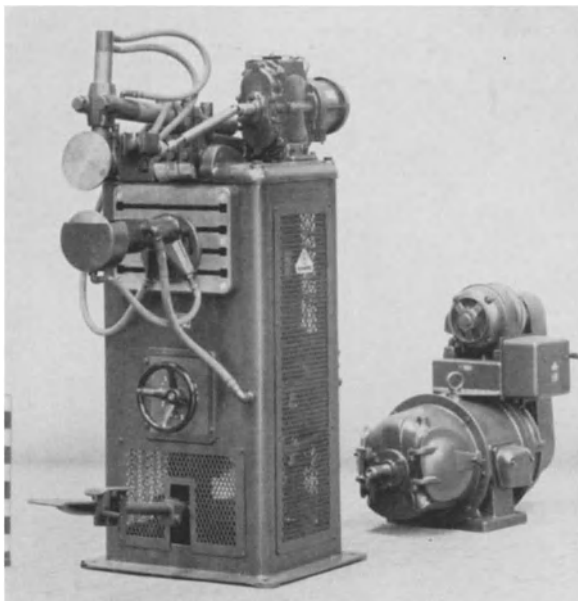


Abb. 26. Nahtschweißmaschine für Quernähte.

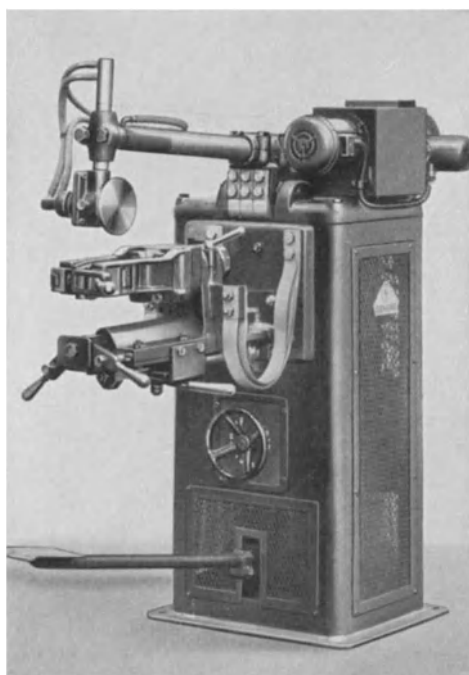


Abb. 27. Nahtschweißmaschine mit Dornschlitten.

Der Aufbau der *Nahtschweißmaschinen* ist grundsätzlich nur wenig von dem der *Punktschweißmaschinen* unterschieden. Die Elektroden sind jedoch als Rollen ausgebildet. Je nach den Erfordernissen des Werkstückes werden eine oder auch beide Rollen, in der Regel durch einen Elektromotor, angetrieben.

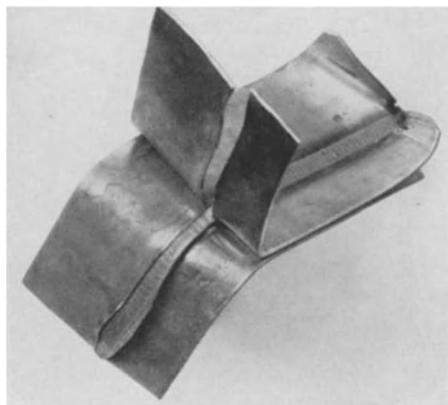


Abb. 28. Nahtschweißung an Stahlblech, zur Prüfung teilweise zerstört.

Die meisten Nahtschweißmaschinen können sowohl für die Längs- wie auch für die Quernahtschweißung verwendet werden (Abb. 25 und 26), wie sie auch

für das Verschweißen kleiner Werkstücke mit einem Dornschlitten versehen werden können (Abb. 27).

Mehr noch als bei der Punktschweißung ist bei der Nahtschweißung eine genaue Steuerung erforderlich, wenn, wie in den meisten Fällen, nicht ununterbrochen, sondern in sehr kurz bemessenen Zeitabständen der Strom zugeführt

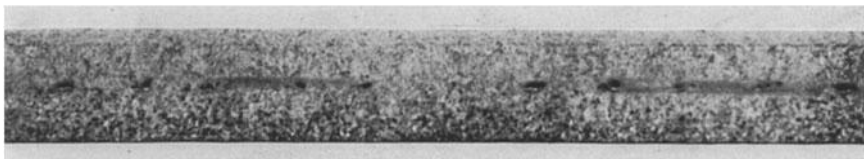


Abb. 29. Schliffbild einer Nahtschweißung an Stahlblech (2 x 3 mm).

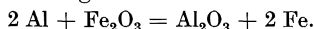
werden soll. Mechanische Steuerungen wie auch elektrische durch *Modulatoren* oder *gittergesteuerte Stromrichter* haben sich gut bewährt und können besonders beim Schweißen von Nichteisenmetallen nicht entbehrt werden. Die Ansicht einer Nahtschweißung mit einer durch Stromrichter gesteuerten Maschine zeigt Abb. 28, während Abb. 29 den Längsschnitt durch eine solche Schweißnaht darstellt.

III. Thermitschweißung.

1. Grundlagen.

Das *Thermitverfahren* wurde von HANS GOLDSCHMIDT erfunden und 1899 zum erstenmal zum Verschweißen von Straßenbahnschienen angewendet.

Es beruht darauf, daß das „*Thermit*“ genannte Gemisch aus gepulvertem Eisenoxyd und Aluminium sich bei Erhitzung auf etwa 1000° entzündet, wobei eine Hitze von etwa 3000° C entwickelt wird. Dadurch wird das Eisenoxyd zu Stahl reduziert, während das Aluminium in Tonerde (Aluminiumoxyd) umgewandelt wird nach der Gleichung:



Der flüssige Stahl sinkt dabei nach unten, während die leichtere, ebenfalls flüssige Schlacke (Tonerde) in die Höhe steigt.

Aus 1 kg Thermit entstehen etwa 0,5 kg Stahl und 0,5 kg Schlacke. Da Gase bei dieser Reaktion nur in ganz unwesentlichem Umfange entwickelt werden, kann das Verfahren bequem fast überall angewendet werden. Der zur Entzündung des Thermits notwendige Wärmegrad wird durch Inbrandsetzen eines *Zündgemisches*, bestehend aus Bariumsuperoxyd und Aluminium, erzeugt. In 10 bis 20 Sekunden nach der Entzündung hat sich dann die ganze Reaktion vollzogen.

Verfahren. 3 Verfahren werden unterschieden:

Preßschweißung, Schmelzschweißung, vereinigte Preß- und Schmelzschweißung.

2. Preßschweißung.

Für das Preßverfahren müssen die zu verschweißenden Werkstücke (z. B. Schienen) an den Stoßstellen sorgfältig bearbeitet werden, so daß sie genau aufeinander passen, damit beim Schweißen weder Schlacke noch Stahl in die Fuge eindringen kann. Dann wird ein Klemmgerät aufgesetzt, mit dessen Hilfe die Stöße zusammengedrückt werden. Die Schweißstelle wird eingeformt, wobei die Form nicht unmittelbar anliegen darf, sondern einen Kanal für Stahl und Schlacke frei lassen muß (Abb. 30). Mit Hilfe eines Benzingebläses werden die Stöße bis auf etwa 700° C vorgewärmt (Abb. 31).

Das in einem Kipptiegel entzündete

Thermit wird nach Beendigung der die Schlacke zuerst ausfließt. Nach der Schlacke fließt auch der Stahl in die Form, kommt aber dabei weder mit den Werkstücken noch mit der Form in Berührung. Er treibt nämlich nur die im Innern noch flüssige Schlacke weg, während an den Rändern die schon erkaltete Schlacke haften bleibt.

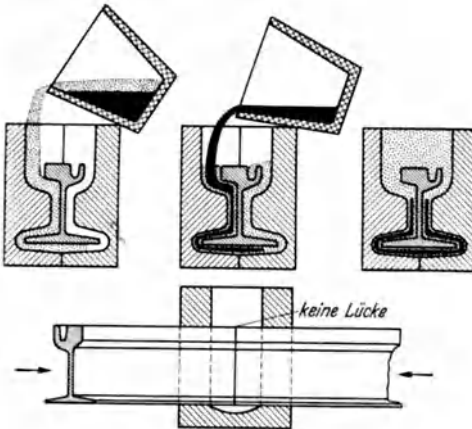


Abb. 30. Thermit-Preßschweißung.

Durch die Hitze der Schlacke und des Stahles werden die Werkstücke auf Schweißhitze gebracht, so daß sie nunmehr mit Hilfe des Klemmgerätes zusammengepreßt und verschweißt werden können. Ist das Werkstück erkaltet, so wird das umgeossene Stahlstück zusammen mit der Schlacke abgeschlagen.

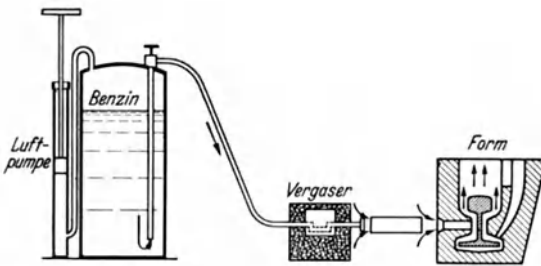


Abb. 31. Thermitschweißung, Vorwärmergerät.

Da bei diesem Verfahren sehr viel Thermit verbraucht wird, auch die genaue Bearbeitung der Stoßstellen schwierig ist, so wird es fast nicht mehr angewendet.

3. Schmelzschweißung.

Bei dem Schmelzverfahren werden die zu verschweißenden Stücke nicht eng aneinander, sondern mit einem Zwischenraum von etwa 10 mm verlegt, so daß der Stahl in diese Fuge eindringen kann. Ebenso wie beim Preßverfahren werden die Stöße durch ein Benzingebläse vorgewärmt. Die Gußform ist mit einem besonderen Einguß versehen (Abb. 32), durch den der flüssige Stahl in den Hohlraum eindringen kann. Man verwendet einen Spitztiegel, durch dessen untere Öffnung zuerst der Stahl in die Form fließt, während die nachströmende Schlacke die Form schon gefüllt vorfindet und deshalb nach der Seite abfließt.

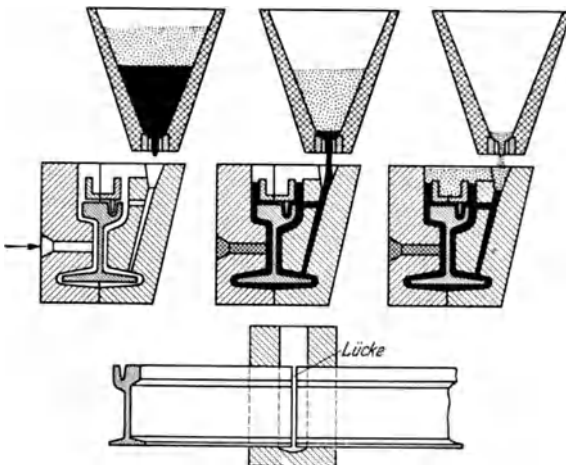


Abb. 32. Thermit-Schmelzschweißung.

Nach dem Schweißen muß die Stoßstelle auf das Ursprungsmaß abgearbeitet werden, wodurch unter Umständen nicht unbedeutende Kosten entstehen.

Der zwischen die Schienenenden gegossene Stahl weicht in der Härte ebenso wie der benachbarte beeinflusste Baustoff nicht unbeträchtlich von

dem unbeeinflussten Baustoff der Schiene ab, so daß dann später leicht Schlagstellen entstehen. Um dies zu vermeiden, werden dem Thermit besondere härtende Zusätze beigegeben (Stahlthermit).

Bei Schweißungen in Kreuzungen, Abzweigungen usw. ist allein dieses Verfahren anwendbar, sonst wird es nur noch wenig angewendet (Abb. 33 und 34).

4. Vereinigte Preß- und Schmelzschweißung.

Die vereinigte Preß- und Schmelzschweißung ist das Verfahren, das heute am meisten angewendet wird. Es beruht darauf, daß die Schienenköpfe im Preßverfahren, die Stege und Füße aber im Schmelzverfahren verschweißt werden. Je nach dem Werkstoff der zu verschweißenden Schienen sind verschiedene Ausführungsarten gebräuchlich.

Schienen mit einer Zugfestigkeit bis etwa 70 kg/mm^2 werden unter Zuhilfenahme eines Bleches aus weichem Stahl verschweißt. Die genau bearbeiteten Stoßflächen werden von beiden Seiten durch ein Klemmgerät gegen das etwa 5 mm dicke Blech gepreßt, so daß Stege und Füße im Abstand von 5 mm voneinander liegen. Nach dem Anlegen der Form und dem Vorwärmen wird aus einem Spitztiegel Stahl und Schlacke in die Form gegossen (Abb. 35). Die Füllung des Tiegels wird so bemessen, daß die Stahlmenge nur zum Füllen der Form bis an den unteren Rand des Schweißbleches ausreicht, und daß der Rest der Form durch Schlacke gefüllt wird. Auf diese Weise werden Stege und Füße verschmolzen, während die Köpfe nur auf Schweißhitze erwärmt werden. Sie müssen

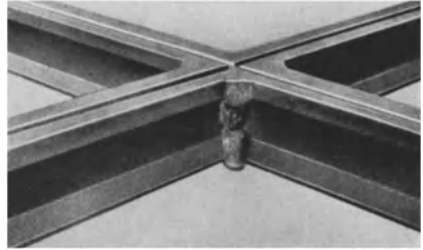


Abb. 33. Im Thermit-Schmelzschweißverfahren geschweißte Kreuzung von $> 60^\circ$.

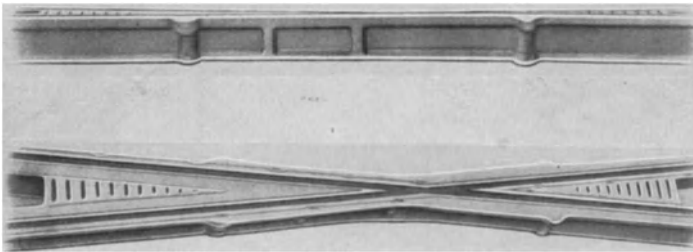


Abb. 34. Im Thermit-Schmelzschweißverfahren geschweißte Kreuzung von $< 60^\circ$.

deshalb durch das Klemmgerät zusammengepreßt und dadurch verschweißt werden. Die Stauchung beträgt etwa 5—6 mm, das Verfahren ist deshalb nur anwendbar, wenn eine der beiden Schienen bewegt werden kann.

Bei Schienen aus sehr hartem Stahl ($85\text{—}130 \text{ kg/mm}^2$) werden jedoch mit diesem Verfahren keine guten Ergebnisse mehr erzielt, da so harter Stahl sich nicht mehr preßschweißen läßt. Würde man die Schweißung durch Zwischenlegen eines sehr weichen Bleches ermöglichen, so wäre andererseits die zu geringe Festigkeit der Schweißstelle von Nachteil. Im Schmelzverfahren könnten derartige Schienen zwar noch verschweißt werden, aber selbst bei Verwendung von Stahlthermit ist es nicht möglich, in der Schweißfuge die Härte der Schiene zu

erreichen. Zwei neue Verfahren haben sich jedoch für harte Schienen, besonders auch für Verbundstahlschienen, gut bewährt.

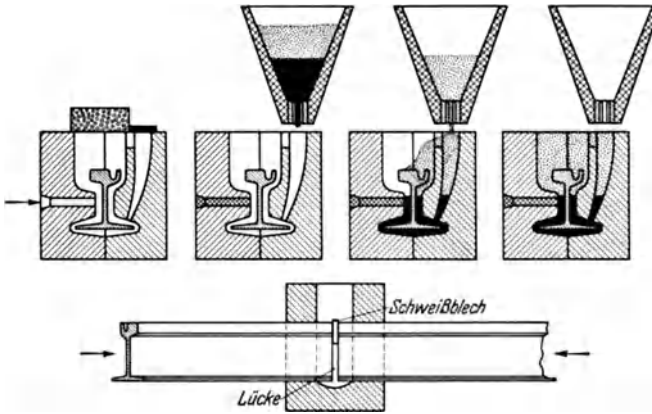


Abb. 35. Vereinigte Thermit-Preß- und -Schmelzschweißung.

Bei dem Einsatzverfahren wird entweder (bei schon verlegten Schienen) ein Blech aus dem Werkstoff der Schienen in den Stoß geklemmt, oder es wird (bei Neuverlegung der Schienen) der Kopf der einen Schiene so abgefräst, daß an der Fahrkante ein Vorsprung stehen bleibt (Abb. 36). Geschweißt wird nun nach dem Schmelzverfahren, wobei jedoch nur die Stege und die Füße verschweißt werden, die Köpfe aber an der Fahrkante allein durch die Schrumpfung der darunter liegenden Schweißstelle zusammengepreßt werden.

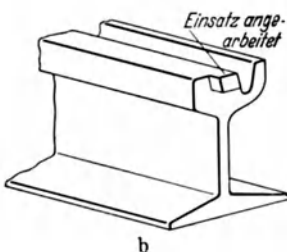
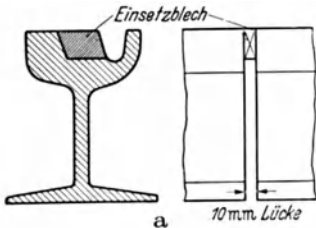


Abb. 36 a und b. Thermitschweißung, Einsatzverfahren
 a mit Einsatzblech bei schon verlegten Schienen,
 b mit angearbeitetem Einsatz bei neu zu verlegenden Schienen.

Bei einem anderen Verfahren werden auch die Köpfe verschweißt, jedoch nicht im teigigen, sondern im breiigen

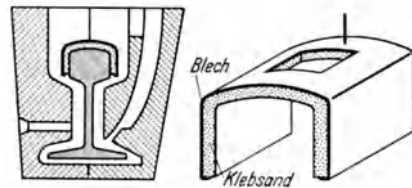


Abb. 37.
 Thermitschweißung mit Kopfschutz.

Zustande, nur wenig unterhalb des Schmelzpunktes. Zu diesem Zweck werden die Schienen an den Köpfen ohne ein Zwischenblech zusammengepreßt, an den Stegen und Füßen aber mit einem Abstand von etwa 5 mm gelassen und dann auf Orange- bis Weißglut erhitzt. Da dabei die Gefahr besteht, daß die Köpfe auseinanderfließen, wird die Stoßstelle mit einem Kopfschutz, d. h. einem mit Klebsand ausgekleideten Blech abgedeckt (Abb. 37). Es wird nun wie beim vereinigten Preß- und Schmelzverfahren geschweißt, jedoch mit dem Unterschiede,

daß nur noch ein ganz geringer Druck notwendig ist, um die beiden hoch-erhitzten Schienenköpfe ineinander überfließen zu lassen.

5. Hilfsgeräte.

Bei allen Verfahren werden *Formen* verwendet, die aus Blechschalen bestehen, welche mit feuerfestem Klebsand ausgekleidet sind. Diese müssen vor dem Eingießen des Thermit gut getrocknet werden, was bei den früher allgemein üblichen

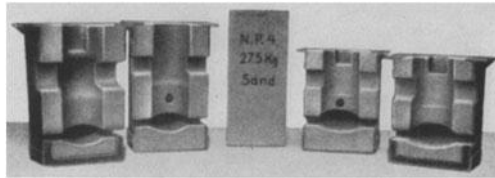


Abb. 38. Thermitschweißung, alte Formen.

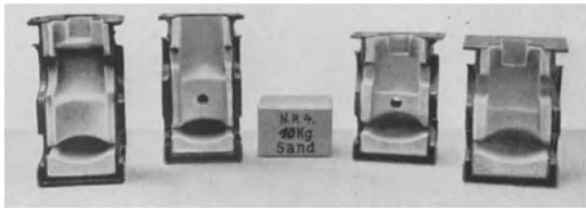


Abb. 39. Thermitschweißung, Sparformen.

Formen, die verhältnismäßig groß waren, mehrere Stunden in Anspruch nahm. Seit neuester Zeit werden jedoch besondere, den Profilen dicht anliegende Blechschalen verwendet, die nur mit einer dünnen Klebsandschicht ausgekleidet werden. Derartige Formen müssen nicht besonders getrocknet werden, sondern ihre Trocknung erfolgt während des Vorwärmens der Stöße.

Ein weiterer Vorteil dieser *Sparformen* ist der gegenüber den früheren

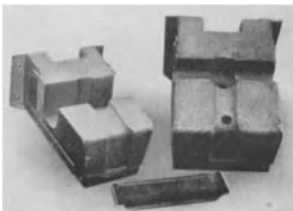


Abb. 40. Thermitschweißung, dreiteilige Formen.

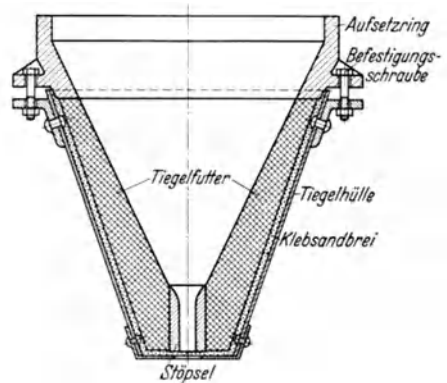


Abb. 41. Thermitschweißung, Tiegel.

Formen auf ein Drittel verminderte Sandverbrauch (Abb. 38 und 39). Allerdings können Sparformen nur für ein bestimmtes Profil verwendet werden, während Formen der älteren Bauart auswechselbare Seitenbleche besitzen und deshalb für die verschiedensten Profile verwendbar sind. Für besonders schwierig zugängliche Schweißstellen werden auch dreiteilige Formen hergestellt (Abb. 40).

Die jetzt üblichen *Tiegel* bestehen aus einem Blechmantel, in den die Auskleidung, das Tiegelfutter, eingesetzt wird (Abb. 41). Das Tiegelfutter, das in



Abb. 42. Thermitschweißung, Klemmgerät.



Abb. 43. Thermitschweißung, Handhobel.

fertig gepreßtem Zustande bezogen wird, hält wesentlich mehr Güsse aus als das Futter der früher von Hand selbst ausgekleideten Tiegel.

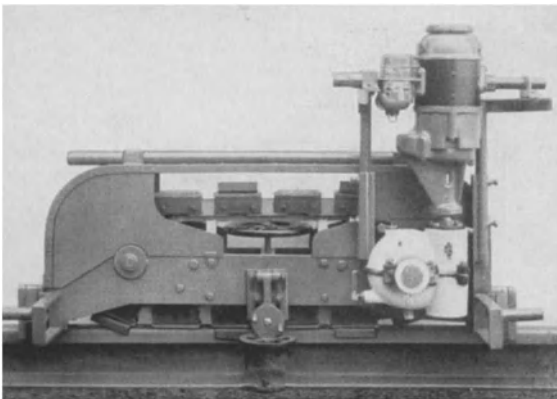


Abb. 44. Thermitschweißung, Feilgerät.

Weiter ist noch erforderlich ein *Klemmgerät* (Abb. 42), das es ermöglicht, ohne besondere Maschinen von Hand die Schweißstellen zusammenzupressen.

Zum Nachbearbeiten der Stöße verwendet man entweder *Handhobel* (Abb. 43) oder *Feilgeräte* (Abb. 44). Das auf dem Bilde gezeigte Feilgerät ist so gebaut, daß gleichzeitig die Oberfläche wie auch die Seitenflächen der Schienenköpfe bearbeitet werden können. Zu diesem Zwecke werden profilierte,

an einer endlosen Kette befestigte Feilblätter über die Schweißstelle gezogen. Als Antriebskraft dient eine elektrische Handbohrmaschine von etwa 1—1,5 PS. Mit dem Gerät lassen sich etwa 4 Stöße in der Stunde bearbeiten.

IV. Elektroschmelzschweißung.

A. Der Lichtbogen.

Die Wärmequelle der Elektroschmelzschweißung ist der elektrische Lichtbogen. Je nach dem Verfahren wird der Lichtbogen zwischen einer Kohlelektrode und dem Werkstück (*BENARDOS-Verfahren*) oder zwischen einer Metallelektrode und dem Werkstück (*SLAVIANOFF-Verfahren*) gezogen.

Trotz zahlreicher Forschungen und Untersuchungen sind unsere Kenntnisse über den Schweißlichtbogen noch sehr gering. Es kann nicht einmal genau

angegeben werden, wie hoch die Temperatur des Lichtbogens ist. Es scheint jedoch festzustehen, daß, vorausgesetzt daß Elektrode und Werkstück aus gleichen oder ähnlichen Werkstoffen bestehen, der positive Pol (Anode) eine höhere Temperatur besitzt als der negative Pol (Kathode). Es ist aber nicht geklärt, warum man nicht nur von oben nach unten, also bei waagerechter Lage des Werkstückes schweißen kann, sondern auch von unten nach oben (Überkopfschweißung), wobei die Tropfen die Schwerkraft überwinden müssen. Daß der Wechselstromlichtbogen nur bei Verwendung umhüllter oder Seelenelektroden, nicht aber nackter Elektroden, aufrecht erhalten werden kann, ist eine feststehende Tatsache, deren Ursache aber noch unerforscht ist. Ebensovienig weiß man, warum manche umhüllten Elektroden besser mit Wechselstrom, andere besser mit Gleichstrom entweder als Anode oder als Kathode verschweißt werden können.

Aus diesen Gründen ist es hier nicht am Platze, die Lichtbogentheorie, oder besser gesagt, die verschiedenen Ansichten über das Wesen des Lichtbogens, zu erörtern. Es sei hier nur die für die Praxis sehr wichtige Frage der Ablenkung des Lichtbogens, die sog. *Blaswirkung*, behandelt.

Der Lichtbogen besteht aus hocherhitzten Gasen und Dämpfen, durch die der elektrische Strom fließt. Wie jeder stromdurchflossene Leiter ist auch er von magnetischen Kraftlinien umgeben, ebenso wie das Werkstück mit seiner Stromzuführung und die Elektrode mit dem Schweißkabel.

Werden diese Kraftlinien einseitig abgelenkt, wie dies beim Schweißen in der Regel der Fall ist, vor allem aber an Ecken, an Kanten usw., so drängen sie den Lichtbogen nach der Seite ab, er flackert und erlischt sogar unter Umständen. Auf alle Fälle kann dadurch das Schweißen sehr erschwert werden.

Abb. 45a zeigt den Fall, in dem der Lichtbogen gar nicht abgelenkt wird, nämlich, wenn die Elektrode senkrecht auf dem Werkstück steht, dessen Achse die gleiche Richtung einnimmt. Die Kraftlinien wirken von allen Seiten gleichmäßig ein, heben sich also in der Wirkung auf. Abb. 45b zeigt einen ähnlichen Fall, es befindet sich jedoch ein größeres Stück Stahlstück in der Nähe, das einen Teil der Kraftlinien aufnimmt. Auf der dem Stahlstück entgegengesetzten Seite wirken aber die Kraftlinien in voller Stärke. Die Folge davon ist, daß sie den Lichtbogen abdrängen, da ja das Gleichgewicht gestört ist.

In der Praxis werden die Richtungen des Stromes in der Elektrode und in dem Werkstück fast nie, wie eben gezeigt, in einer Linie liegen, sondern meist in einem Winkel von etwa 90° zueinander stehen. In diesem Falle findet auf der Innenseite des Winkels eine Anhäufung der Kraftlinien statt, während sie auf der Außenseite weiter auseinander liegen und deshalb einen geringeren Einfluß ausüben. Auf diese Weise wird der Lichtbogen vom Stromanschluß weggeblasen (Abb. 45c).

Je spitzer der Winkel ist, desto stärker ist die Blaswirkung (Abb. 45d), je stumpfer der Winkel ist, desto geringer ist sie (Abb. 45e). Man kann also durch Schräghalten der Elektrode der Blaswirkung entgegenarbeiten.

Wird der Strom von zwei Seiten dem Werkstück zugeführt, so wirken die Kraftlinien bei senkrecht stehender Elektrode gleichmäßig auf den Lichtbogen ein, lenken ihn also nicht ab (Abb. 45f). In Wirklichkeit wird aber der Strom nie genau in gleicher Stärke von beiden Seiten kommen, sondern stets den Weg des geringsten Widerstandes einschlagen. Wenn also nicht genau in der Mitte des Werkstückes geschweißt wird, so werden immer auf einer Seite die Kraftlinien dichter sein und damit den Lichtbogen ablenken (Abb. 45g). Zweiseitiger Anschluß mildert deshalb die Blaswirkung, hebt sie aber nicht auf.

Weiter ist zu berücksichtigen, daß besonders beim Schweißen der ersten Lage einer V- oder X-Naht auf der einen Seite der noch nicht geschlossene Spalt zwischen

den beiden zu verbindenden Stücken, auf der anderen Seite die noch glühende oder flüssige Schweißbe den Verlauf der Kraftlinien beeinflussen.

Besonders unangenehm und schwierig zu beherrschen wird die Blaswirkung, wenn mehrere Schweißer am gleichen Werkstück arbeiten, oder wenn verschiedene Stücke auf einer großen Schweißplatte geschweißt werden. In diesen Fällen wirken die verschiedenen Schweißströme bzw. die von ihnen ausgehenden Magnetfelder aufeinander ein und können unter Umständen das Schweißen sehr erschweren. Es muß dann darauf geachtet werden, daß kein Schweißer zu dicht am andern

schweißt, sowie, daß auch die Schweiß- und Werkstückanschlußkabel anderer Schweißer nicht in zu großer Nähe der Stellen liegen, an denen geschweißt wird. Jeder Schweißer soll aber sein eigenes Werkstückanschlußkabel möglichst dicht

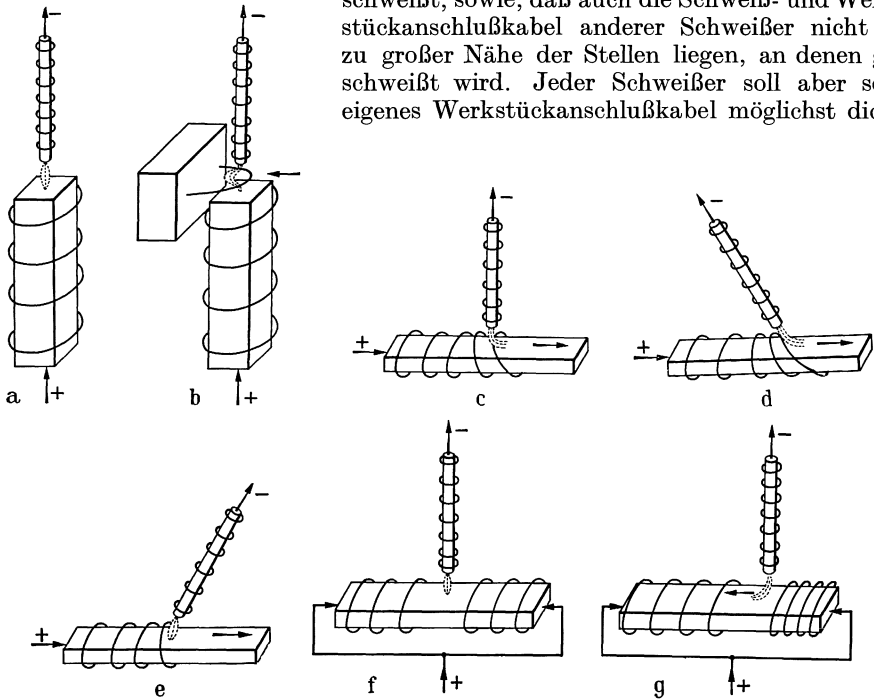


Abb. 45a bis g. Magnetische Ablenkung des Lichtbogens (Blaswirkung).

an seiner Schweißstelle anschließen und die Lage dieses Abschlusses je nach der Blaswirkung verändern.

Je länger der Lichtbogen ist, desto stärker äußert sich die Blaswirkung. Der Schweißer muß deshalb den Lichtbogen so kurz wie nur irgendmöglich halten, wodurch auch, wie in einem späteren Abschnitt nachgewiesen wird, die Güte der Schweißnaht selbst wesentlich verbessert wird.

Sehr stark tritt die Blaswirkung beim Schweißen mit dem Kohlelichtbogen auf. Um sie unschädlich zu machen, verwendet man Elektrodenhalter mit besonderen Blaspulen. Auch hierauf wird noch später zurückgekommen werden.

Wird mit Wechselstrom geschweißt, so tritt die Blaswirkung unter sonst gleichen Verhältnissen wesentlich weniger stark auf als bei der Gleichstromschweißung. Dies rührt vermutlich davon her, daß bei Wechselstrom ein gerichtetes Magnetfeld sich im Werkstück nicht ausbilden kann, sondern, daß Wirbelströme entstehen. Wie groß der Unterschied zwischen den beiden Stromarten in dieser Beziehung ist, zeigen die Abb. 46a—c, die die Blaswirkung am Ende eines Stabes darstellen.

B. Der Schweißstrom.

Um den Lichtbogen aufrecht erhalten zu können, muß eine genügende Spannung vorhanden sein, die einen Strom ausreichender Stärke durch die Leitungen und den Lichtbogen treibt.

Die Spannung muß so hoch bemessen sein, daß sie den Widerstand innerhalb des Stromkreises überwinden kann. Folgende Widerstände müssen dabei berücksichtigt werden:

Widerstand in den Kabeln, Widerstand in der Elektrode, Widerstand im Lichtbogen.

Sind die Kabel (Schweiß- und Werkstückanschlußkabel) im Querschnitt richtig bemessen und nicht zu lang, so ist ihr Widerstand so gering, daß er praktisch vernachlässigt werden kann. Auch der Widerstand der Elektrode fällt in der Regel wenig ins Gewicht, da die Elektroden ja meist sehr kurz sind. In der Hauptsache kommt deshalb der Widerstand auf der Strecke Elektrodenspitze-Werkstück in Frage.

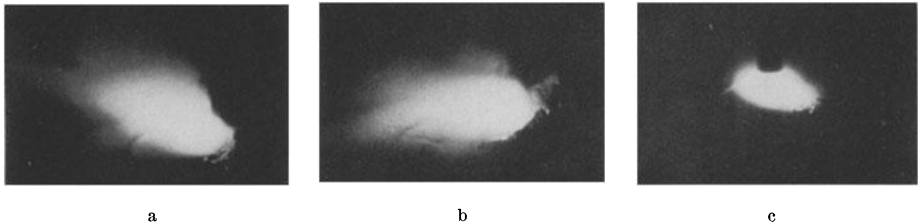


Abb. 46a bis c. Blaswirkung am Ende eines Stabes. a Gleichstrom, — -Pol an der Elektrode, b Gleichstrom, + -Pol an der Elektrode, c Wechselstrom.

Solange der Lichtbogen noch nicht brennt, ist der Widerstand dieser Strecke sehr groß. Zu seiner Überwindung sind etwa 4—5000 V je Millimeter Abstand notwendig. Ist jedoch der Lichtbogen gezündet, was durch Tupfen oder Streichen mit der Elektrode geschieht, so ist nur noch eine Spannung von etwa 15—45 V, je nach der Länge des Lichtbogens und der Art der Elektrode notwendig, um ihn aufrecht zu erhalten. Beim Schweißen von Hand mit Stahlelektroden kommen Werte von etwa 25—30 V in Betracht, beim Schweißen mit Automaten etwa 15—25 V, da hier der Lichtbogen kürzer gehalten werden kann, während der Kohlelichtbogen ungefähr 40—45 V benötigt.

Eine derart geringe Spannung steht aber nur in Ausnahmefällen im Netz zur Verfügung. Die geringste gebräuchliche Spannung beträgt 110 V. 220 V ist die am häufigsten anzutreffende Spannung.

Würde bei dem geringen Widerstand des brennenden Lichtbogens von einer Stromquelle mit auch nur 110 V Spannung geschweißt werden, so würde die überschüssige, nicht zur Überwindung des Lichtbogenwiderstandes notwendige Spannung ein übermäßiges Ansteigen der Stromstärke bewirken, wie bei einem Kurzschluß. Bei zu großer Stromstärke erhitzt sich jedoch die Elektrode, als der schwächste Teil des Stromkreises, zu sehr und wird glühend, wodurch das Schweißen erschwert und die Güte der Naht verschlechtert wird.

Die Stromstärke muß dem Querschnitt der Elektrode sowie deren Eigenart angemessen sein. Sie darf aus dem eben erwähnten Grunde nicht zu groß sein, darf aber ebenfalls nicht zu gering sein, da sonst die Elektrode zu langsam abschmilzt, der Lichtbogen nur schwer gehalten werden kann, und kein genügender Einbrand zwischen Schweißgut und Baustoff des Werkstückes erzielt wird.

Die einfachste Art, die Netzspannung bis auf das notwendige Maß herabzusetzen, ist das Einschalten von Widerständen. Da jeder Widerstand aber Energie vernichtet, so ist die Schweißung über Widerstände nur in den seltenen Fällen wirtschaftlich gerechtfertigt, in denen die Strompreise ungewöhnlich niedrig sind, z. B. bei eigenen Wasserkraftanlagen.

In der Regel wird man den Netzstrom hoher Spannung durch einen Umformer, oder, falls Dreh- oder Wechselstrom zur Verfügung steht, auch durch einen Umspanner in Schweißstrom von niedriger Spannung verwandeln.

Steht kein Strom zur Verfügung, wie z. B. auf ländlichen Baustellen, so kann der Schweißstrom von niedriger Spannung auch unmittelbar durch einen Generator, der durch einen Otto- (Benzin-) Motor oder Dieselmotor angetrieben wird, erzeugt werden. Der Antrieb eines derartigen Stromerzeugers durch eine Transmissionswelle dürfte heutzutage kaum mehr in Frage kommen.

C. Die Schweißstromerzeuger.

1. Allgemeine Anforderungen.

Folgende Forderungen müssen von brauchbaren Schweißstromerzeugern erfüllt werden:

1. Gute Schweißigenschaften, möglichst über den ganzen Bereich.
2. Ausreichender Regelbereich je nach dem Verwendungszweck.

3. Feinstufige Regelung.
4. Guter Wirkungsgrad.
5. Geringe Leerlaufverluste.
6. Guter Leistungsfaktor.
7. Gleichbleibende Leistung.
8. Ungefährliche Handhabung.
9. Ausrüstung mit Meßinstrumenten.

10. Kräftige, den Anforderungen des rauen Schweißbetriebes gewachsene, regensichere Bauart.

11. Angemessener Preis.

Diesen Forderungen kommen die heute hergestellten Schweißstromerzeuger zum größten Teil in durchaus befriedigender Weise nach. Zu den Forderungen selbst ist zu bemerken:

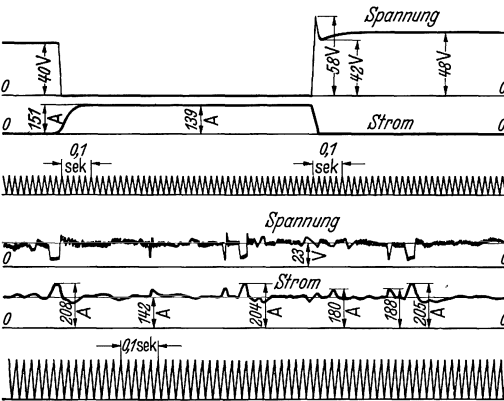


Abb. 47. Schalt- und Schweißoszillogramme eines Schweißumformers.

1. Schweißigenschaften. Die Schweißgeräte sollen es einem guten Schweißer ermöglichen, Schweißnähte von hoher Güte mit einem Mindestmaß an Zeitaufwand herzustellen. Dazu ist es in erster Linie notwendig, daß das Zünden nicht erschwert ist, sowie, daß während des Schweißens trotz der unvermeidlichen Änderungen in der Länge des Lichtbogens die Stromstärke dauernd möglichst gleich eingehalten wird.

Den besten Aufschluß über die Schweißigenschaften gibt neben dem praktischen Versuch das Oszillogramm. Abb. 47 zeigt Oszillogramme eines Schweißumformers, und zwar Schalt- und Schweißoszillogramme. Aus dem Schaltoszillogramm, das einen Schaltvorgang Leerlauf-Kurzschluß-Leerlauf darstellt, geht folgendes hervor:

Während des Leerlaufes, d. h. bei geöffnetem Stromkreis, beträgt die Spannung des untersuchten Umformers 40 V. Innerhalb von $\frac{1}{30}$ Sekunde (abgelesen am

Zeitschreiber) fällt die Spannung bei Kurzschluß auf 0 V, während innerhalb von 0,1 Sekunden die Stromstärke auf 151 A ansteigt, um dann allmählich auf 139 A zurückzugehen. Innerhalb von $\frac{1}{50}$ Sekunde erreicht beim Ausschalten die Spannung eine Spitze von 58 V, fällt dann auf 42 V, bis sich nach 0,1 Sekunden eine Spannung von 48 V einstellt. Die Stromstärke geht innerhalb von 0,1 Sekunden von 139 A auf 0 A zurück.

Das Schweißoszillogramm zeigt den Strom- und Spannungsverlauf während des Schweißens. Zu seinem Verständnis sei eingeschaltet, daß bei den meisten Elektroden der von der Elektrodenspitze abschmelzende Werkstoff in Tropfen- oder Pilzform auf das Werkstück übergeht. Abb. 48 zeigt schematisch diesen Vorgang. Zuerst bildet sich ein Tropfen, dann sinkt er ab, wobei die Verbindung mit der Elektrodenspitze in Gestalt eines Fadens erhalten bleibt. Schließlich vereinigt sich der Tropfen mit dem Werkstück, wobei bei kurzem Lichtbogen für einen Augenblick ein Kurzschluß zwischen Elektrode und Werkstück entsteht. Diese Vorgänge sind im Schweißoszillogramm dargestellt, dem zu entnehmen ist:

Jedesmal, wenn durch den Tropfenübergang ein Kurzschluß entsteht, sinkt die Spannung stark ab. Auf Null kann sie jedoch nicht zurückgehen, weil der Widerstand des flüssigen, heißen Stahles wesentlich größer ist, als der des festen Stahles von Raumtemperatur. Dem Abfallen der Spannung steht ein Stromanstieg gegenüber. Man sieht Stromspitzen, die bei dem untersuchten Umformer den Schweißstrom um etwa $\frac{1}{3}$ überragen. Beiden Oszillogrammen kann entnommen werden:

Die untersuchte Maschine arbeitet elastisch, denn sie paßt sich schnell den jeweils vorhandenen Verhältnissen des Lichtbogens an. Bei Kurzschlüssen, wie sie z. B. bei ungeübten Schweißern durch Festkleben der Elektrode vorkommen oder durch Berühren des Werkstückes mit dem Elektrodenhalter entstehen (Ablegen des Elektrodenhalters auf das Werkstück), treten keine übermäßig hohen Ströme auf, durch die die Maschine, z. B. am Kollektor, Schaden erleiden könnte. Alle Vorgänge spielen sich sehr rasch in steilen Kurven ab, daraus geht hervor, daß auch das Zünden keine Schwierigkeiten bereitet. Auch während des Schweißens treten beim Tropfenübergang keine übermäßigen Stromspitzen auf, die Maschine liefert also ziemlich unabhängig von Spannungsänderungen einen verhältnismäßig gleichbleibenden Strom. Das ist eine Voraussetzung dafür, daß gute Elektroden ohne Spritzen abschmelzen könne.

Ozillogramme geben nur bei Gleichstrom erzeugenden Schweißgeräten, einen guten Aufschluß über die Schweißigenschaften, bei Wechselstrom sagen sie wenig aus. Will man Schweißspanner untersuchen, so muß man sich hauptsächlich auf den praktischen Schweißversuch verlassen, ebenso bei Schweißumformern in allen den Fällen, in denen kein Oszillograph, d. h. ein Registriergerät mit trägheitslos schwingenden Strom- und Spannungsmessern, zur Verfügung steht.

Früher wurde hauptsächlich die sog. statische Charakteristik zur Beurteilung eines Schweißgerätes herangezogen. Es hat sich jedoch gezeigt, daß sie nur wenig Aufschluß über die Schweißigenschaften verschaffen kann. Bei Aufstellung der statischen Charakteristik wird auf möglichst vielen Schaltstufen die Abhängigkeit der Stromstärke von der Spannung durch allmähliches Einschalten eines Widerstandes festgestellt. Derartige langsame Änderungen kommen aber beim praktischen Schweißen nicht vor, daher auch die geringe Bedeutung der statischen Charakteristik für die Schweißigenschaften. Man kann aus ihr jedoch genau

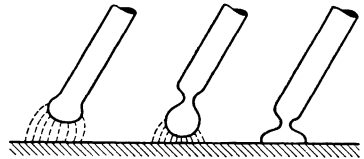


Abb. 48. Werkstoffübergang von der Elektrodenspitze auf das Werkstück.

ablesen, wie groß die Abnahme der Stromstärke bei zunehmender Spannung, also z. B. beim großen Widerstand in den Kabeln oder großer Lichtbogenlänge ist. Abb. 49 zeigt für drei verschiedene Maschinen je eine Linie der statischen Charakteristik. Die Unterschiede sind sehr groß, und es ist deutlich zu ersehen, daß Maschinen mit steiler Charakteristik bei zunehmender Spannung wesentlich langsamer mit der Stromstärke nachlassen, als solche mit einer flachen Charakteristik.

Eine besondere Eigenschaft läßt sich sehr leicht feststellen, die Elastizität des Lichtbogens. Je elastischer ein Lichtbogen ist, desto länger kann er gezogen werden ohne abzureißen. Ein sehr elastischer Lichtbogen erleichtert zwar dem Anfänger die Arbeit sehr, verführt ihn aber leicht zum schlechten Schweißen. Je länger der Lichtbogen gezogen wird, desto härter und spröder wird die Schweißnaht, und desto geringer wird die Einbrandtiefe. Die Gründe dafür werden im Abschnitt Elektroden noch ausführlich erörtert werden. Ist mit einem Gerät

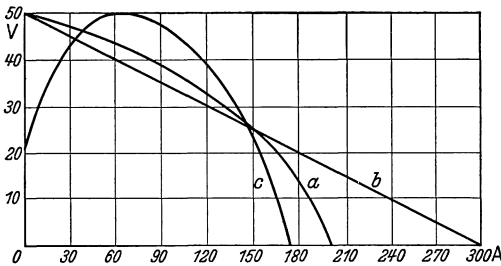


Abb. 49. Statische Charakteristiken von 3 verschiedenen Schweißumformern (jeweils nur eine Kurve dargestellt).

ein langer Lichtbogen nicht möglich, so wird der Schweißer gezwungen, den Elektrodenabstand ganz kurz zu halten. Kann er das nicht, so reißt der Lichtbogen ab, und diese Stellen sind wenigstens nachher an der fertigen Naht deutlich zu sehen. Das erleichtert natürlich die Nachprüfung. Aus diesen Gründen ist man wieder davon abgekommen, Geräte mit „Gummi-Lichtbogen“ zu bauen, wenn auch auf eine gewisse Elastizität Wert gelegt werden muß.

Gute Schweißigenschaften sollen über den ganzen Regelbereich vorhanden sein. Diese Forderung darf aber nicht übertrieben werden. Geräte der Regelgröße, die für Schweißarbeiten mit 3,4 und 5 mm dicken Elektroden gebaut sind, werden für 1 mm dicke Elektroden im allgemeinen schlechter geeignet sein als Kleinschweißgeräte. Für Dünnschweißungen mit Metallektroden kann es deshalb besser und wirtschaftlicher sein, besondere Kleinschweißgeräte zu beschaffen. Ebenso werden Großschweißgeräte, die bis zu 400 A und mehr Schweißstrom liefern, in dem unteren Bereich hinsichtlich der Schweißigenschaften einem Gerät der Regelgröße etwas unterlegen sein.

2. Ausreichender Regelbereich. Von Sonderfällen abgesehen, in denen ein Gerät nur für bestimmte Arbeiten verwendet werden soll, muß Wert darauf gelegt werden, daß alle praktisch vorkommenden Arbeiten damit ausgeführt werden können. Wenn auch, wie oben erwähnt, die Schweißigenschaften selten über den ganzen Bereich gleich gut sind, so besteht doch dann die Möglichkeit, das Gerät vielseitig zu verwenden. Drei Größen mit folgenden Bereichen werden zur Zeit hauptsächlich gebaut:

Kleinschweißgeräte für 15–160 A, Regelschweißgeräte für 50–250 A, Großschweißgeräte für 250 A und mehr.

Ohne zwingende Gründe sollte man von diesen Größen nicht abweichen. Eine Sonderstellung nehmen noch die Geräte ein, die Strom für mehrere Schweißstellen liefern.

3. Feinstufige Regelung. Am ruhigen oder unruhigen Abschmelzen der Elektrode merkt der geübte Schweißer sofort, ob er die richtige Stromstärke eingestellt hat oder nicht. Da jede Elektrode, abhängig vom Querschnitt sowie von ihren besonderen Eigenschaften, hauptsächlich von denen ihrer Umhüllung,

eine andere Stromstärke verlangt, so muß die Regelung eines Gerätes möglichst feinstufig sein. Stufenlose Regelung ist die beste Lösung, doch ist sie nicht unbedingt notwendig. Es dürfte bei Geräten der Regelgröße im allgemeinen genügen, wenn die Stromstärke von Stufe zu Stufe um 5—10% verändert werden kann.

Der Regler soll leicht bedienbar sein. Bei Geräten mit 2 Regelbereichen, z. B. „Schwach“ von 50—180 A, „Stark“ von 150—250 A ist es sehr unpraktisch und zeitraubend, wenn der Wechsel von einem auf den anderen Bereich nur durch Abschrauben der Kabel möglich ist, da der Übergang gerade in einem sehr häufig benutzten Schweißbereich liegt.

Von besonderem Wert sind Fernregler, d. h. tragbare Geräte, mit denen der Schweißer von seinem Arbeitsplatz aus, z. B. auf einem Baugerüst oder im Innern von Behältern, sein entfernt stehendes Schweißgerät regeln kann. Für alle derartigen Arbeiten, bei denen es nicht möglich ist, das Schweißgerät unmittelbar an der Schweißstelle aufzustellen, sollten Geräte mit Fernreglern beschafft werden.

4. Guter Wirkungsgrad. Der Stromverbrauch beim Schweißen ist nicht unbedeutend. Rechnet man z. B. im Mittel mit einer Spannung von 25 V bei einer Stromstärke von 180 A, so ergibt sich daraus ein Schweißstromverbrauch von 4,5 kWh/Std.

Früher wurden teilweise Geräte hergestellt, die nur einen Wirkungsgrad von etwa 25% besaßen. Dies rührte davon her, daß in den Maschinen große Widerstände eingebaut waren, um gute Schweiß-eigenschaften zu erzielen. Bei solchen Geräten betrug dann der tatsächliche Stromverbrauch unter den eben genannten Verhältnissen 18 kWh/Std. Das bedeutet bei einem Strompreis von 0,1 RM./kWh einen Aufwand von 1,80 RM./Std.

Tatsächlich ist der Aufwand etwas geringer, da beim Schweißen fast immer mit großen Verlustzeiten gerechnet werden muß. Aber auch bei einer reinen Schweißzeit von nur 50% der Gesamtarbeitszeit muß unter diesen Verhältnissen immer noch mit einem Stromkostenaufwand von 0,90 RM./Std. gerechnet werden, so daß dadurch die Gemeinkosten recht wesentlich erhöht werden.

Wo derartige Geräte noch im Betriebe sind, sollten sie durch neuzeitliche Geräte ersetzt werden, denn bei neuzeitlichen Umformern und Gleichrichtern beträgt der Wirkungsgrad etwa 45—60%, bei Umspannern sogar bis zu 80%. Der Aufwand für den Strom sinkt also bei derartigen Geräten auf die Hälfte und mehr gegenüber früher.

Allerdings ist der Wirkungsgrad meist nicht über den ganzen Bereich gleich gut. Geräte mit großem Regelbereich besitzen oft an der unteren Grenze einen verhältnismäßig schlechten Wirkungsgrad (Abb. 50).

5. Geringe Leerlaufverluste. Nur bei selbsttätigen Schweißanlagen kann man mit einem Verhältnis der Schweißzeit zur Arbeitszeit von 1:1 rechnen. Im praktischen Handschweißbetrieb wird wohl selten während mehr als 70% der Arbeitszeit geschweißt, denn der Wechsel der Elektroden, das Reinigen der Schweißnähte usw. nehmen Zeit in Anspruch. Nicht selten kann nur mit 50% oder gar nur mit 25% tatsächlicher Schweißzeit gerechnet werden. Diese Werte

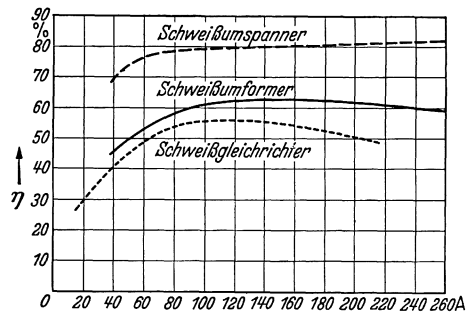


Abb. 50. Wirkungsgrade verschiedener Schweißgeräte.

beziehen sich auf die gesamte Arbeitszeit und dürfen nicht mit den unter 7. angegebenen Werten verwechselt werden.

Während der übrigen Zeit werden die Geräte meist nicht ausgeschaltet und verbrauchen deshalb Strom. Der Leerlaufverbrauch ist besonders dann zu berücksichtigen, wenn mit 50 und mehr Prozent Leerlaufzeit gerechnet werden muß. Von Geräten der Regelgröße kann heutzutage verlangt werden, daß bei Umformern der Leerlaufverbrauch nicht mehr als 2,5 kWh/Std., bei Gleichrichtern nicht mehr als 1,5 kWh/Std. und bei Umspannern nicht mehr als 0,25 kWh/Std. beträgt.

6. Guter Leistungsfaktor ($\cos \varphi$). Bei Wechselstrom- bzw. Drehstromnetzen spielt häufig der Leistungsfaktor eine große Rolle. In vielen Fällen muß ein besonderer Tarif bezahlt werden, wenn der Gesamtleistungsfaktor eines Verbrauchers niedriger ist als 0,8.

Abb. 51 zeigt die Leistungsfaktoren verschiedener Geräte. Besonders an der unteren Grenze sind sie teilweise sehr schlecht, deshalb ist es bei Umspannern mit ihrem schlechten Leistungsfaktor häufig zweckmäßig, Kondensatoren zu beschaffen, die den Leistungsfaktor auf 0,8 verbessern.

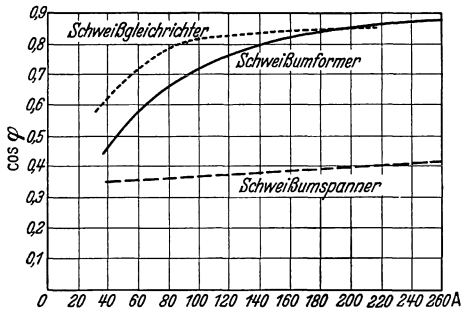


Abb. 51. Leistungsfaktoren verschiedener Schweißgeräte.

schweißmaschinen“ (R.E.S.M./1931) welche Angaben über die Leistung müssen. Diese gehen aus dem durch die R.E.S.M. vorgeschriebenen Leistungsschild hervor (Abb. 52).

Außer dem Regelbereich, aus dem die niederste und höchste Stromstärke mit den dazugehörigen Spannungen ersichtlich ist, ist in erster Linie noch die Leistung bei DB (Dauerbetrieb) und bei DAB (Dauerbetrieb mit aussetzender Belastung) angegeben.

Die für DB angegebene Leistung nennt die Werte, die die Maschine ununterbrochen erzeugen kann, ohne übermäßig warm zu werden.

Auch die für DAB angegebene Leistung muß dauernd erzeugt werden können, doch sind entsprechend dem angegebenen Vornhundertersatz in einem Spiel von 10 Minuten Pausen einzulegen, in denen die Maschine leer läuft.

Bei der Beurteilung, ob die Leistung einer Maschine ausreicht, müssen die Betriebsverhältnisse geprüft werden, damit wenigstens überschlägig die Einschalt-dauer festgelegt werden kann.

Die Einschalt-dauer von Schweißgeräten kann auch mit besonderen Instrumenten genau festgestellt werden. Mit Hilfe des *Schweißzeitmessers* (Abb. 53) eines Gerätes, das zwei Zeitähler besitzt, die in den Schweißstromkreis bzw. den Netzanschluß geschaltet werden, ist die gesamte Schweißzeit und die gesamte Einschaltzeit eines Schweißgerätes bestimmbar. Daraus kann dann das Verhältnis

7. Gleichbleibende Leistung. Erwärmen sich Schweißgeräte im Betriebe sehr stark, so geht auch meist ihre Leistung zurück. Es muß gefordert werden, daß dieses Absinken der Stromstärke nicht mehr als 10% beträgt, denn es kann vom Schweißer nicht verlangt werden, daß er dauernd die Stromstärke nachregelt. Gute neuzeitliche Schweißgeräte haben praktisch keinen Stromrückgang.

Die „Regeln für die Bewertung und Prüfung von Gleichstrom - Lichtbogen- geben genaue Anhaltspunkte darüber, von Schweißumformern gemacht werden die R.E.S.M. vorgeschriebenen Leistungs-

Schweißzeit zu Einschalt- bzw. Arbeitszeit errechnet werden. Dieser Wert gibt jedoch keinen Aufschluß über die Verhältnisse während des 10-Minuten-Spieles.

Der *Schweißkontrollleur* (Abb. 54) dagegen ermöglicht es, den gesamten Schweißvorgang zu verfolgen, da er mit einem registrierenden Strommesser ausgerüstet

Hersteller oder Ursprungszeichen			
Schweiß-Gen.	LSGV 1500	Nr. 987 654	
1500	$\frac{U}{\text{min}}$	Leerlaufspg.	45/80 V
Regelbereich	$\frac{17}{25}$ V	$\frac{60}{250}$ A	
DB	20 V	200 A	
DAB	% ED	V	A
Erregerspg.	110 V		
Zusätzliche Vermerke			

Abb. 52. Leistungsschild für Schweißumformer nach R.E.S.M./1931.

ist, der alle Schwankungen des Schweißstromes, also auch die Pausen, auf einem abrollenden Papierstreifen aufzeichnet. Die so entstehende Kurve kann dann ausgewertet werden, um einmal die genaue Schweißzeit zu ermitteln, dann aber auch, um das Abschmelzen der Elektroden zu verfolgen.

Besonders ist darauf zu achten, daß die auf dem Leistungsschild angegebene Stromstärke nur bei der angegebenen

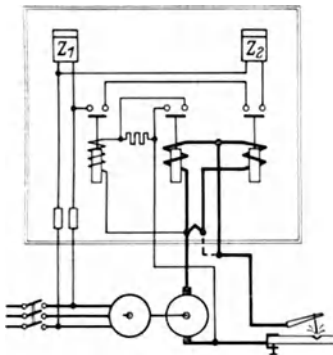


Abb. 53. Schweißzeitmesser.



Höchstspannung, keinesfalls bei einer höheren Spannung dauernd erzeugt werden kann. Es ist also unzulässig, ein Gerät, das für 200 A bei 20 V gebaut ist mit einem Kohlelichtbogen von 45 V und ebenfalls 200 A zu belasten.

Die Verringerung der höchstzulässigen Stromstärke bei höheren Lichtbogen-spannungen muß gegebenenfalls vom Hersteller der Maschine erfragt werden.

8. Ungefährliche Handhabung. Es muß gefordert werden, daß keine der Berührung zugängliche Stelle eines Gerätes unter Spannung steht, mit Ausnahme

der Kabelanschlüsse. Zurückzuweisen sind auch Geräte, bei denen die Stromstärke durch Umstecken von Steckern in ungeschützte Buchsen geregelt wird.

Da ein Gerät um so gefährlicher ist, je höher seine Leerlaufspannung ist, so sind Geräte mit hoher Leerlaufspannung besonders dann abzulehnen, wenn die Eigenart der Arbeit ein Berühren des stromführenden Werkstückes wahrscheinlich macht, z. B. bei Arbeiten auf Baugerüsten oder im Innern von Kesseln.

Allerdings darf die Forderung der niederen Leerlaufspannung nicht übertrieben werden, da bei zu niedriger Leerlaufspannung unter Umständen das Zünden sehr erschwert wird. Eine Leerlaufspannung von 80 V sollte aber nicht überschritten werden. Veralterte Schweißmaschinen sind in dieser Beziehung besonders zu prüfen.

9. Ausrüstung mit Meßinstrumenten. Wie schon im Abschnitt „Feinstufige Regelung“ erwähnt wurde, merkt ein geübter Schweißer am Abschmelzen seiner Elektrode, ob er die richtige Stromstärke eingestellt hat oder nicht. Die Spannung des Lichtbogens ergibt sich aber aus seiner Länge, und diese wird vom Schweißer während des Schweißens dauernd beobachtet.

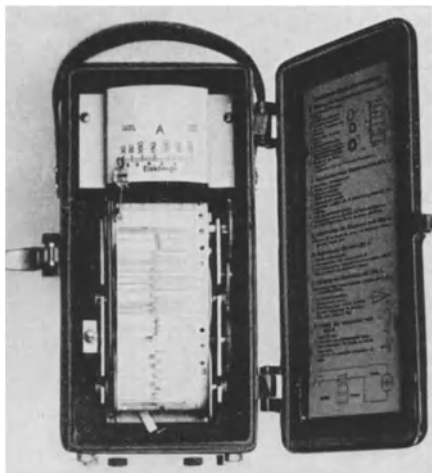


Abb. 54. Schweißkontrollleur.

Man könnte deshalb auf den Gedanken kommen, daß Meßinstrumente für Stromstärke und Spannung überflüssig sind. Tatsächlich sind auch viele Schweißgeräte nicht mit Meßinstrumenten ausgerüstet, insbesondere nicht die, deren Regler zum Einstellen der Stromstärke eine geeichte Skala besitzt. Trotzdem sind aus folgenden Gründen Meßinstrumente wünschenswert: Für jede Elektrodensorte wird vom Hersteller eine bestimmte Stromstärke vorgeschrieben. Schmilzt nun eine Elektrode unruhig ab, so muß zunächst geprüft werden, ob die Stromstärke richtig eingestellt war. Dies kann aber nur mit Hilfe eines Meßinstrumentes (Ampèremeter) geschehen. Die geeichten Regler geben wohl die Stromstärke bei jeder Reglerstellung an, aber der angegebene Wert trifft nur bei einer bestimmten Spannung genau zu. Ist der Lichtbogen etwas länger, als der Eichung zugrunde gelegt wurde, oder sind größere Widerstände in den Stromzuführungen vorhanden, so stimmt die Angabe der Reglerskala nicht mehr. Wird nämlich die Maschine gezwungen, eine höhere Spannung abzugeben, so geht die Stromstärke in der Regel zurück.

Gerade im Stahlbau muß oft mit sehr langen Kabeln geschweißt werden, deren Widerstand unter Umständen sehr groß ist. Kommt dann vom Schweißer die Klage, das Schweißen bereite Schwierigkeiten, so genügt ein Blick auf die Meßinstrumente, um festzustellen, ob der Schweißer überhaupt genügend Strom erhält. Man findet dann unter Umständen, daß bei einer Spannung von vielleicht 50 V die Stromstärke nur noch 20 A beträgt, weil die Maschine bei dieser hohen Spannung fast den Punkt des Leerlaufes auf der Kennlinie der statischen Charakteristik erreicht hat.

10. Kräftige Bauart. Schweißgeräte sind im Betrieb den verschiedensten mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt, denen sie auf die Dauer nur dann standhalten können, wenn sie kräftig gebaut sind.

Viele Maschinen müssen häufig den Standort wechseln, deshalb sind sie in der Regel mit einem Fahrgestell ausgerüstet. Während bei Schweißumformern die Fahrgestelle fast immer sehr kräftig gebaut sind, so daß das Fahren mit diesen Maschinen weder schwierig ist, noch sie dadurch beschädigt werden können, haben Schweißgleichrichter und Umspanner in der Regel nur kleine Rollen. Sie können deshalb nur auf glatter, ebener Fahrbahn gefahren werden.

Bei Schweißumformern findet man in der Hauptsache vier Ausführungen von Fahrgestellen (Abb. 55):

- a) Einachsige Fahrgestelle mit außermittig angeordneter Achse.
- b) Einachsige Fahrgestelle mit mittig angeordneter Achse.
- c) Zweiachsige, dreirädrige Fahrgestelle.
- d) Zweiachsige, vierrädrige Fahrgestelle.

Die unter a) dargestellte Ausführung mit einer außermittig liegenden Achse ist für kleine, leichte Maschinen sehr gut geeignet. Derartige Maschinen können auch auf engen Wegen ähnlich wie Schubkarren leicht gefahren werden. Auch im Wege liegende Hindernisse, wie Schienen und kleine Werkstücke, oder Steine u. dgl. auf Baustellen, können mit ihnen ohne allzugroße Mühe überwunden werden.

Die zweite einachsige Ausführung mit mittig liegender Achse (Abb. 55 b) ist bei schwereren Maschinen üblich. Der Nachteil dieser Bauart besteht darin, daß sie beim Fahren auf- und abkippt, sie ist deshalb nur da am Platze, wo ein Standortwechsel nicht allzuoft vorkommt. Die beiden Stützen, von denen die eine gelegentlich mit einer Rolle versehen ist, erschweren das Überwinden von Hindernissen.

Die drei- und vierrädrige zweiachsige Bauart (Abb. 55 c und d) stellt die schwerste Ausführung dar. Für alle rauen Betriebe ist sie zu wählen, da sie es gestattet, auch schwere Maschinen ohne allzu große Mühe und Gefahr für die Maschine von Arbeitsplatz zu Arbeitsplatz zu schaffen.

Meist sind die Maschinen auch mit Ösen versehen, so daß sie an einen Kran gehängt und so versetzt werden können.

Eng mit dem Fahrgestell ist die Abfederung verbunden. Maschinen ohne Federung müssen sehr vorsichtig gefahren werden, da sie sonst beschädigt werden können. Die einfachste Art der Federung besteht in Vollgummireifen. Wird in der Werkstatt aber mit Elektrodenresten unvorsichtig umgegangen, so können die Gummireifen durch die heißen Abfallstücke schnell zerstört werden.

Wesentlich besser ist eine Federung durch Spiral- oder Blattfedern bzw. eine doppelte Federung durch Verbindung beider Federarten (Abb. 55 d). Maschinen mit derartigen Federn werden auch durch noch so häufiges Fahren auf unebenen Wegen nicht beschädigt.

Die meisten Hersteller rüsten ihre Maschinen nach Wunsch des Bestellers mit dem einen oder anderen Fahrgestell bzw. Federung aus. Auf Grund der bestehenden oder zu erwartenden Betriebsverhältnisse muß dann die Wahl getroffen werden.

Während die älteren Maschinen noch mit Gleitlagern ausgerüstet sind, besitzen die neuzeitlichen Maschinen Wälz- (Roll-) Lager. Maschinen mit Gleitlagern müssen stets waagrecht stehen, sonst können sie heißlaufen. Bei Maschinen mit Wälzlagern ist diese Vorsicht jedoch nicht nötig.

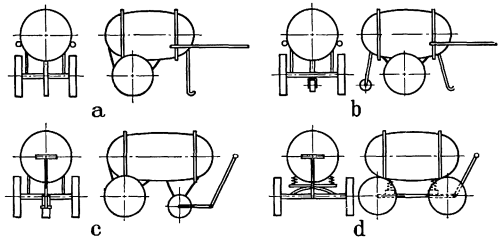


Abb. 55a bis d. Bauarten von Eingehäuseschweißumformern.

Die Drehzahl der Schweißmaschinen beträgt entweder rund 1500 oder rund 3000 Umdrehungen in der Minute. Bedenken, die früher von Praktikern gegen die Drehzahl von 3000 erhoben wurden, haben sich als unberechtigt erwiesen. Dem neuzeitlichen Maschinenbau bereitet diese Drehzahl bei Verwendung von Wälzlagern keine Schwierigkeiten mehr. Andererseits ermöglicht die höhere Drehzahl eine nicht unbeträchtliche Ersparnis an Gewicht.

Das Maschinengehäuse muß regensicher sein, damit die Isolierung nicht durch eindringendes Wasser beschädigt werden kann. Insbesondere müssen die Meßinstrumente gut abgedeckt sein.

11. Angemessener Preis. Noch vor einigen Jahren kostete ein Umformer der Regelgröße etwa 3000 R.M. Heute sind die Preise wesentlich zurückgegangen. Umformer und Gleichrichter kosten jetzt etwa die Hälfte, Umspanner nur wenig mehr als ein Viertel dieses Preises. Die Preise sind nicht nur abhängig von der Leistung, sondern auch von der Ausrüstung des Gerätes. Geräte ohne Fahrgestell sind wesentlich billiger als solche mit Fahrgestell. Auch die Ausrüstung mit Meßinstrumenten macht sich im Preise bemerkbar. Um in dieser Beziehung zu sparen, verwenden manche Hersteller umschaltbare Meßinstrumente, mit denen je nach der Schaltung abwechselungsweise die Stromstärke oder die Spannung gemessen werden kann.

Beim Vergleich der Leistung ist es zweckmäßig, vom DB auszugehen, um dadurch einen Maßstab für die Berechtigung des Preises zu gewinnen.

Der Anschaffungspreis sollte aber bei der Wahl eines Gerätes nicht allein den Ausschlag geben. Vorausgesetzt, daß das Gerät später dauernd benutzt wird, spielt nämlich der Preis des Gerätes bei den Gesamtkosten der Schweißarbeit keine ausschlaggebende Rolle.

Gediegene Bauart mag in der Anschaffung etwas teurer sein, bei den Unterhaltungskosten macht sie sich aber oft in Kürze bezahlt. Meßinstrumente können aber vor Fehlschweißungen bewahren, so daß die für sie aufzuwendenden Kosten gerechtfertigt sind.

2. Bauarten.

Folgende Bauarten werden unterschieden:

Schweißumformer, Schweißgeneratoren, Schweißgleichrichter, Schweißumspanner, Periodenumformer.

a) Schweißumformer. Die *Schweißumformer* genannten Maschinen bestehen aus einem Motor, der je nach der vorhandenen Stromart (Gleich- oder Drehstrom) und Spannung gebaut ist, und aus einem Generator, der durch den Motor angetrieben wird und den Schweißstrom (Gleichstrom von niederer Spannung) neu erzeugt.

Motor und Generator sind also in elektrischer Beziehung vollständig unabhängig voneinander, wenn sie auch meist in einem gemeinsamen Gehäuse untergebracht sind (Eingehäuseumformer) (Abb. 56).

Der Antriebsmotor, der der gesamten Maschine eine Drehzahl von rund 1500 oder rund 3000 Umdrehungen in der Minute verleiht, ist also entweder ein Gleichstrommotor oder ein Drehstrommotor. Wechselstrommotoren zum Antrieb von Schweißumformern sind nicht üblich, da Netze mit Ein- oder Zweiphasenwechselstrom kaum noch vorkommen. Die Drehstrommotoren sind als Kurzschlußläufer mit Stern-Dreieck-Schalter gebaut, besitzen also keine Bürsten.

Die eigentlichen Stromerzeuger werden nach den verschiedensten Grundsätzen gebaut. Je nachdem, wie der Magnetismus erregt wird, unterscheidet man fremd-erregte, eigenerregte und selbsterregte Maschinen.

Fremderregte Maschinen nehmen den zur Erzeugung des Magnetismus nötigen Gleichstrom entweder unmittelbar aus dem Netz, wenn dieses Gleichstrom führt, oder aber bei Drehstromnetzen über einen Trockengleichrichter.

Eigenerregte Maschinen besitzen eine besondere Erregermaschine, die mit der Motor- bzw. Generatorwelle gekuppelt ist. Selbsterregte Maschinen, meistens als Quersfeldmaschinen mit Ankerrückwirkung gebaut, erzeugen ihren Erregerstrom selbst.

Früher waren die Schweißmaschinen je nach Art der Erregung sehr verschieden, bei neuzeitlichen Maschinen spielt diese aber keine große Rolle mehr. Es werden jetzt Maschinen aller drei Systeme gebaut, deren Schweißmaschinen und sonstige Eigenschaften nicht wesentlich verschieden sind.

Es sei hier aber darauf aufmerksam gemacht, daß Quersfeldumformer älterer Bauart teilweise nicht umpolsicher sind. Bei diesen ist im Leerlauf lediglich der Remanenzmagnetismus vorhanden. Wird nun einer Maschine, z. B. wenn mehrere Maschinen an dem gleichen Werkstück oder der gleichen Schweißplatte arbeiten, in umgekehrter Richtung ein Strom aufgedrückt, so werden die Pole vertauscht, und der Schweißer, der z. B. den Minuspol an das Schweißkabel gelegt hatte, schweißt nun plötzlich mit dem Pluspol. In diesem Falle muß man die Maschine aus dem Betrieb nehmen und ihr von einer anderen Maschine aus durch Zusammenschließen des Schweißkabels der einen Maschine mit dem Werkstückanschlußkabel der anderen Maschine Strom wieder in der richtigen Richtung aufdrücken. Neuere Quersfeldmaschinen sind mit einem sicher wirkenden Umpolenschutz ausgerüstet. Die Preise von Gehäuse-schweißumformern können der Abb. 57 entnommen werden. In Sonderfällen, die aber hier nicht behandelt werden sollen, wird ein Antriebsmotor mit mehreren Stromerzeugern gekuppelt.

Größere Bedeutung haben jedoch sog.

Mehrstellenschweißumformer gewonnen, d. h. Maschinen, die so groß gebaut sind, daß sie für mehrere Schweißer zugleich den Strom liefern. Folgende Gründe haben zu dieser Bauart geführt:

In den meisten Schweißwerkstätten werden die Schweißmaschinen höchstens zu 50% der Arbeitszeit ausgenutzt, den Rest des Tages laufen sie leer, da die Schweißer mit Hilfs- und Zurichtarbeiten beschäftigt sind. Es liegt also der Gedanke nahe, z. B. je zwei Schweißer mit nur einem Umformer zusammen auszurüsten, um dadurch die Anschaffungskosten auf die Hälfte zu ermäßigen und den Leerlaufstromverbrauch zu sparen. Praktisch wird aber eine solche Arbeitsverteilung nicht möglich sein, es wird immer Augenblicke geben, in denen die beiden Schweißer zugleich schweißen wollen. Anders ist es, wenn einer Vielzahl von Schweißern eine entsprechend große Maschine zur Verfügung gestellt wird. Wird eine Einschaltdauer von z. B. 50% festgestellt, so kann für 10 Schweißer eine große Maschine beschafft werden, deren Leistung aber nur einem gleichzeitigen

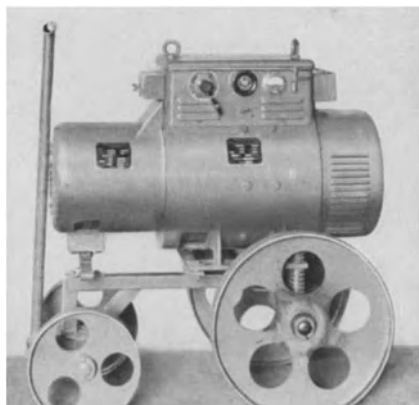


Abb. 56. Schweißumformer in Eingehäusebauart.

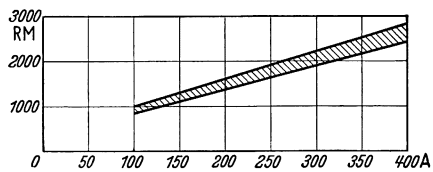


Abb. 57. Preise von Schweißumformern.

Stromverbrauch von 5 Schweißern gewachsen sein muß. Da derartige Maschinen überlastbar sind, so liefern sie auch kurzzeitig den Strom für mehr als 5 Schweißer. Die Schweißer müssen also nicht ängstlich darauf achten, daß nie mehr als 5 Mann zugleich schweißen. Diese Anlagen (Abb. 58) müssen jedoch so gebaut sein, daß nicht nur jeder Schweißer genau wie bei der Einstellenmaschine die für seine Elektrode richtige Stromstärke einstellen kann, sondern unabhängig von der Zahl der in jedem Augenblicke Schweißenden muß die einmal für einen Schweißplatz eingestellte Stromstärke gleich bleiben.

An der Maschine selbst kann nur die Klemmenspannung eingestellt werden, die Verteilung und Regelung der einzelnen Schweißströme muß mit Hilfe von *Regelwiderständen* an jedem Schweißplatz erfolgen.

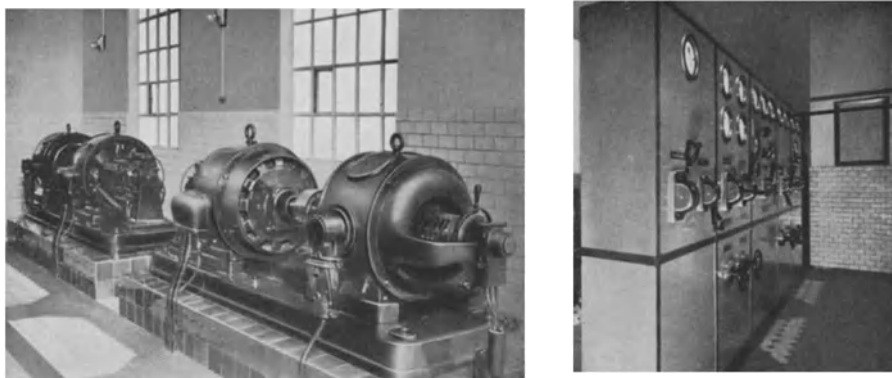


Abb. 58. Mehrstellen-Schweißanlage.

Der Schweißstromerzeuger erzeugt, da ein Teil der Spannung in den Regelwiderständen vernichtet wird, in diesem Falle eine verhältnismäßig hohe Spannung, nämlich etwa 40—60 V, je nach der Bauart der Maschine und der Art der Schweißarbeiten. Der Wirkungsgrad des Umformers ist bei solchen Spannungen verhältnismäßig hoch (bis zu 72 %). Leerlaufverluste kommen praktisch nicht in Betracht. Der Wirkungsgrad erniedrigt sich nun allerdings durch die Regelwiderstände auf ungefähr die Hälfte. Im Gesamtwirkungsgrade ist demnach eine Mehrstellenschweißanlage den einzelnen Umformern unterlegen. Ersparnisse ergeben sich aber aus den wesentlich geringeren Anschaffungskosten (Abb. 59) sowie aus dem Wegfallen der Leerlaufverluste.

Dem Entschluß, eine Mehrstellenanlage zu beschaffen, muß also eine genaue Berechnung vorangehen, dabei sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

Einschaltdauer, Anzahl der Schweißstellen, Strompreis.

Je geringer die Einschaltdauer, desto wirtschaftlicher die Mehrstellenanlage. Je größer die Anzahl der Schweißstellen ist, desto sicherer ist es, daß die Anzahl der Schweißer, die zu gleicher Zeit schweißen, dauernd in einem ungefähr gleichen Verhältnis zur Gesamtzahl der Schweißer steht, also in dem Verhältnis, das sich aus der Einschaltdauer ergibt.

Abb. 60 zeigt eine von E. HOLTEY¹ aufgestellte Darstellung der Wirtschaftlichkeit von Ein- und Mehrstellenanlagen. Den Kurven liegen die derzeitigen Preise und Wirkungsgrade von Ein- und Mehrstellenanlagen zugrunde, sowie eine Abschreibung von 20 % und ein Strompreis von 6 Rpf./kWh. Man sieht,

¹ Siemens-Zeitschrift 1935, S. 247 f.

daß von etwa 10 Stellen ab und bei einer Einschaltdauer von weniger als 50% der Vorteil auf Seiten der Mehrstellenanlage liegt. Der Einfluß des Strompreises ist in der ebenfalls von E. HOLTEY aufgestellten Abb. 61 dargestellt.

Mehrstellenanlagen sind in der Regel nicht fahrbar, sondern ortsfest. Sie können deshalb in schwerer Ausführung gebaut werden und sind Beschädigungen weniger leicht ausgesetzt als die meist fahrbaren Einstellenumformer.

Der Strom wird den Schweißstellen entweder in einem Sammelschienenkabel mit einzelnen Abzweigungen zugeleitet (Abb. 62), oder aber über Sammelschienen, die unter dem Boden der Werkstatt verlegt werden. In diesem Fall kann man die einzelnen Regelwiderstände unmittelbar auf die Sammelschienen aufsetzen (Abb. 63) und vermeidet so lange Kabel, die in der Werkstatt leicht beschädigt werden können.

b) Schweißgeneratoren. Auf Baustellen ist es manchmal schwierig, Anschluß an ein Stromnetz zu bekommen, das vielleicht weit entfernt ist, oder dessen Spannung, wie es gelegentlich bei veralteten Netzen vorkommt, so ungebräuchlich

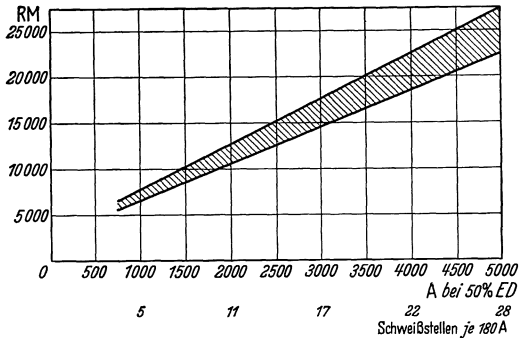


Abb. 59. Preise von Mehrstellen-Schweißanlagen.

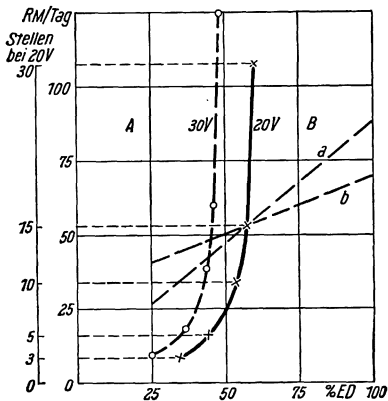


Abb. 60. Wirtschaftlichkeit bei Ein- und Mehrstellenumformern. A Gebiet der Mehrstellenanlage, a Mehrstellenanlage, B Gebiet der Einstellenanlage, b Einstellenumformer.

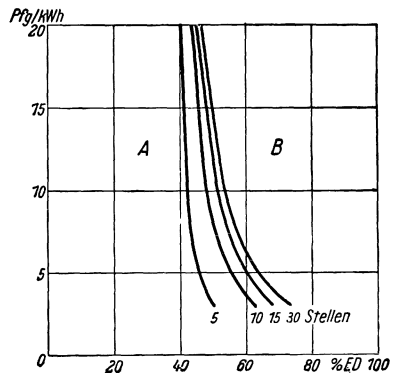


Abb. 61. Abgrenzung der Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit vom Strompreis. Schweißspannung 20 V. a Gebiet der Mehrstellenanlage, b Gebiet der Einstellenanlage.

ist, daß ein dazu passender Schweißumformer nur unter großen Schwierigkeiten beschafft werden kann.

In diesen Fällen muß der Schweißstrom mit Hilfe eines *Schweißgenerators*, d. h. einer durch einen Diesel- oder Otto- (Benzin-) Motor angetriebenen Maschine erzeugt werden. Eine derartige Maschine unterscheidet sich also von einem gewöhnlichen Schweißumformer in der Hauptsache dadurch, daß der Elektromotor durch einen Diesel- oder Ottomotor ersetzt ist. Der eigentliche Stromerzeuger aber ist häufig der gleiche, wie er bei Umformern eingebaut wird.

Früher wurden hauptsächlich Ottomotoren verwendet, diese werden aber immer mehr durch Dieselmotoren verdrängt. Der Preis eines Schweißgenerators

mit Ottomotor beträgt zwar nur 4000 RM., gegenüber etwa 4500 RM. für einen Generator mit Dieselmotor, dieser weist aber andere Vorteile auf.



Abb. 62. Sammelkabel für mehrere Schweißstellen.

den Dieselschweißgenerator-Betrieb gegenüber dem Ottoschweißgenerator-Betrieb. Eine derartige Ausnutzung der Schweißmaschine wird auf Baustellen tatsäch-



Abb. 63. Sammelschiene für mehrere Schweißstellen, mit aufgesetztem Regelwiderstand.

Hilfe eines Fernreglers möglich, was bei Baustellenarbeiten besonders vorteilhaft ist (Abb. 66).

Nach einer von E. HOLTEY¹ gemachten Untersuchung ist der Schweißgenerator mit Dieselmotor wesentlich billiger im Betrieb als der mit Ottomotor. Unter Zugrundelegung eines Preises von 0,40 RM. für Benzin, 0,13 RM. für Rohöl, einem Benzinverbrauch von 270 g/PSh, einem Rohölverbrauch von 200 g/PSh, errechnet er bei 8stündigem Vollastbetrieb für einen 16-PS-Motor eine Ersparnis von 10 RM./Tag für

den Dieselschweißgenerator-Betrieb gegenüber dem Ottoschweißgenerator-Betrieb. Eine derartige Ausnutzung der Schweißmaschine wird auf Baustellen tatsächlich wohl nie vorkommen, aber selbst für eine Einschaltdauer von nur 30% findet er eine Ersparnis von 3 RM./Tag, d. h. 900 RM. im Jahre. Gegenüber dieser großen Ersparnis an Betriebsstoffen dürften die höheren Beschaffungskosten des Dieselschweißgenerators keine Rolle spielen.

Für den Dieselmotor spricht weiter die einfachere Bauart, die sich besonders im Fehlen empfindlicher Teile, wie Vergaser, Zündmaschine und Batterie, Zündkerzen usw. äußert. Früher konnte gegen den Dieselmotor angeführt werden, daß er bei kaltem Wetter schlecht anspringt. Dies trifft für neuzeitliche Motoren nicht mehr zu.

Entsprechend den Betriebsbedingungen, denen Dieselschweißgeneratoren in der Regel unterworfen sind, ist ihre Bauart sehr kräftig. Auch werden sie in der Regel mit einem wettersicheren Schutzgehäuse ausgerüstet (Abb. 64). Zur Beförderung auf die Baustelle werden sie an einen Lastkraftwagen angehängt, wenn sie nicht eigenen Fahrtrieb besitzen (Abb. 65). Meistens ist auch die Regelung mit

¹ Siemens-Zeitschrift 1937, S. 380 f.

Mehrstellenschweißanlagen mit Dieselmotorantrieb sind bis jetzt nur für Schiffe gebaut worden (Abb. 67). Das Schiff selbst wird während der Fahrt durch den vom Dieselmotor erzeugten Strom elektrisch angetrieben. Es steht natürlich nichts im Wege, derartige Mehrstellengeneratoren (Abb. 68) für den Landbetrieb zu bauen, vorausgesetzt, daß die Verhältnisse an den Baustellen es gestatten, mit so schweren Anlagen, wie sie dazu notwendig sind, heranzufahren.

c) Schweißgleichrichter.

Die großen Erfolge, die auf vielen Gebieten mit Gleichrichtern errungen wurden, haben dazu geführt, auch für den Schweißbetrieb Gleichrichter zu bauen, um den Drehstrom des Netzes

in Gleichstrom zu verwandeln. Schweißgleichrichter bestehen aus zwei getrennten, aber in einem gemeinsamen Gehäuse untergebrachten Teilen, aus dem Umspanner und aus dem eigentlichen Gleichrichter.

Der Umspanner hat die Aufgabe, die hohe Netzspannung auf die Schweißspannung herabzusetzen bei gleichzeitiger, entsprechender Vergrößerung der Stromstärke. Man verwendet Drehstromumspanner, die alle drei Phasen des Netzes gleichmäßig belasten. Die Stromstärke kann, wie dies bei Umspannern üblich ist, durch Anzapfung, Veränderung der Streuung oder auf einem anderen der unten erwähnten Wege verändert werden.

Hinter den Umspanner ist der Gleichrichter geschaltet, der den vom Umspanner ausgehenden Drehstrom niederer Spannung in Gleichstrom verwandelt.

Zwei Ausführungsarten sind bis jetzt gebaut worden:

Gleichrichter mit Glühkathodenröhren und Gleichrichter mit Metallgleichrichterplatten.

Bei beiden Arten wirkt der Gleichrichter als ein Ventil, das den Strom nur in einer Richtung hindurchläßt. Da vom Umspanner her Drehstrom in kurzen, schnell aufeinanderfolgenden Stößen in den Gleichrichter gesandt wird, so sendet auch dieser einzelne Stromstöße. Diese kommen aber in schneller Folge in sich überlagernden Wellen in einer Richtung, so daß ein Strom erzeugt wird, der sich praktisch nicht von dem Gleichstrom unterscheidet, der von einem Umformer ausgeht.

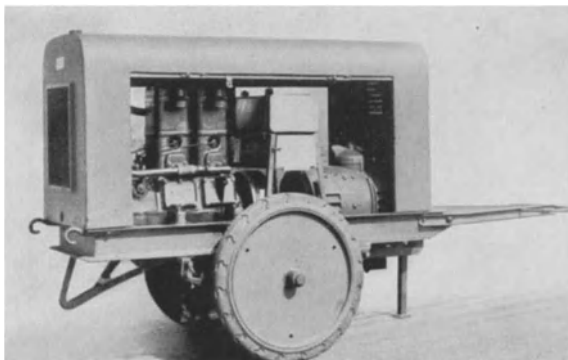


Abb. 64. Dieselschweißgenerator.



Abb. 65. Dieselschweißgenerator mit eigenem Fahrtrieb.

Die Gleichrichterröhren bzw. -platten müssen gekühlt werden. Zu diesem Zweck ist ein besonderer, durch einen Elektromotor angetriebener Lüfter eingebaut.



Abb. 66. Dieselschweißgenerator mit Fernregler.

Der Vorteil gegenüber Schweißumformern besteht zunächst darin, daß keine sich abnützenden Teile, wie Bürsten oder Lager, die der Wartung bedürfen, vorhanden sind mit Ausnahme des Lüfters und seines Motors.

Die Röhren haben jedoch den Nachteil, daß sie aus Glas bestehen. Sie können deshalb bei unvorsichtiger Behandlung beschädigt werden. Sie sind aus diesem Grunde im Innern des Gerätes federnd aufgehängt (Abb. 69). Ob dies aber genügt, um eine vorzeitige Zerstörung mit Sicherheit auszuschließen, muß erst die Erfahrung lehren. An sich ist die Lebensdauer der Röhren beschränkt. Im allgemeinen wird eine Brenndauer von 2500 Stunden von seiten des Herstellers gewährleistet, das ist bei 50 % iger Einschalt-dauer ein Zeitraum von etwa 2 Jahren.

Gleichrichterplatten (Abb. 70) haben dagegen eine praktisch unbegrenzte Lebensdauer. Allerdings altern sie im Laufe der Zeit infolge einer allmählich zunehmenden Erhöhung des inneren Widerstandes der Zellen. Diese Alterung ist nach etwa 7000—8000 Stunden beendet. Durch eine Anzapfung des Umspanners kann sie aber dann wieder ausgeglichen werden, so daß ihre Bedeutung gering ist.



Abb. 67. Schiff mit dieselgetriebener Mehrstellenschweißanlage.

Bezüglich des Wirkungsgrades und des Leistungsfaktors unterscheiden sich Gleichrichter nicht wesentlich von guten Umformern. Die Schweißbeigenschaften sind sehr gut.

Schweißgleichrichter sind nunmehr lange genug im Betriebe, um ein endgültiges Urteil

über sie abgeben zu können. Die Preise der Schweißgleichrichter waren vor kurzer Zeit noch bedeutend höher als die der Umformer gleicher Leistung. Dies hat sich jedoch geändert. Heutzutage sind keine wesentlichen Unterschiede in den Preisen dieser beiden Geräte mehr vorhanden.

d) Schweißumspanner. Schweißumspanner haben die Aufgabe, Drehstrom oder Wechselstrom der gewöhnlichen Netzspannung (meist 220/380 V) in niedergespannten, für das Lichtbogenschweißen geeigneten Wechselstrom zu verwandeln.

Sie bestehen aus einem Eisenkern, der mit zwei Wicklungen, der Ober- und der Unterspannungswicklung, versehen ist. Während des Betriebes müssen sie gekühlt werden und zwar entweder durch Luft oder durch Öl. Das Gehäuse der luftgekühlten Umspanner (Abb. 71) ist mit Löchern oder Schlitzen versehen, damit die Luft leicht hindurchstreichen kann. Ölgekühlte Umspanner besitzen meist ein mit Kühlrippen versehenes Stahlblechgehäuse (Abb. 72).

Die Stromstärke der Umspanner kann geregelt werden durch Änderung des Übersetzungsverhältnisses, durch Drosselspulen oder durch Veränderung der Streuung des Umspanners.

Zur Änderung des Übersetzungsverhältnisses kann entweder die Ober- oder die Unterspannungswicklung angezapft werden. Eine solche Anzapfung kann nur in bestimmten Stufen, nicht aber stufenlos erfolgen. Auf die Gefährlichkeit des Anzapfens, wenn die Anzapfbuchsen nicht isoliert sind, wurde oben schon hingewiesen. Auch bei der Regelung durch Drosselspulen werden häufig einige Windungen angezapft, eine stufenlose Regelung ist also auch in diesem Falle dann nicht durchführbar.

Die Änderung der Streuung ist auf die verschiedensten Arten möglich. So kann z. B. der Luftspalt geändert, die beiden Wicklungen können gegeneinander verschoben werden, ebenso wie ein Streueisenpaket verstellt werden kann. Alle diese Änderungen sind stufenlos ausführbar. Nicht selten findet man auch eine Vereinigung der einzelnen Regelarten.

Die Preise der Umspanner liegen ganz wesentlich unter denen der Umformer (Abb. 73). Diesen gegenüber weisen sie Vorteile, aber auch nicht unbedeutliche Nachteile auf. Als Vorteil ist neben dem niedrigeren Preis der gute Wirkungsgrad (Abb. 50) anzusehen, diesem steht aber als Hauptnachteil der geringe Leistungsfaktor gegenüber (Abb. 51). Der Leistungsfaktor kann durch Einbau eines Kondensators auf etwa 0,8 erhöht werden, so daß diese Schwierigkeit verschwindet.

Umspanner werden in der Regel nur zweiphasig an das Drehstromnetz angeschlossen. Dadurch können bei kleineren Netzen Schwierigkeiten entstehen, weil die ungleichmäßige Belastung der einzelnen Phasen den Betrieb anderer

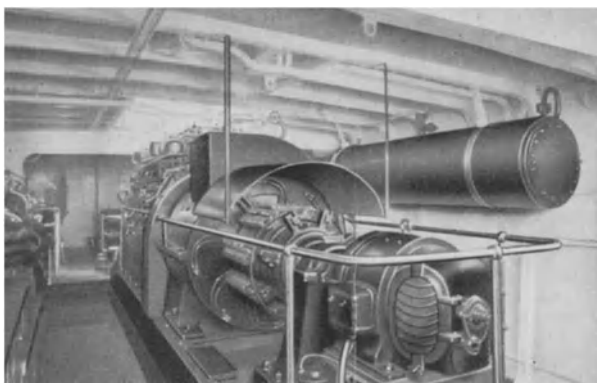


Abb. 68. Dieselgetriebene Mehrstellenschweißanlage auf einem Schiff.

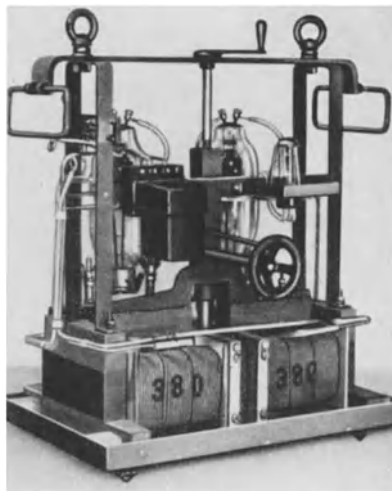


Abb. 69. Schweißgleichrichter mit Glasröhren (Schutzhaube abgenommen).

Stromverbraucher stören kann. Es gibt wohl auch Umspanner mit dreiphasigem Anschluß, aber auch diese belasten das Netz nicht ganz gleichmäßig.

Die mechanische Ausführung der meisten Schweißumspanner ist noch nicht so, wie man es von den Umformern her gewöhnt ist. Zwar fehlen bewegliche, sich

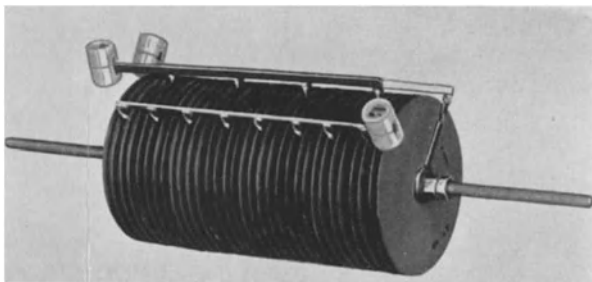


Abb. 70. Gleichrichterplattensatz eines Schweißgleichrichters.

abnutzende Teile, wie Lager, Bürsten u. dgl., bei schonendem Betrieb braucht also praktisch mit keinen Unterhaltungskosten gerechnet zu werden, jedoch läßt in vielen Fällen die Bauart des Gehäuses und des Fahrgestelles zu wünschen übrig. Für Baustellen sind jedenfalls Umspanner mit Holzgehäusen und kleinen Gußrollen wenig geeignet, ebenso wie luftgekühlte Umspanner mit Schlitzen oder Löchern in der oberen Abdeckplatte im Freien nicht verwendet werden können.



Abb. 71. Luftgekühlter Schweißumspanner.



Abb. 72. Ölkühlter Schweißumspanner.

Mehrstellenumspanner sowie fernregelbare Umspanner sind bis jetzt noch nicht auf dem Markt, doch dürfte ihre Herstellung wohl technisch möglich sein.

Bei der Frage, ob ein Umformer oder ein Umspanner beschafft werden soll, ist in erster Linie zu berücksichtigen, daß Umspanner Wechselstrom liefern, mit dem die billigen nackten Elektroden nicht verschweißt werden können. Werden allerdings sowieso aus anderen Gründen nur getauchte oder ummantelte Elektroden verschweißt, so spielt dieser Punkt keine Rolle. Bezüglich der Güte ist zu sagen, daß bei Verwendung guter umhüllter Elektroden kein Unterschied zwischen der Gleichstrom- und der Wechselstromschweißung besteht. Bemerkenswert ist aber, daß die derzeit im Handel befindlichen Nichteisenmetall-Elektroden, obgleich sie umhüllt sind, nur mit Gleichstrom, also nur mit Hilfe von Umformern oder Gleichrichtern verschweißt werden können.

Schließlich sei noch darauf hingewiesen, daß, wie noch später ausgeführt wird, Gleichstrom bei gleicher Nennspannung für ungefährlicher gehalten wird als Wechselstrom.

e) **Periodenumformer.** Um zwei Nachteile der Umspanner zu vermeiden, nämlich die ungleiche Belastung des Netzes sowie die Unmöglichkeit, nackte Elektroden zu verschweißen, sind besondere Maschinen gebaut worden, nämlich Periodenumformer.

In ihrem äußeren Aufbau sind sie den gewöhnlichen Gleichstrom erzeugenden Schweißumformern ähnlich. Sie haben wie diese dreiphasigen Anschluß mit drei gleich belasteten Phasen, erzeugen jedoch Wechselstrom von 150—200 Perioden. Trotz dieser gegenüber der gewöhnlichen Periodenzahl (50 Perioden) erheblich vergrößerten Frequenz lassen sich doch keine nackten Elektroden damit verschweißen. Dies ist der Grund dafür, daß derartige Maschinen, obgleich ihr Preis wesentlich geringer ist als der eines Umformers gleicher Leistung, bis jetzt noch wenig Eingang in die Praxis gefunden haben.

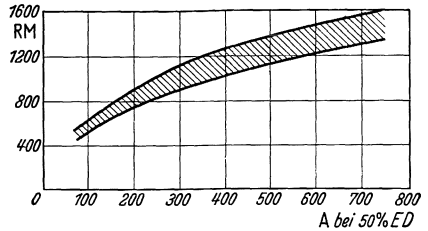


Abb. 73. Preise von Schweißumspannern.

D. Selbsttätige Schweißeinrichtungen.

Zweck. Die eigentliche Tätigkeit des Schweißers besteht darin, daß er die Elektrode entsprechend ihrem allmählichen Abbrennen nachschiebt, wobei er den Lichtbogen so kurz wie möglich halten muß. Außerdem muß er ihr bei breiteren Nähten eine pendelnde Bewegung quer zur Nahtichtung verleihen und sie entsprechend dem Fortschreiten der Naht in der Nahtichtung weiter führen. Dazu kommen noch die Nebenarbeiten, wie Auswechseln der Elektroden, Reinigen der Naht usw.

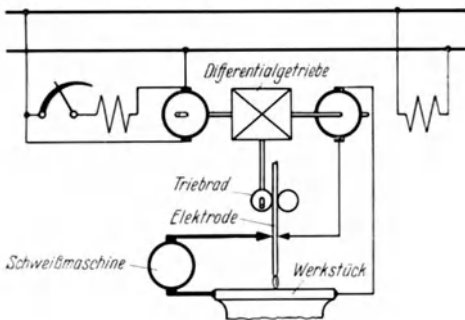


Abb. 74. Schema einer selbsttätigen Schweißeinrichtung.

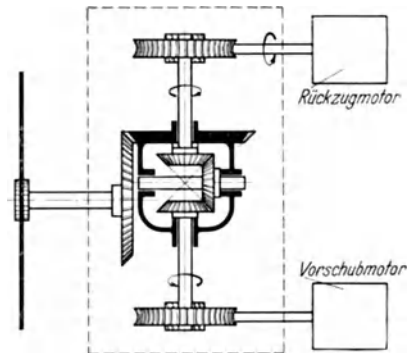
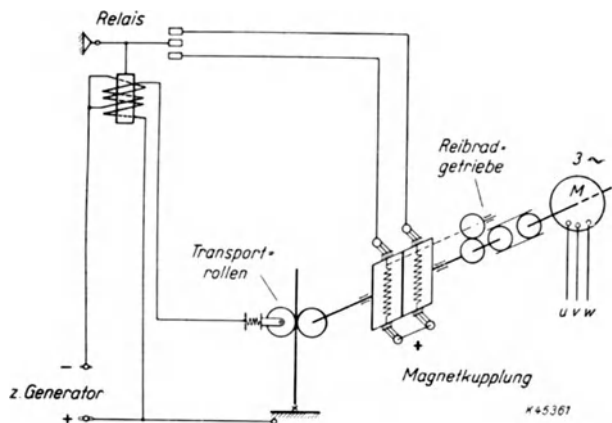


Abb. 75. Zahnradgetriebe einer selbsttätigen Schweißeinrichtung.

Die erstgenannten Tätigkeiten erfordern eine große Sorgfalt. Je kürzer der Lichtbogen ist, desto besser wird die Güte der Naht, wie weiter unten erläutert werden wird. Das Einhalten eines kurzen Abstandes zwischen der Elektrodenspitze und der Naht verlangt aber eine große Aufmerksamkeit und ist deshalb, besonders bei langen Nähten, bei denen der Schweißer nicht durch andere Arbeiten aufgefrischt wird, auf die Dauer sehr ermüdend.

Um dem Schweißer die Arbeit zu erleichtern und gleichzeitig die Gewißheit zu schaffen, daß unabhängig vom Einfluß des Schweißers die Nähte die größtmöglichen Gütewerte erreichen, sind selbsttätige Schweißeinrichtungen gebaut worden.



Grundsätzliche Bauweise.

Das Hauptbestandteil aller selbsttätigen Lichtbogenschweißeinrichtungen ist der Schweißkopf, der den Draht entsprechend dem Abbrand des Lichtbogens vorschubt und ihm gleichzeitig kurz vor seinem unteren Ende den Schweißstrom zuführt (Abb. 74). Der Draht ist in der Regel aufgerollt.

Der Vorschub des Drahtes wird durch ein oder zwei Motoren geregelt. Von der Drehzahl sowie von der Drehrichtung der Motoren hängt der Vorschub ab. In der Regel arbeiten sie über ein Getriebe mit Zahnrädern (Abb. 75) oder über Reibräder mit gegenläufigen Magnettöpfen (Abb. 76).

Es kann nun z. B. der eine Motor mit gleichbleibender Drehzahl laufen, während die Drehzahl des anderen Motors von der Lichtbogenenspannung abhängt. Aus dem Verhältnis der beiden Drehzahlen ergibt sich dann die größere oder geringere Vorschubgeschwindigkeit oder gar ein Zurückziehen der Elektrode. Das gleiche kann aber auch dadurch erreicht werden, daß durch Relais bald dem einen, bald dem anderen Magnettopf der Strom zugeführt wird, der dann über das Reibradgetriebe den Drahtvorschub regelt.

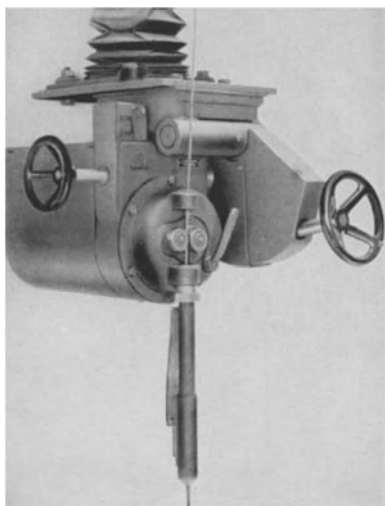


Abb. 77. Schweißkopf einer selbsttätigen Schweißeinrichtung für das Verschweißen nackter Drähte.

Die Ansicht eines Schweißkopfes zeigt Abb. 77. Mit derartigen Anlagen können aber nur blanke oder Seelenelektroden verschweißt werden, nicht aber umhüllte Elektroden, da bei diesen die Stromzufuhr durch einen Schleifkontakt oder durch eine Kontaktrolle infolge der isolierenden Wirkung der Umhüllung unmöglich ist.

Außerdem können umhüllte Elektroden auch nicht aufgerollt werden, da sonst die Umhüllung abplatzt.

Die verschiedensten Versuche sind gemacht worden, um auch umhüllte Elektroden auf diese Weise zu verschweißen. So hat man z. B. umhüllte Elektroden von größerer Länge (1 m und mehr), deren Herstellung an sich schon schwierig ist, eingespannt und ihnen den Strom durch Anfräsungen der Umhüllung zugeführt. Nach einem anderen Verfahren werden die Elektroden durch Kupplungsmuffen

zusammengeschraubt und der Strom durch die Muffen zugeführt. Diese Versuche haben aber nur in seltenen Fällen zu einem befriedigenden Ergebnis geführt.

Bei einem neueren Verfahren werden in den Schweißkopf jeweils zwei umhüllte Elektroden gewöhnlicher Ausführung eingespannt, die in spitzem Winkel zueinander stehen (Abb. 78). Diesen Elektroden wird der Strom in der gleichen Weise wie beim Handschweißen am oberen Ende zugeführt. Mit der einen Elektrode wird geschweißt. Sie bewegt sich dabei langsam entsprechend dem Abbrand nach unten. In dem Augenblick, in dem sie zu Ende geht, schiebt sich die zweite Elektrode vor, zündet ihren Lichtbogen im Lichtbogen der ersten und schweißt weiter. Der Halter der ersten Elektrode wandert nach oben und wird mit einer neuen Elektrode versehen. Dieses Verfahren ist noch neu, so daß noch nichts über seine tatsächliche Bewährung in der Praxis gesagt werden kann, doch zeigt es einen neuen, wahrscheinlich auch erfolgversprechenden Weg.

Schweißköpfe für die Kohlelichtbogen-schweißung arbeiten meist in ähnlicher Weise wie die zuerst geschilderten Schweißköpfe, nur ist der Vorschub dem langsameren Kohlenabbrand entsprechend erheblich langsamer, auch sind sie häufig mit zusätzlichen Geräten ausgerüstet.

Der Kohlelichtbogen, der etwas länger gehalten wird als der Eisenlichtbogen (bis 45 V), ist Blaswirkungen gegenüber besonders empfindlich. Aus diesem Grunde versieht man Kohlelichtbogen-Schweißköpfe mit Blasspulen, die den Lichtbogen geradeaus blasen. In der Regel wird, wenn nicht gerade Bördelnähte geschweißt werden, dem Lichtbogen ein Zusatzwerkstoff in Gestalt eines Schweißdrahtes zugeführt. Da der Kohlelichtbogen eine stark oxydierende Wirkung ausübt, und deshalb die Nähte leicht hart und spröde werden, muß für eine Desoxydation gesorgt werden. Zu diesem Zweck wird dem Lichtbogen eine Papierkordel von der Seite her zugeführt, die im Lichtbogen verbrennt und dadurch einen Teil des Sauerstoffes unschädlich macht. Abb. 79 zeigt einen Schweißkopf mit angebauten Zusatzgeräten, die den Draht und die Papierkordel ununterbrochen von der Seite her zuführen.

Der eigentliche Schweißkopf sorgt also nur für den regelmäßigen Vorschub der Elektroden sowie für die Zufuhr etwaiger Zusatzwerkstoffe. Wird er mit einer besonderen Vorrichtung versehen, so kann er auch quer zur Naht pendeln, so daß die Nahtfuge in ihrer Breite ausgefüllt wird. Es fehlt aber noch die Bewegung in der Längsrichtung der Naht.

Zu diesem Zweck wird der Schweißkopf an eine Laufkatze angebaut (Abb. 80), wenn nicht auf andere Weise bei feststehendem Schweißkopf für eine Bewegung des Werkstückes in der Nahrichtung gesorgt wird.

Derartige Laufkatzen müssen so gebaut sein, daß jede beliebige Fahrgeschwindigkeit eingestellt werden kann, auch ist es zweckmäßig, die Bewegung der Katze mit dem Lichtbogen zu koppeln. Dann kann die Einrichtung z. B. so arbeiten, daß bei ungewolltem Abreißen des Lichtbogens die Katze entweder

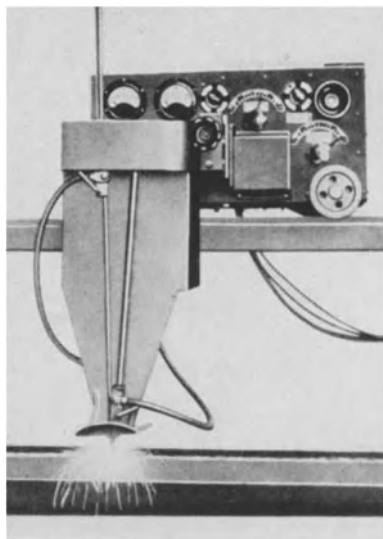


Abb. 78. Schweißeinrichtung zum Verschweißen von umhüllten Drähten.

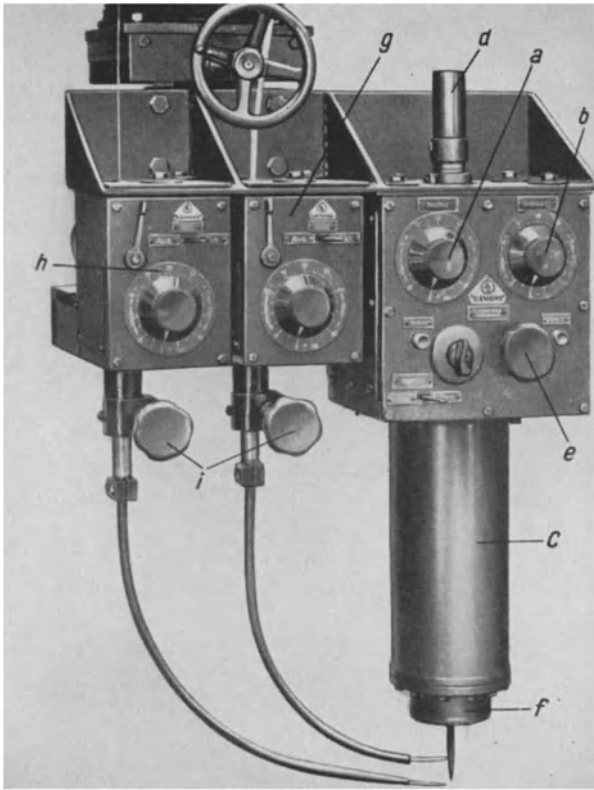


Abb. 79. Kohlelichtbogenschweißkopf mit Zuführung von Draht und Papierkordel. *a* Regler für die Blasspule *b* Regler für die Lichtbogenspannung, *c* Blasspule, *d* Spannzange, *e* Knebel zur Entkupplung des Triebrades, *f* Stromzuführungsdrüse, *g* Zuführgerät für Papierkordel, *h* Zuführgerät für Zusatzdraht, *i* Verstellvorrichtung für die Düse.

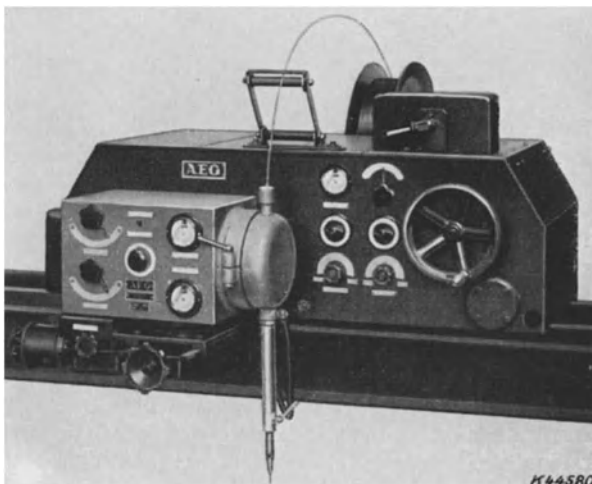


Abb. 80. Vollständiger Draht-Lichtbogenschweißautomat mit Pendelgetriebe.

stillsteht oder ein kurzes Stück bis zum Wiederzünden zurückfährt, so daß eine lückenlose Naht gewährleistet ist. Sollen statt durchlaufender Nähte unterbrochene Nähte geschweißt werden, so kann durch Kurvenscheiben die Katzfahrt über die Dauer der Lücke beschleunigt werden, während gleichzeitig der Schweißstrom abgeschaltet wird.

Für Sonderzwecke, wie z. B. für das Aufschweißen von Rippenplatten auf Schwellen, kann der Schweißkopf einer Kurve entlang geführt werden, während er für das Schweißen großer Stücke zusammen mit der Laufkatze an einem Portalcran befestigt werden kann, dessen Fahrwerk unter Umständen auch mit dem Katzfahrwerk und dem Schweißstrom gekuppelt wird (Abb. 81).

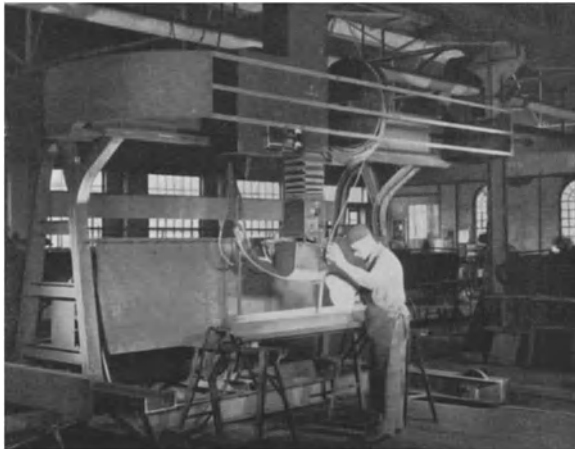


Abb. 81. Selbsttätige Lichtbogenschweißeinrichtung mit Laufkatze- und Portalfahrwerk.

Die selbsttätige Lichtbogenschweißung kommt natürlich nur für Massenfertigung oder bei der Einzelfertigung für lange Nähte, z. B. Halsnähte an Brückenträgern, in Betracht. Bei stets wechselnden Werkstücken mit kurzen Nähten ist sie unwirtschaftlich. Man kann mit selbsttätigen Schweißeinrichtungen zwar waagrecht oder in manchen Fällen auch senkrecht schweißen, für die Überkopfschweißung kommt sie jedoch nicht in Frage.

E. Zubehör.

Schweißzangen für die Metalllichtbogenschweißung. Schweißzangen, auch Schweißkolben oder Elektrodenhalter genannt, müssen folgenden Anforderungen genügen:

Gefahrlose Handhabung, sicheres Halten und leichte Auswechselbarkeit der Elektroden, dauerhafte Ausführung, geringes Gewicht, geringe Herstellungskosten.

Die verschiedensten Ausführungsarten befinden sich auf dem Markt, die mehr oder weniger den erwähnten Bedingungen entsprechen (Abb. 82).

Bei den Schweißzangen mit Federn wird man meist nach einiger Zeit ein Nachlassen der Federn feststellen, andererseits ermüdet ihre Handhabung den Schweißer weniger als die der Schweißzangen mit Klemmhebel. Auf gute Isolierung ist besonders zu achten, da gerade durch das Berühren ungeschützter Teile der Schweißzangen leicht Unfälle entstehen können. In neuerer Zeit werden sie auch aus Aluminium hergestellt, wodurch eine bedeutende Gewichtsverminderung gegenüber den früheren, aus Kupfer bestehenden Schweißzangen

erzielt wird. Ausführungen, bei denen die Elektroden durch Schrauben festgehalten werden, haben sich nicht bewährt, da die Gewinde durch die unvermeidlichen Elektrodenspritzer nach kurzer Zeit unbrauchbar werden.

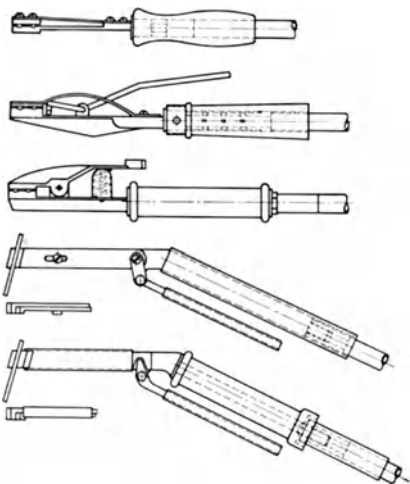


Abb. 82. Schweißzangen für Stahlschweißdrähte.

Schweißzangen für die Kohlelichtbogenschweißung. Sollen Kohleelektroden von 10 und mehr Millimeter Durchmesser verschweißt werden, so verwendet man Elektrodenhalter mit festschraubbaren Klemmvorrichtungen (Abb. 83). Ein Unbrauchbarwerden der Gewinde ist ja bei der Kohlelichtbogenschweißung nicht zu befürchten, da hier keine Elektrodenspritzer vorkommen.

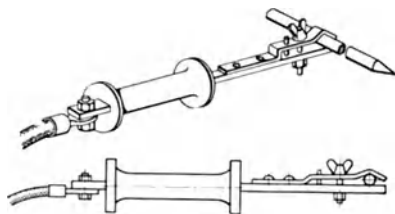


Abb. 83. Schweißzange für Kohleelektroden.

Für die Dünnblechschweißung werden Elektroden von 3—6 mm verwendet, die zweckmäßig in besonderen, mit einer Blasspule zur Stabilisierung des Lichtbogens versehenen Schweißkolben verschweißt werden (Abb. 84).

Ein neuartiges Gerät stellt Abb. 85 dar, einen Kohleelektrodenhalter mit Wasserkühlung und Blasspule für Elektroden von 6—15 mm Durchmesser. In eigenartiger Weise wird der Strom durch eine blanke Kupferlitze, die in dem Wasserschlauch liegt, zugeführt.

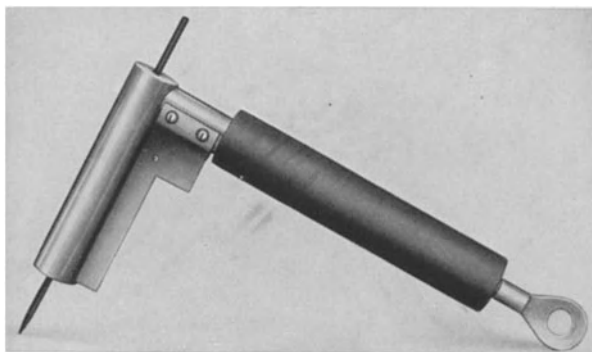


Abb. 84. Schweißzange für Kohleelektroden mit Blasspule zur Stabilisierung des Lichtbogens.

Schweißkabel. An die Schweißkabel werden folgende Anforderungen gestellt:

Geringes Gewicht, große Biegsamkeit, ausreichender Querschnitt, gute Isolierung und betriebssichere Bauart.

Die beiden ersten Forderungen stehen meistens im Gegensatz zu den drei

letzten genannten Forderungen. Man hilft sich häufig dadurch, daß man für die letzten 2—5 m, die der Schweißer in der Hand hält, eine besonders leichte, auch dünnere und biegsamere Ausführung wählt, als für die übrige Länge und für das Werkstückanschlußkabel. Den Schweißkabeln muß im Betriebe immer große Sorgfalt zuteil werden, da sie Beschädigungen sehr leicht ausgesetzt sind. Besonders die Gummiumhüllung ist empfindlich. Allerdings hat gerade in dieser Beziehung

die Verwendung von künstlichem Kautschuk, der gegenüber Öl und Hitze fast vollständig unempfindlich ist, einen großen Fortschritt gebracht.

Ist der Kabelquerschnitt zu gering, so tritt bei langen Leitungen ein empfindlicher Spannungsabfall auf. Abb. 86 zeigt den Spannungsverlust für 2×20 m Schweißkabel und Werkstückanschlußkabel in Abhängigkeit von der Stromstärke und dem Kabelquerschnitt. Müssen auf Baustellen sehr lange Leitungen verwendet werden, so ist es vorteilhaft, je 2 Kabel für eine Schweißstelle parallel zu schalten und nur für die letzte Strecke (etwa 5 m) ein Kabel anzuschließen. Auf diese Weise bleibt der Spannungsabfall gering, und der Schweißer wird doch nicht durch ein zu schweres Kabel beim Schweißen gehindert.

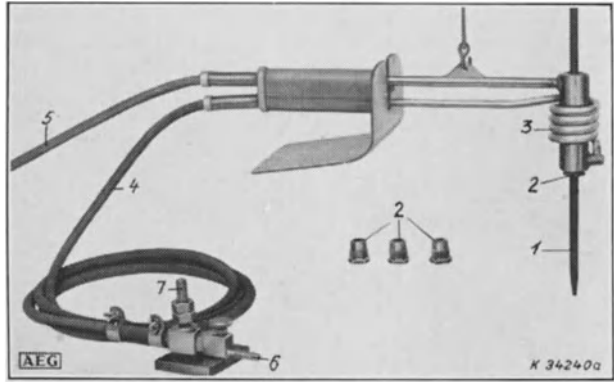


Abb. 85. Wassergekühlte Schweißzange für Kohleelektroden und Blaspule zur Stabilisierung des Lichtbogens. 1 Kohlestab, 2 Spanneinsatz, 3 Blaspule, 4 Schlauchkabel, 5 Wasserabfluß, 6 Wasseranschluß, 7 Stromanschluß.

Die Verbindungsstellen der Kabel untereinander sowie mit der Schweißzange müssen, um Unfälle zu vermeiden, besonders geschützt werden. Es ist zweckmäßig, an der Anschlußstelle des Elektrodenhalters ein Stück Gummischlauch überzuschieben, da sonst leicht eine Knickstelle entsteht, und die Isolierung beschädigt wird.

Werkstückanschlußklemme. Das Werkstückanschlußkabel muß mit Hilfe einer Klemme mit dem Werkstück gut leitend verbunden werden. Meist besitzen diese Klemmen, auch Polzwingen ge-

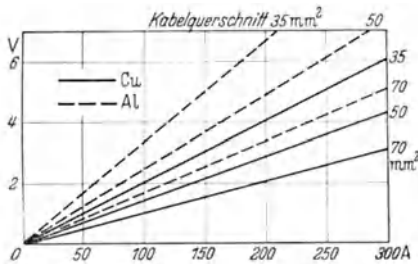


Abb. 86. Spannungsverlust in Schweißkabeln.

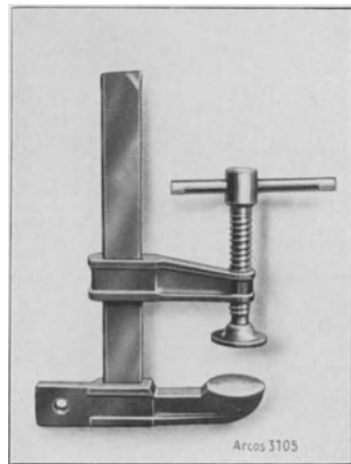


Abb. 87 Verstellbare Werkstückanschlußklemme.

annt, Schrauben, mit denen sie fest angeklemt werden können. Abb. 87 zeigt eine verstellbare Klemme. Auf gut leitende Verbindung mit dem Werkstück muß besonders geachtet werden, da bei Stromunterbrechungen der Lichtbogen abreißt. Sitzt die Klemme nicht fest (Wackelkontakt), so bildet sich leicht zwischen ihr und dem Werkstück ein Lichtbogen, so daß eine Schmorstelle entsteht. Muß der Schweißer, um die Blaswirkung zu beherrschen, den Werkstückanschluß

häufig versetzen, so empfiehlt es sich, das Werkstückanschlußkabel mit einem schweren Kupferklotz oder einer Kupferplatte zu verbinden. Ist das Gewicht groß genug, so genügt das einfache Auflegen des Klotzes, andererseits kann er auch ohne Zeitverlust an eine andere Stelle verschoben werden. Bei selbsttätigen Schweißvorrichtungen verwendet man auch gelegentlich Schleifkontakte.

Werkzeuge zum Reinigen der Schweißnähte. Schweißnähte, die mit nackten Elektroden geschweißt werden, sind an der Oberfläche mit einer staubartigen, braunen Schicht bedeckt. Nach Fertigstellen der Naht, bzw. vor Auftragen einer zweiten Lage, muß diese Schicht abgeburstet werden. Dies geschieht zweckmäßig mit einer Stahldrahtbürste (Abb. 88).

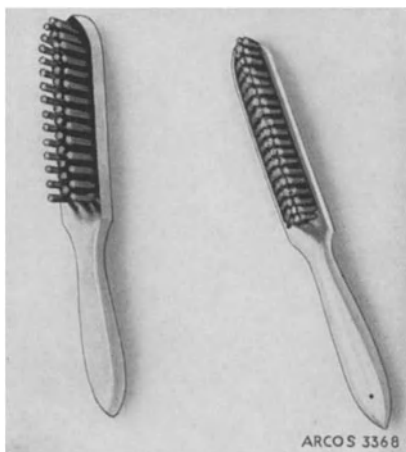


Abb. 88. Stahldrahtbürsten zum Reinigen von Schweißnähten.

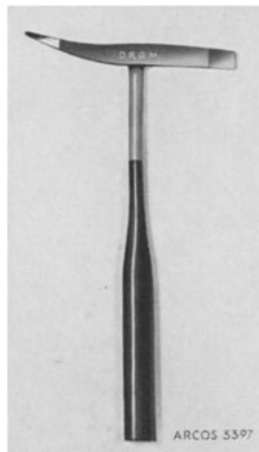


Abb. 89. Spitzhammer zum Abklopfen der Schlacke.

Nähte, die mit umhüllten Elektroden geschweißt wurden, sind von einer glasartigen Schlackenschicht bedeckt. Diese muß abgeklopft werden und zwar am besten mit Hilfe eines Spitzhammers. Abb. 89 zeigt einen Spitzhammer, mit dem man auch schwierig zugängliche Nahtstellen erreichen kann.

Es ist weiter zweckmäßig, den Schweißer mit einer Zange auszurüsten, damit er heiße Werkstücke und Elektrodenreste anfassen kann, ohne sich bzw. seine Handschuhe zu verbrennen.

F. Unfallverhütung bei der Elektroschmelzschweißung.

Unfälle bei der Elektroschmelzschweißung können verursacht werden durch: den elektrischen Strom, die Strahlen des Lichtbogens, die sich bildenden Gase, glühende Eisenspritzer u. dgl.

Unfälle durch den elektrischen Strom. Die Spannung des Lichtbogens von 15—45 V ist so gering, daß bei brennendem Lichtbogen der Schweißer im allgemeinen keinen Gefahren ausgesetzt ist. Der Widerstand des menschlichen Körpers ist so groß, daß der Strom den wesentlich bequemeren Weg durch den Lichtbogen und nicht durch den Körper nehmen wird.

Anders ist es, wenn der Lichtbogen noch nicht gezündet ist. Die volle Leerlaufspannung, die bei älteren Maschinen 100 V und mehr betragen kann, ist zwischen dem Schweißkabel und dem Werkstück vorhanden. Schaltet sich nun der Schweißer dazwischen, indem er gleichzeitig das Werkstück und ein unisoliertes

Stück am Kabel oder am Elektrodenhalter berührt, so nimmt der Strom den Weg durch seinen Körper. Besonders ist dies der Fall, wenn der Widerstand der Haut durch Feuchtigkeit, z. B. durch Schweiß, stark vermindert ist. Tödliche Unfälle können die Folgen eines solchen Stromdurchganges durch den Körper sein.

In erster Linie muß sich der Schweißer davor hüten, unisolierte Teile der Kabel, des Elektrodenhalters sowie gleichzeitig das stromführende Werkstück zu berühren. Die Kabelisolierung muß an allen Stellen in Ordnung sein, besonders an den Verbindungsstellen der einzelnen Kabelstücke sowie an der Übergangsstelle zum Elektrodenhalter.

Ist der Schweißer gezwungen, auf dem Werkstück zu sitzen, z. B. auf Stahlbauten, in Kesseln usw., so muß er durch eine isolierende Unterlage, z. B. eine Gummimatte, ein trockenes Holzbrett u. dgl., vor der unmittelbaren Berührung mit dem Werkstück geschützt sein.

Die Gefahr ist besonders groß, wenn er eine neue Elektrode in die Schweißzange einspannt. In diesem Augenblick steht er durch seine Hand über die Elektrode in Verbindung mit dem Schweißstrom, der sofort durch ihn hindurchfließt, wenn er gleichzeitig mit dem Werkstück in Verbindung steht. Unfälle durch den elektrischen Strom sind auch z. B. schon in dem Augenblick entstanden, in dem der Schweißer einen Behälter durch das Mannloch verließ und dabei den Elektrodenhalter unter die naßgeschwitzte Achsel klemmte. Es ist einleuchtend, daß der Strom dann seinen Weg durch den Körper des Schweißers nehmen mußte.

Man soll deshalb in allen Fällen, in denen eine Berührung des Schweißers mit dem Werkstück leicht möglich ist, nur Maschinen mit niedriger Leerlaufspannung verwenden und vor allem Wechselstrom meiden. Wechselstrom ist wesentlich gefährlicher als Gleichstrom, da die mit dem Spannungsmesser gemessene Spannung ja nicht den Spitzenwert der sinusförmig verlaufenden Wechselstromkurve darstellt, sondern nur den wesentlich niedriger liegenden Mittelwert. Dazu kommt noch, daß Wechselstromschweißgeräte in der Regel eine viel höhere Leerlaufspannung aufweisen als Gleichstromschweißgeräte, um das sonst schwierigere Zünden zu erleichtern.

Es wurde in einem vorhergehenden Abschnitt schon darauf hingewiesen, daß Umspanner manchmal mit Steckbüchsen zum Verändern der Stromstärke ausgerüstet sind, die an der Stirnseite vollständig offen liegen. Derartige Geräte sind als unfallgefährlich abzulehnen.

Ist das Schweißgerät vollständig in Ordnung, so kann es ohne Gefahr an allen Stellen berührt werden, mit Ausnahme der Stellen, an denen der Netzstrom zugeleitet bzw. der Schweißstrom entnommen wird. Trotzdem kann es aber vorkommen, daß ein Schweißer beim Berühren seines Gerätes einen elektrischen Schlag bekommt, nämlich, wenn die Isolierung des Gerätes beschädigt ist.

Derartige Unfälle sind besonders gefährlich, da der in diesem Fall in Betracht kommende Strom der Netzstrom mit seiner hohen Spannung ist. Um diese Unfallmöglichkeit auszuschalten, müssen alle Schweißgeräte geerdet werden. Zu diesem Zweck ist ihr Gehäuse, das häufig eine besondere Erdungsklemme „E“ aufweist, gut leitend mit der Erde durch eine Wasserleitung oder bei Bauarbeiten im Freien durch einen Wasserlauf zu verbinden. Innerhalb der Werkstätten haben sich zentrale Erdleitungen besonders gut bewährt. Bei derartigen Anlagen ist der Schweißer gezwungen, wenn er sein Gerät anschließt, es gleichzeitig zu erden, da sein Stecker einen weiteren Kontakt zum Anschluß an die zentrale Erdleitung enthält. Überläßt man es dem Schweißer allein, für Erdung zu sorgen, so wird er nicht selten seinen Erdungsdraht an eine Leitung oder an einen anderen Körper anschließen, der keine Verbindung zur Erde hat.

Unfälle durch die Strahlen des Lichtbogens. Der elektrische Lichtbogen erzeugt außer den grellen Lichtstrahlen auch Wärmestrahlen sowie ultraviolette und ultrarote Strahlen. Neben den Lichtstrahlen sind die beiden zuletzt genannten Strahlenarten besonders gefährlich und zwar nicht nur für das Auge, sondern auch für die Haut. Andere als die genannten Strahlen sind im Lichtbogen nicht festgestellt worden. Es ist auch nicht wahrscheinlich, daß der Lichtbogen noch unbekannte Strahlen enthält. Insbesondere muß darauf hingewiesen werden, daß die Strahlen des Lichtbogens nichts mit den Röntgenstrahlen gemeinsam haben. Deshalb sind die Behauptungen, daß Elektroschweißer in ihrer Zeugungsfähigkeit geschädigt worden seien, in den Bereich der Fabel zu verweisen.

Die Wirkung der ultravioletten und der ultraroten Strahlen ist bei den einzelnen Menschen verschieden, wie ja auch die einzelnen Menschen von den Strahlen der Sonne, die denen des Lichtbogens ähnlich sind, verschieden betroffen werden.

Bei allen Menschen aber verursachen die Strahlen des Lichtbogens, wenn sie das ungeschützte Auge treffen, eine Entzündung der Bindehaut. Wenn auch kein Fall bekannt ist, in dem eine solche Entzündung zu einer dauernden Schädigung geführt hat, so ist sie doch so schmerzhaft, daß dringend davor gewarnt werden muß, den Lichtbogen anders als durch ein richtiges Schutzglas zu betrachten. Kommt dennoch ein *Verblitzen* der Augen vor, so empfiehlt es sich, ein Schmerzlinderungsmittel einzuträufeln. Gut bewährt haben sich folgende zwei Mittel nach Dr. RUMBAUR:

Novocain . . .	0,05	Novocain	0,05
Borlösung . . .	0,3/10,0	Suprarenin	1/1000 0,5
		Aqua dest.	10,0

Diese Mittel werden in den Apotheken aber nur gegen ärztliches Rezept abgegeben. Es empfiehlt sich, eines der beiden Mittel in den Schweißwerkstätten vorzuhalten. In leichteren Fällen genügt auch das Einträufeln einer 2%igen Boraxlösung.

In allen Fällen müssen die Schweißer vor den Strahlen des Lichtbogens durch ein Schutzschild oder durch eine Schutzmaske geschützt werden. Eine Schutzbrille allein genügt beim Lichtbogenschweißen nicht, da sonst die Gesichtshaut verbrannt wird.

Schutzmasken (Abb. 90) haben den Vorteil, daß sie den Schweißer bei der Ausübung seiner Arbeit nicht behindern, sie belästigen ihn aber unter Umständen durch Hitze. Schutzschilder (Abb. 91) weisen diesen Nachteil zwar nicht auf, sie müssen aber ständig mit einer Hand festgehalten werden. Beide Geräte sind entweder aus Stahlblech oder aus Preßspan, Pappe oder Holz. Geräte aus Stahlblech sind zwar dauerhaft, können aber bei Schweißarbeiten an engen Stellen den Schweißer gefährden, da sie den Strom leiten. Geräte aus den anderen Werkstoffen sind in dieser Beziehung ungefährlich, sie sind jedoch meistens wenig dauerhaft. Masken und Schilder aus Leder sind auch nicht gut geeignet, da Leder in der Hitze des Lichtbogens hart wird und schrumpft.

Die Schauöffnung dieser Geräte muß mit einer filternden Glasscheibe bedeckt sein, die die schädlichen Strahlen des Lichtbogens abhält, gleichzeitig aber die Sicht nicht zu sehr erschwert. Man darf allerdings nicht erwarten, daß durch ein derartiges Glas Gegenstände bei gewöhnlicher Beleuchtung sichtbar sind, jedoch im Lichte des Lichtbogens müssen Werkstück und Elektrode gut gesehen werden können.

Richtlinien für den Strahlungsschutz sind in DIN 4647 festgelegt. Dort finden sich auch Angaben über die Art der zu verwendenden Gläser. Für die am

häufigsten vorkommenden Arbeiten mit 3—6 mm dicken Elektroden sind Gläser mit den Kennziffern 788 vorgesehen. Das Studium dieser Norm ist jedem Schweißingenieur zu empfehlen.

Da die Schutzgläser nicht billig sind, so sind sie durch Klargläser vor den Schweißspritzern zu schützen. Für Schweißer, die selbsttätige Schweißanlagen bedienen, sind besondere Schutzmasken geschaffen worden, die oben ein helles Buntglas besitzen, durch das das Gerät beaufsichtigt werden kann, während das untere Fenster das dunkle Buntglas enthält (Abb. 92).

Auch die nicht unmittelbar mit Schweißarbeiten Beschäftigten sind bei Aufenthalt in der Schweißwerkstatt den Strahlen des Lichtbogens ausgesetzt. Wo es die Verhältnisse und besonders die Werkstücke ermöglichen, soll man jedem Schweißer eine Zelle zuweisen, die allseitig geschlossen ist. Der Anstrich der



Abb. 90.
Schutzmaske für Schweißer.

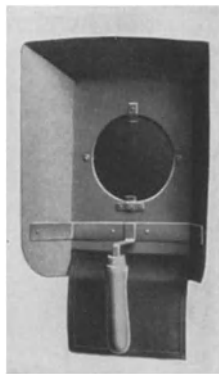


Abb. 91.
Schutzschild für Schweißer.

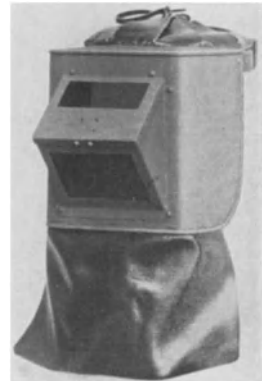


Abb. 92. Schutzmaske für Schweißer an selbsttätigen Schweißeinrichtungen.

Wände soll mattgrau sein, damit die Strahlen nicht zurückgeworfen werden. Wird an größeren Werkstücken geschweißt, so ist ein solcher Schutz nicht möglich. Unter Umständen können aber doch Schutzwände aufgestellt werden. In jedem Falle muß durch Warnschilder darauf aufmerksam gemacht werden, daß die Strahlen des Lichtbogens gefährlich sind. Bedienstete, die unmittelbar in der Nähe der Schweißstellen zu arbeiten haben, sind zweckmäßig mit Schutzbrillen mit Seitenschutz und Gläsern der Kennziffer 555 auszurüsten. Viele Schweißer sind auch an den Händen gegen die Strahlen des Lichtbogens empfindlich. Man soll ihnen deshalb Handschuhe geben und zwar mit Einzelfingern. Handschuhe aus chromgegerbtem Leder haben sich weniger gut bewährt als solche aus sämisch gegerbtem Leder, da Chromleder bald schrumpft und hart wird.

Der Schweißer soll einen Anzug aus feuersicherem, die Strahlen des Lichtbogens nicht durchlassendem Stoff tragen. Gut geeignet sind Anzüge aus Deutschleder. Asbestkleidung kommt nur für die Warmschweißung von Grauguß in Frage. Die Hosen sollen über den Stiefelschaft fallen, damit Spritzer und glühende Elektrodenreste nicht in die Stiefel gelangen können. Die Stiefel sollen Schäfte und feste Sohlen besitzen. Halbschuhe sind ebensowenig wie Pantinen für das Schweißen geeignet.

Unfälle durch Gase. Es sind jetzt keine Fälle bekannt, in denen Schweißer durch Gase, die sich im Lichtbogen gebildet haben, eine Gesundheitsschädigung erfahren hätten. Trotzdem ist Vorsicht am Platze. Es ist nicht ausgeschlossen,

daß manche Elektroden in ihren Umhüllungen Stoffe enthalten, die im Lichtbogen schädliche Gase entwickeln können.

Es empfiehlt sich deshalb, alle Schweißwerkstätten mit guten Lüftungseinrichtungen zu versehen. Im allgemeinen genügen dazu die Öffnungen der Ober- und Seitenlichter. Wird aber auf engem Raum viel mit umhüllten Elektroden geschweißt, besonders aber in Schweißzellen, so müssen diese mit besonderen Absaugvorrichtungen ausgerüstet werden. Dadurch wird mindestens dem Schweißer das Arbeiten wesentlich erleichtert.

Giftige Gase können aber auch dadurch entstehen, daß sich an den Werkstücken Stoffe befinden, die beim Schweißen giftige Gase entwickeln. Dies ist z. B. der Fall bei allen Stücken, die mit Bleimennige angestrichen oder verzinkt sind. Das gleiche ist bei blei- und zinkhaltigen Kupferlegierungen der Fall. Schon um die Güte der Schweißnaht sicherzustellen, sollten Bleimennige- und Zinküberzüge vor dem Schweißen durch Abbrennen mit Hilfe eines Schweißbrenners, am besten unter einem Abzug oder doch im Freien, entfernt werden. Ist dies nicht vollständig möglich, so dürfen die Stücke unter keinen Umständen in geschlossenen Räumen ohne eine dicht über der Schweißstelle befindliche Absaugvorrichtung geschweißt werden. Bei Arbeiten im Freien ist die Windrichtung zu beachten.

Unfälle durch Eisen- und Schlackenspritzer. Manche Elektroden spritzen beim Schweißen sehr stark. Der Schweißer muß deshalb, wie schon oben erwähnt, mit einer feuersicheren Schutzkleidung ausgerüstet werden. Da diese in den Falten durch die sich dort ansammelnden glühenden Spritzer und Funken besonders stark beschädigt und dadurch frühzeitig unbrauchbar wird, so ist es vorteilhaft, den Schweißer außerdem noch mit einer Lederschürze zu versehen. Der hohe Anschaffungspreis einer Lederschürze macht sich meist in kurzer Zeit durch die längere Lebensdauer der Schutzkleidung bezahlt.

Beim Abklopfen der glasartigen erkalteten Schlacke entstehen häufig scharfkantige Splitter, die den Augen gefährlich werden können. Es empfiehlt sich deshalb, dem Schweißer noch zusätzlich eine Schutzbrille oder ein Schutzschild mit Klargläsern zu geben, da die Gläser der Schweißerschilde und der Schutzmasken so dunkel sind, daß durch sie das Abklopfen der Schlacke nicht beobachtet werden kann.

V. Zusatzstoffe für die Elektroschmelzschweißung.

Man unterscheidet je nach dem Verwendungszweck Schweißdrähte (Elektroden) für Verbindungsschweißung und für Auftragsschweißung. Die Schweißdrähte werden außerdem entsprechend ihrer Beschaffenheit unterteilt in:

Nackte Drähte, Seelendrähte, dünn umhüllte Drähte und ummantelte Drähte.

Die Schweißdrähte sollen sich einwandfrei verschweißen lassen und ein Schweißgut ergeben, das die gewünschten Eigenschaften in mechanischer und metallurgischer Beziehung aufweist. Schweißereigenschaften sowie Güte des Schweißgutes stehen meistens in engem Zusammenhang

A. Eigenschaften des Schweißgutes.

Das Schweißgut der Verbindungsschweißungen soll dem Baustoff der Werkstücke, an denen geschweißt wird, in jeder Beziehung möglichst ähnlich sein. Eine Ausnahme machen nur Schweißverbindungen, die mit austenitischen Elektroden hergestellt sind, da diese und damit auch das Schweißgut Legierungszusätze wie Chrom und Nickel in wesentlich größeren Anteilen als der gewöhnlich damit verschweißte Werkstoff enthalten.

Von diesem Sonderfall abgesehen, ist es erstrebenswert, ein Schweißgut zu erzielen, das sich vom Baustoff möglichst wenig, also weder hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung und des Gefüges, noch hinsichtlich der mechanisch-technologischen Güterwerte unterscheidet. Restlos läßt sich dies jedoch nicht erreichen.

B. Chemische Zusammensetzung des Schweißgutes.

Der von den Schweißdrähten abschmelzende Werkstoff erleidet während seines Überganges zum Werkstück beträchtliche Veränderungen. Bei der hohen Temperatur des Lichtbogens sind die einzelnen Tröpfchen den Einwirkungen der Luft sehr stark ausgesetzt und nehmen aus ihr Sauerstoff und Stickstoff auf.

Der Zutritt des Sauerstoffes äußert sich hauptsächlich in einer Verbrennung der Legierungselemente wie Kohlenstoff, Silizium und Mangan, während Stickstoff vom Eisen selbst aufgenommen wird. Wie groß die Veränderungen des Schweißgutes gegenüber dem Werkstoff des Schweißdrahtes sind, geht aus Zahlentafel 1 hervor, die die Ergebnisse einer Untersuchung von K. L. ZEYEN¹ enthält.

Bei nackten Drähten brennen demnach etwa 80% des Kohlenstoffes, etwa 70% des Siliziums und etwa ebensoviel des Mangans heraus, während der Stickstoffgehalt auf das 28fache ansteigt.

Diese Veränderung der chemischen Zusammensetzung äußert sich, wie aus der gleichen Tafel hervorgeht, auch in den mechanisch-technologischen Eigenschaften der Schweißverbindungen. Versuche, den Abbrand einfach durch entsprechend stärkere Legierung des Schweißdrahtes auszugleichen, führten zu keinem brauchbaren Ergebnis. Drähte mit so hohen Gehalten an Kohlenstoff, Silizium und Mangan, wie sie in diesem Falle notwendig sein würden, lassen sich nicht gut verschweißen. Sie kochen und spritzen beim Abschmelzen so sehr, daß damit keine brauchbaren Schweißverbindungen erzielt werden können. Außerdem wäre damit dem Eindringen des Stickstoffes noch kein Halt geboten.

Um den Abbrand gering zu halten und gleichzeitig die Stickstoffaufnahme möglichst zu verhindern, müssen andere Wege beschritten werden: Die Luft ist vom eigentlichen Lichtbogen möglichst fern zu halten.

Um dieses zu erreichen, versuchte man zunächst den Lichtbogen mit einem schützenden Gasmantel zu umgeben. Man führte die Drähte durch ein Rohr, durch das ein Schutzgas geblasen wurde. Das auf dieser Arbeitsweise aufgebaute Verfahren, das sog. Schutzgasverfahren von ALEXANDER, der Methanol verwandte, bewährte sich aber nicht.

Erfolgreich waren aber die Versuche, die Schweißdrähte mit Umhüllungen zu versehen aus Stoffen, die in der Hitze des Lichtbogens ein schützendes Gas erzeugen.

Diese Versuche brachten folgende Ergebnisse: Ist die Umhüllung dick genug und besteht sie aus Stoffen, die genügend Gas abgeben, so brennt der Lichtbogen in einem Gasmantel. Bei kurzem Lichtbogen schützt der Gasmantel den Lichtbogen und damit die übergehenden Stahltröpfchen vor den Einwirkungen der Luft. Ein vollständiger Abschluß ist allerdings nicht erreichbar. Es gelingt aber, wie aus Zahlentafel 1 hervorgeht, den Kohlenstoffabbrand von 80% auf etwa 50%, den Siliziumabbrand von 70% auf etwa 0%, den Manganabbrand von etwa 70% auf 45% und die Stickstoffaufnahme vom 28fachen auf das 3fache herabzusetzen.

¹ ZEYEN, Techn. Mitt. Krupp, Juni 1935.

Zahlentafel I. Veränderung der chemischen Zusammensetzung eines Schweißdrahtes bei verschiedenen Schweißverfahren. Festigkeitswerte von Proben, die aus der Schweißnaht entnommen wurden. (Nach K. L. ZEYER.)

Werkstoff	Chemische Zusammensetzung in %				Zerreißprobe				Kerbzähigkeit DVMR-Probe) m kg/cm ²	Brinellhärte 2,5/ 187,5/30
	C	Si	Mn	N ₂	Streckgrenze kg/mm ²	Zugfestigkeit kg/mm ²	Dehnung % L = 5 d	Einschnürung %		
Blechbaustoff, der verschweißt wurde	0,14	0,11	0,54	0,0018						
Schweißdraht	0,13	0,07	0,66	0,0050						
Schweißnaht, mit Gas geschweißt .	0,10	0,02	0,49	0,017	25,4	39,8	18,5	38	11,8	113
Schweißnaht, elektrisch mit Gleichstrom geschweißt (blanke Elektrode)	0,03	0,02	0,20	0,14	30,8	41,8	7,5	17	1,5	135
Schweißnaht, elektrisch mit Gleichstrom geschweißt (schwach umhüllte Elektrode)	0,04	0,02	0,20	0,12	29,8	47,7	11,2	21	1,9	129
Schweißnaht, elektrisch mit Wechselstrom geschweißt (schwach umhüllte Elektrode)	0,05	0,03	0,21	0,12	31,8	46,7	12,0	21	1,7	133
Schweißnaht, elektrisch mit Gleichstrom geschweißt (mittelstark umhüllte Elektrode)	0,04	0,04	0,25	0,079	30,8	43,8	15,0	30	6,1	131
Schweißnaht, elektrisch mit Wechselstrom geschweißt (mittelstark umhüllte Elektrode)	0,04	0,03	0,22	0,085	29,8	41,8	15,0	28	5,1	138
Schweißnaht, elektrisch mit Gleichstrom geschweißt (stark umhüllte, schutzgasentwickelnde Elektrode) .	0,06	0,07	0,36	0,013	32,8	46,9	25,0	47	9,6	140
Schweißnaht, elektrisch mit Wechselstrom geschweißt (stark umhüllte, schutzgasentwickelnde Elektrode) .	0,08	0,08	0,41	0,028	34,8	49,7	26,5	40	8,6	148

Die Stoffe der Umhüllungen werden teilweise in das Schmelzbad mit hineingerissen und können auch dort ebenfalls noch einen Einfluß ausüben. Man setzt deshalb den Umhüllungsmassen sauerstoff- und stickstoffverzehrende Bestandteile zu, die dann die Sauerstoff- und Stickstoffreste, die der Gasmantel nicht fernhalten konnte, noch nachträglich in der Schweiße selbst unschädlich machen. Außerdem kann die Umhüllungsmasse auch Kohlenstoff, Silizium und Mangan an das Schmelzbad abgeben und dadurch den Verlust wieder ausgleichen. Die nicht vergasteten Reste der Umhüllung bleiben als Schlacke zurück. Folgende Bestandteile sind in den Umhüllungen zu unterscheiden:

Sauerstoffentfernende Bestandteile wie z. B. Ferromangan, Ferrosilizium, Ferrovanadin, Ferrotitan, Aluminium.

Stickstoffentfernende wie Rutil (Titanoxyd), Ferrotitan.

Siliziumabgebende wie Ferrosilizium.

Manganabgebende wie Ferromangan und Mangankarbid.

Kohlenstoffabgebende wie Eisen-, Silizium- und Mangankarbid, sowie Kohle.

Gasbildende wie Eisen- und Mangankarbonüle, Kalzium- und Magnesiumkarbonate, organische Stoffe, wie Zellulose, Stärke usw.

Schlackenbildende Stoffe wie Eisen- und Manganoxyde, Kalzium- und Magnesiumkarbonate, Eisen-, Kalzium-, Magnesium- und Aluminiumsilikate.

Man sieht also, daß manche Stoffe nicht nur einen, sondern mehrere Zwecke erfüllen. Unter Umständen gehen auch schädliche Stoffe, wie Phosphor und Schwefel aus der Umhüllung in die Schweiße über. Es ist deshalb bei allen umhüllten Schweißdrähten eine chemische Untersuchung des eigentlichen Werkstoffes des Drahtes oder der Umhüllung von wesentlich geringerem Wert als eine solche des niedergeschmolzenen Schweißgutes.

Wie Zahlentafel 1 zeigt, hängt die Wirkung der Umhüllungsmassen aber nicht nur von der Art ihrer Zusammensetzung ab, sondern auch von der Dicke der umhüllenden Schicht.

Die Umhüllungen werden entweder in flüssigem Zustand durch Tauchen der Drähte oder in teigigem Zustande durch Aufpressen aufgetragen. In manchen Fällen werden sie auch durch Umwickeln des Drahtes z. B. mit Asbest oder Baumwolle hergestellt, wobei allerdings die Umwicklung nachher noch mit besonderen Stoffen getränkt wird.

Bei der Herstellung der umhüllten Drähte ist dem Umhüllungsvorgang ganz besondere Beachtung zu schenken. In erster Linie muß die Umhüllung den Draht von allen Seiten gleichmäßig umschließen. Einseitige Umhüllung stört das Schweißen sehr und macht die Drähte für schwierige Schweißarbeiten, wie z. B. für das Senkrecht- oder Überkopfschweißen unter Umständen völlig unbrauchbar.

Weiter müssen die einzelnen Bestandteile in der Umhüllung vollständig gleichmäßig verteilt sein. Es muß deshalb durch geeignete Vorkehrungen dafür gesorgt werden, daß in den Tauch- oder Preßmassen die spezifisch schwereren Stoffe nicht nach unten sinken können. Vor allem aber ist die Korngröße der einzelnen Bestandteile immer gleich zu halten. Im Lichtbogen spielt sich ja ein Vorgang, der im Stahlwerk in der Bessemer- oder Thomas-Birne, im Siemens-Martin- oder Elektroofen längere Zeit dauert, in winzigen Zeiträumen ab. Das hat zur Folge, daß grobkörnige Bestandteile nur mit der Oberfläche ihrer Körner an den sich abspielenden chemischen Reaktionen teilnehmen, während feinkörnige Bestandteile mit ihrem ganzen Volumen sich auswirken können. Die Herstellung wirklich brauchbarer umhüllter Schweißdrähte erfordert deshalb sehr große Sorgfalt, und es ist nicht verwunderlich, daß gelegentlich einmal auch eine sonst gute Elektrodensorte versagt.

Die chemische Zusammensetzung des eigentlichen Drahtes hat bei umhüllten Drähten, wie oben bereits gesagt, keine große Bedeutung, denn die des Schweißgutes kann durch die Umhüllung weitgehend beeinflusst werden. Es muß vor allem darauf geachtet werden, daß der Phosphor- und der Schwefelgehalt weder im Draht noch in der Schweiße zu hoch sind. Im allgemeinen sollen Phosphor und Schwefel im Draht zusammen nicht mehr als 0,07% betragen, wobei der Schwefelgehalt unter 0,04% sein darf. Im Schweißgut selbst soll nicht mehr als 0,03% Phosphor und 0,04% Schwefel enthalten sein.

Eine Sonderstellung nehmen die sog. *Seelendrähte* ein. Diese Schweißdrähte unterscheiden sich äußerlich nicht von gewöhnlichen nackten Drähten, enthalten aber im Innern eine dünne Einlage aus schlackenbildenden Stoffen, die Schlackenseele. Der Mangangehalt dieser Drähte ist sehr hoch, bis zu 0,8%, so daß das Verschweißen ohne besondere Hilfsmittel Schwierigkeiten bereiten würde. Durch die Schlackenseele wird aber der Lichtbogen beruhigt. Der Mangangehalt wird zum großen Teil, bis zu 40%, im Lichtbogen verzehrt und bindet damit einen Teil des Sauerstoffes. Der Siliziumabbrand beträgt sogar rund 90%, dadurch wird weiterer Sauerstoff gebunden. Auf eine Entfernung des Stickstoffes wird bei dieser Schweißdrahtart jedoch meist verzichtet.

C. Die Schweißigenschaften.

Unter dem Begriff „Schweißigenschaften“ versteht man die Art des Abschmelzens der Schweißstäbe im Lichtbogen, die Art der sich bildenden Schlackendecke sowie das Verhalten des niedergeschmolzenen Schweißgutes.

1. Abschmelzen der Schweißdrähte.

Der Schweißdraht soll leicht und gleichmäßig abschmelzen und fließen und nur wenig spritzen.

Das Verhalten der nackten Drähte beim Schweißen ist abhängig von ihrer chemischen Zusammensetzung, sowie von ihrem Gefüge. Nicht selten findet man, daß der gleiche Stab ein Stück weit ruhig abschmilzt, dann aber plötzlich zu



Abb. 93. Selbsttätiges Abheben der Schlacke.

kochen anfängt, und umgekehrt. Dies rührt meistens davon her, daß der Stahlblock, aus dem der Schweißdraht hergestellt wurde, starke Steigerungen aufwies. Derartige Drähte sind natürlich unbrauchbar. Häufig läßt sich aber das mangelhafte Verhalten weder durch eine chemische Untersuchung noch durch die Prüfung des Gefüges erklären.

Einzig der praktische Versuch gibt Aufschluß über die Brauchbarkeit eines Schweißdrahtes. Den erwähnten Fehler findet man gelegentlich, wenn auch seltener, bei Seelendrähten. Der häufigste Fehler bei dieser Schweißdrahtart ist jedoch der, daß die Seele nicht mittig liegt. Manchmal ist sie breit gequetscht und teilt dann den Draht in zwei Hälften, so daß er beim Schweißen aufplatzt. Auch diese Drähte müssen dann abgelehnt werden.

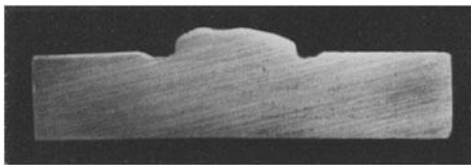


Abb. 94. Einbrandkerben.

Bei dünn umhüllten und bei ummantelten Drähten hängen die Schweißigenschaften hauptsächlich von der Umhüllung, weniger von dem eigentlichen Draht ab. In erster Linie muß der Draht, wie schon oben erwähnt wurde, mittig in der Umhüllung liegen, sonst brennt diese ungleichmäßig ab, was den Schweißvorgang sehr stört. Hat die Umhüllung bei längerem Lagern Feuchtigkeit angezogen, so spritzt der Draht im Lichtbogen durch die starke Dampfentwicklung. Das ruhige Abschmelzen hängt von der richtigen Abstimmung der Um-

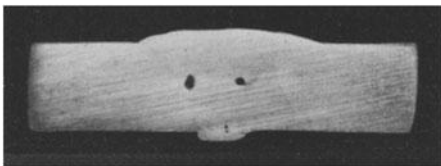


Abb. 95. Schlackenzeilen im Innern einer V-Naht.

hüllung auf den Draht ab. Auch bei umhüllten Schweißdrähten ist gelegentlich die Erscheinung festzustellen, daß der gleiche Draht teilweise ruhig, teilweise jedoch unruhig abschmilzt. Die Ursache ist dann in einer ungleichmäßigen Zusammensetzung der Umhüllungsmasse zu suchen.

2. Eigenschaften der Schlacke.

Die bei umhüllten Schweißdrähten sich bildende Schlacke soll sich nach dem Erkalten leicht entfernen lassen und bei richtiger Elektrodenführung keine Einbrandkerben verursachen.

Früher mußten die Schlacken meist mit Hammer und Meißel bearbeitet werden, um sie von der Schweißnaht abzulösen. In dieser Beziehung sind aber große

Fortschritte erzielt worden. Bei den meisten neuzeitlichen Schweißdrähten genügt jetzt ein leichter Hammerschlag zur Entfernung der Schlacke. Bei manchen Schweißdrähten hebt sich die Schlacke beim Erkalten sogar von selbst ab (Abb. 93).

Auch die für die Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen so gefährlichen Einbrandkerben lassen sich bei sachgemäßer Drahtführung vollständig vermeiden (Abb. 94). Fälle, wie sie früher häufig vorkamen, daß bei jeder Mehrlagenschweißung mit den einzelnen Lagen auch zwei Schlackenzeilen in den Baustoff hineingeschweißt wurden, sind heute durchaus vermeidbar. Wosie gelegentlich doch auftreten, sind sie verursacht durch mangelhaftes Können des Schweißers (Abb. 95).

3. Verhalten des niedergeschmolzenen Schweißgutes.

Das niedergeschmolzene Schweißgut muß in erster Linie frei sein von Blasen und Schlacken, was durch richtige Drahtführung bei guten Schweißdrähten ohne weiteres erreichbar ist.

Bei nackten und bei getauchten Drähten sowie bei Seelendrähten ist das Schweißgut in der Regel zähflüssig. Es bereitet also auch dem geübten Schweißer keine

Schwierigkeiten, damit in anderer als waagerechter Lage, nämlich senkrecht oder überkopf zu schweißen (Abb. 96).

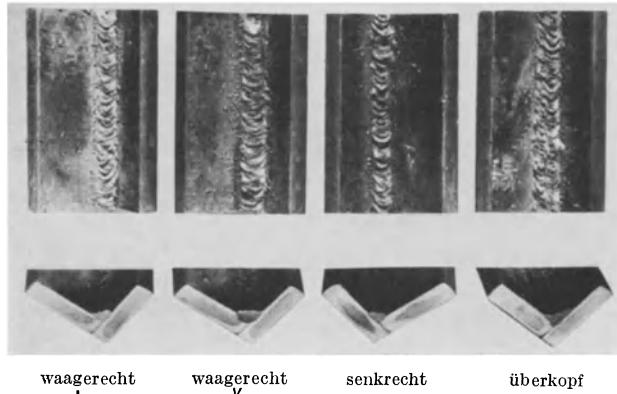


Abb. 96. Kletterproben, geschweißt mit nackten Drähten (4 mm Ø).

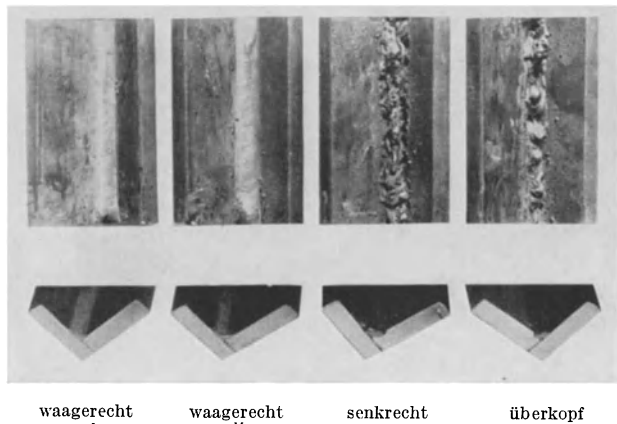


Abb. 97. Kletterproben, geschweißt mit sehr dünnflüssigen, unummantelten Drähten (14 mm Ø).

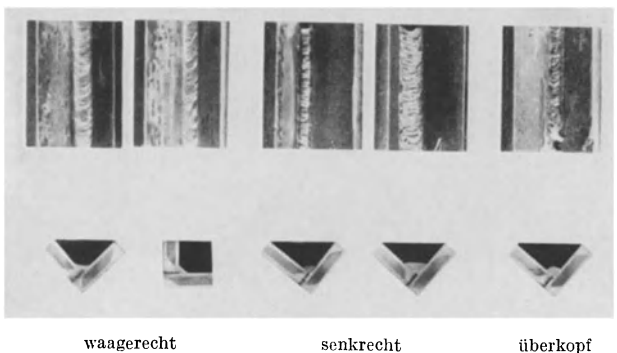
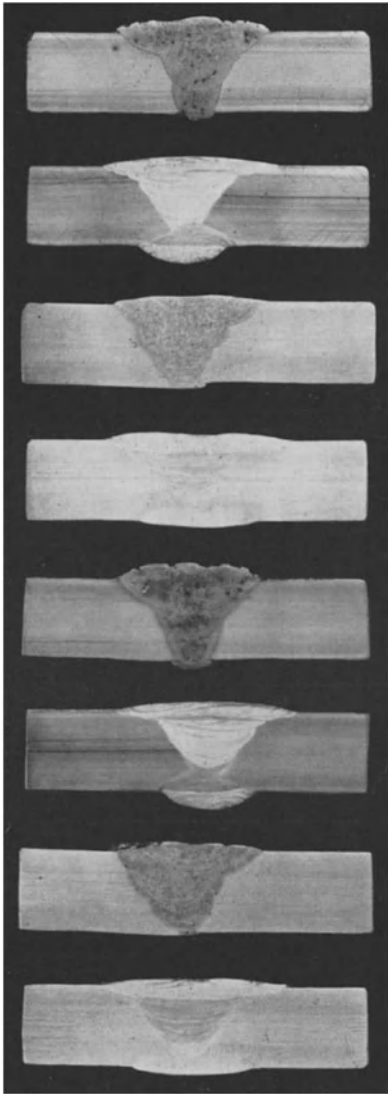


Abb. 98. Kletterproben, geschweißt mit dünnflüssigen, jedoch gut kletternden unummantelten Drähten (4 mm Ø).



a St 37 geschweißt mit nackten Dähten.
 b St 37 geschweißt mit ummantelten Drähten.
 c St 52 geschweißt mit Seelendrähten.
 d St 52 geschweißt mit ummantelten Drähten.
 a—d ungeglüht.
 e St 37 geschweißt mit nackten Drähten.
 f St 37 geschweißt mit ummantelten Drähten.
 g St 52 geschweißt mit Seelendrähten.
 h St 52 geschweißt mit ummantelten Drähten.
 e—h geglüht.
 $V = 1 \times$.

Abb. 99. Grobgefügebilder von Schweißnähten.

halb, von Sonderfällen abgesehen, in denen die Schweißnähte bei Rotglut gehämmert werden, nie das Gefüge des gewalzten Stahles erhalten, sondern besitzt ein Gefüge ähnlich dem des gegossenen Stahles (Abb. 101). Dazu kommt noch,

Anders verhält sich häufig das Schweißgut von ummantelten Drähten. Es ist bei vielen derartigen Schweißdrähten sehr dünnflüssig, man kann also damit sehr gut hohle Kehlnähte schweißen. Das Schweißen in anderer als waagerechter Lage ist jedoch dann meistens unmöglich (Abb. 97). Drähte mit zähflüssiger Schlacke, die etwa seit 1935 hergestellt werden, ergeben keine Hohlkehlnähte. Erst in neuester Zeit sind ummantelte Schweißdrähte entwickelt worden, mit denen ein sehr geübter Schweißer nicht nur waagrecht Hohlkehlnähte, sondern auch senkrecht und überkopf schweißen kann (Abb. 98).

Hier sei bemerkt, daß man mit dickeren als 4 mm-Drähten in der Regel nur waagrecht zu schweißen pflegt. Es ist deshalb falsch, auch von Schweißdrähten mit 5 oder gar mehr Millimeter Durchmesser zu verlangen, daß man mit ihnen senkrecht überkopf schweißen kann.

D. Eigenschaften der Schweißverbindungen.

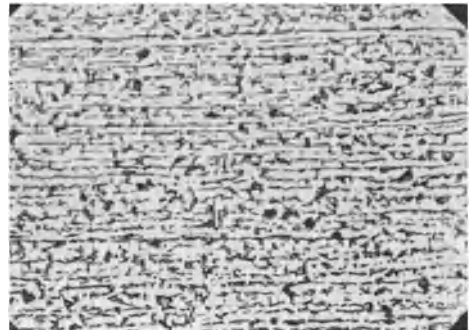
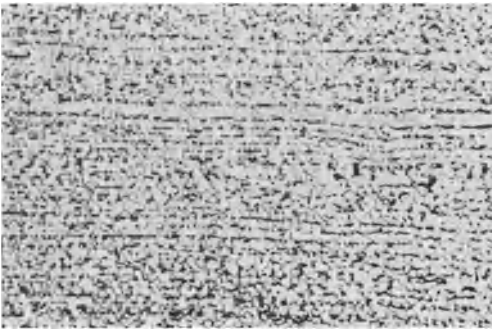
Die eigentliche Schweißverbindung, d.h. das Schweißgut, die Übergangszone und die durch das Schweißen beeinflusste Zone des Baustoffes sollen womöglich die gleichen Eigenschaften aufweisen wie der ungeschweißte Baustoff (Abb. 99). Diese Eigenschaften sind:

1. Gefüge.
2. Mechanisch - technologische Güte-
werte.
3. Widerstand gegen Rosten.

1. Gefüge.

Der Werkstoff, den der Bauingenieur fast ausschließlich schweißt, ist Walzstahl der Sorten St 00, St 37, St 42 und St 52. Walzstahl besitzt als Folge des Herstellungsvorganges ein besonderes Gefüge, das sehr deutlich im Feingefügebild in der zeilenförmigen Anordnung des Perlits zum Ausdruck kommt (Abb. 100). Der eingeschweißte Werkstoff jedoch, das Schweißgut, wird in flüssigem Zustande in die Schweißfuge eingebracht und kann deshalb,

daß die nicht durch andere Lagen ausgeglühte letzte Lage grobes Gefüge aufweist (Abb. 102). Aber auch der Baustoff wird in einzelnen Zonen durch den

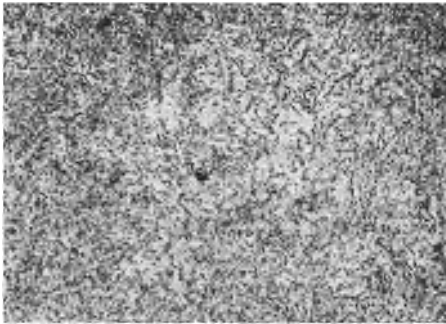


a St 37.

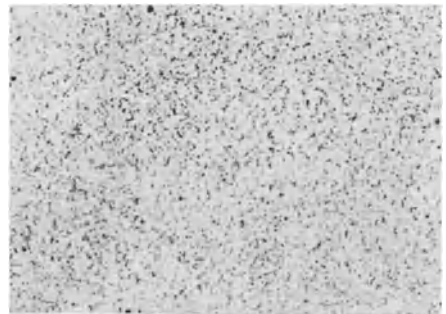
b St 52.

Abb. 100. Kleingefügeaufnahmen. $V = 100\times$, davon $\frac{3}{4}$.

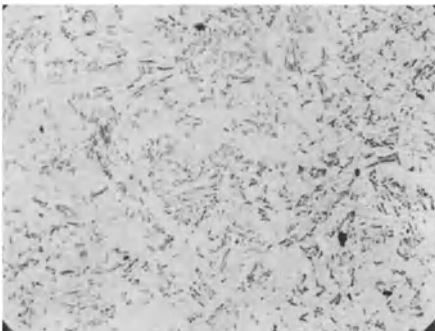
Schweißvorgang verändert. Anschließend an die unbeeinflussten Zonen mit ihrer zeilenförmigen Anordnung des Perlits kommt häufig eine überhitzte, grobkörnige



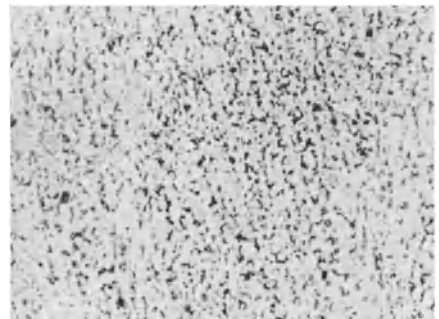
a St 37 geschweißt mit nackten Drähten.



b St 37 geschweißt mit ummantelten Drähten.



c St 52 geschweißt mit Seelendrähten.



d St 52 geschweißt mit ummantelten Drähten.

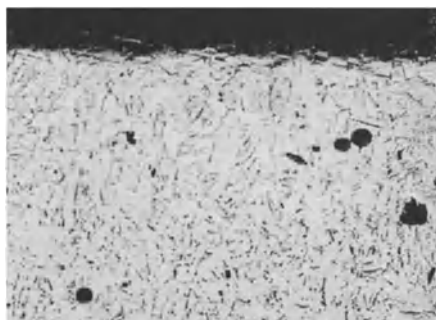
Abb. 101. Kleingefügeaufnahmen des Schweißgutes ungeglühter Mehrlagennähte. Mitte der Schweißnähte.
 $V = 100\times$, davon $\frac{3}{4}$.

Zone, in der der Perlit regellos verteilt liegt (Abb. 104). Dieser Zone folgt das Gebiet des Überganges, in dem sich Baustoff und eigentliches Schweißgut miteinander verbunden haben (Abb. 104), und dann folgt die reine Schweißse (Abb. 101).

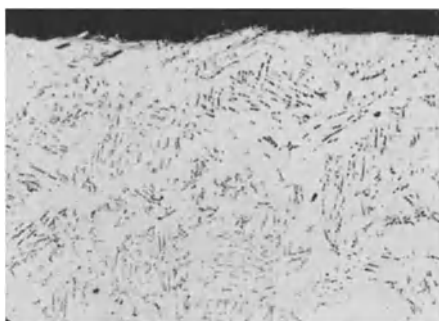
Das Gefüge im Schweißgut hängt sehr stark von der Art des Schweißens ab. Die mittleren Lagen sind in der Regel feinkörnig (Abb. 101), jedoch nur,



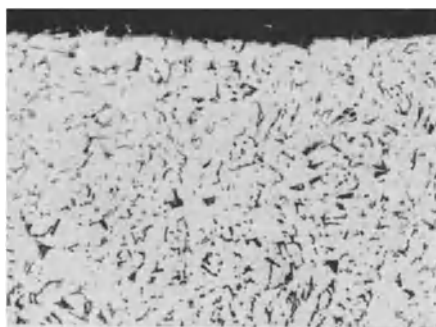
a St 37 geschweißt mit nackten Drähten.



b St 37 geschweißt mit ummantelten Drähten.



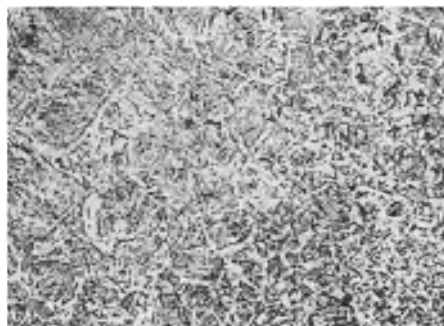
c St 52 geschweißt mit Seelendrähten.



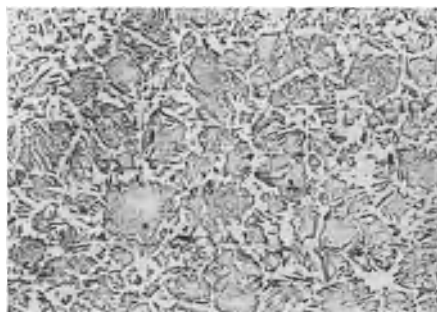
d St 52 geschweißt mit ummantelten Drähten.

Abb. 102. Kleingefügeaufnahmen der Randzonen des Schweißgutes ungeglühter Schweißnähte.
V = 100×, davon $\frac{3}{4}$.

mehreren Lagen geschweißt wird, da dann jede Lage von der folgenden Lage wieder ausgeglüht wird. Wird mit einem im Verhältnis zur Blechdicke zu dicken



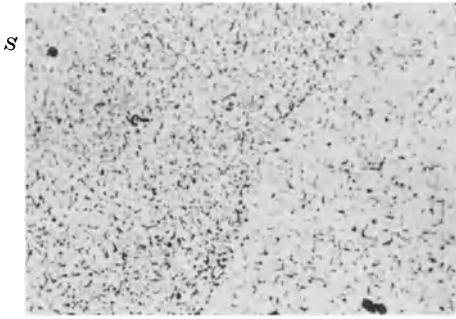
a St 37.



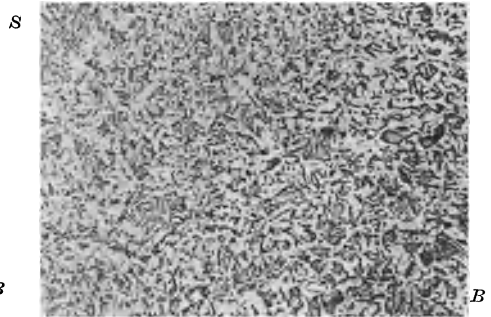
b St 52.

Abb. 103. Kleingefügeaufnahmen. Grobkörniger Baustoff in der Nähe der Schweißnähte, durch das Schweißen überhitzt. V = 100×, davon $\frac{3}{4}$.

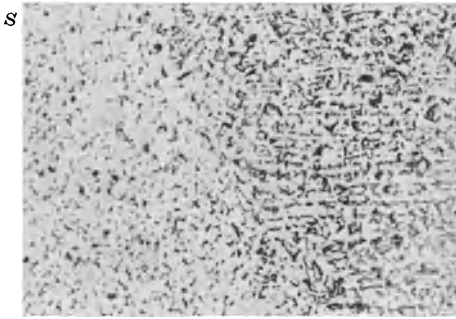
wenn in Schweißdraht eine Schweißnaht hergestellt, eine Arbeitsausführung, die, rein wirtschaftlich gesehen, Vorteile bringen würde, so wird das ganze



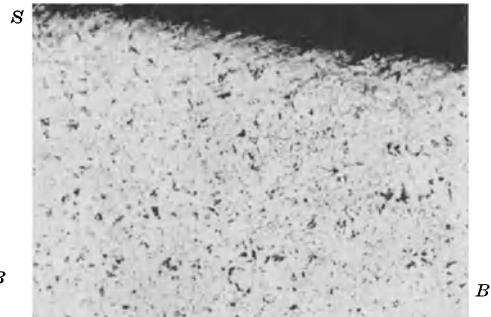
a St 37 mit nackten Drähten verschweißt.



b St 37 mit ummantelten Drähten verschweißt.

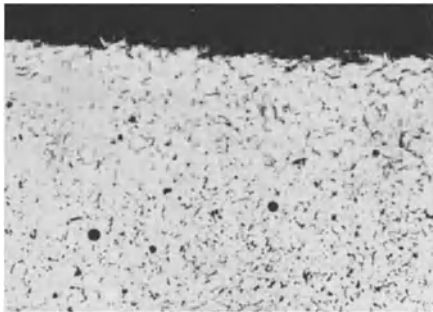


c St 52 mit Seelendrähten verschweißt.

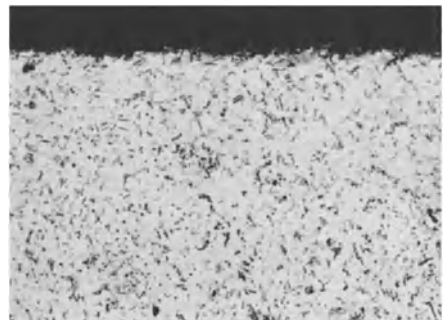


d St 52 mit ummantelten Drähten.

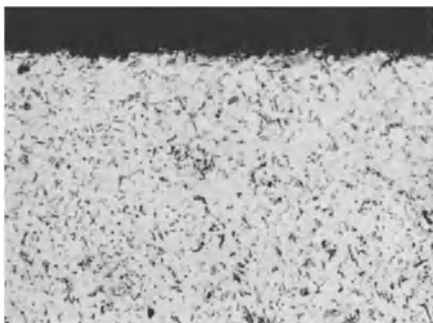
Abb. 104. Kleingefügeaufnahmen der Übergangszonen ungeglühter Schweißnähte.
B Baustoff, *S* Schweißgut. $V = 100\times$, davon $\frac{3}{4}$.



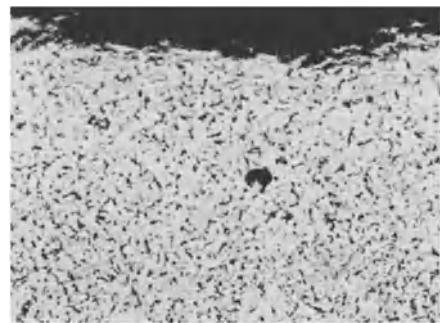
a St 37 mit nackten Drähten geschweißt.



b St 37 mit ummantelten Drähten geschweißt.



c St 52 mit Seelendrähten geschweißt.



d St 52 mit ummantelten Drähten geschweißt.

Abb. 105. Kleingefügeaufnahmen der Randzonen geglühter Schweißnähte. $V = 100\times$, davon $\frac{3}{4}$.

Gefüge grobkörnig und damit spröde. Dies kann durch Mehrlagenschweißung vermieden werden. Auf alle Fälle weisen aber die Decklagen grobes Gefüge auf (Abb. 102). Unter Umständen ist es deshalb zweckmäßig, diese zum Schluß wieder abzarbeiten.

Das Gefüge kann wesentlich verbessert werden durch Normalglühen, d. h. durch Glühen bei etwa 900°C und Abkühlung in der Luft. Durch diesen Vorgang

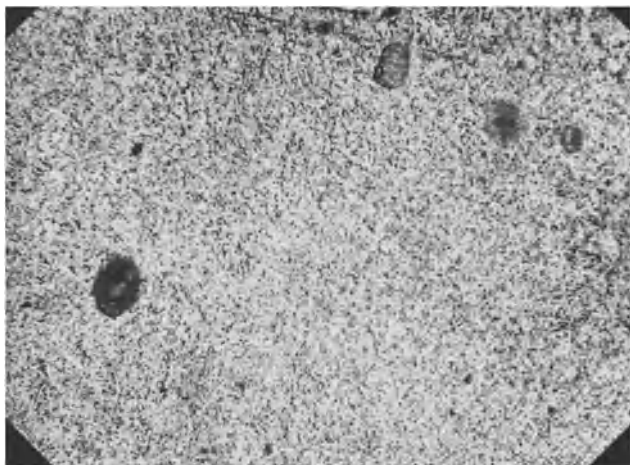


Abb. 106. Poren in einer Naht, die mit nackten Elektroden hergestellt wurde. $V = 100\times$, davon $\frac{3}{4}$.

Kohlenoxyd oder Kohlensäure gefüllt. Besonders groß und zahlreich sind diese bei Schweißungen, die mit nackten Drähten hergestellt wurden (Abb. 106). In

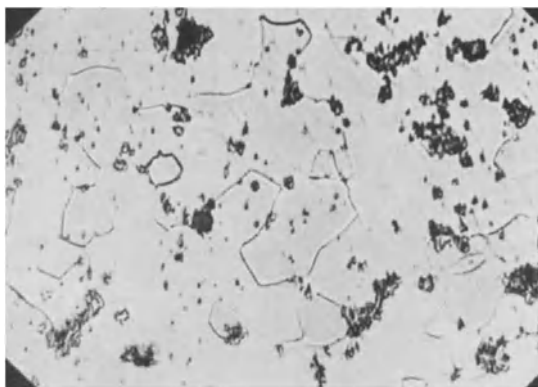


Abb. 107. Poren in einer Naht, die mit ummantelten Drähten geschweißt wurde. $V = 530\times$, davon $\frac{3}{4}$.

wird das überhitzte Gefüge im Baustoff wieder in den Ausgangszustand gebracht, wie auch das grobe Gefüge der oberen und unteren Decklagen des Schweißgutes verfeinert wird (Abb. 105). Das Normalglühen kann aber im Stahlbau ebenso wie das Spannungsfrei-glühen bei 600°C nur in Ausnahmefällen durchgeführt werden, da die Stücke in der Regel so groß sind, daß sie nicht in Öfen gebracht werden können.

Im Schweißgut findet man meist noch Einschlüsse, z. B. Poren mit

geringerer Zahl und Größe sind sie aber auch bei Nähten zu finden, die mit ummantelten

Schweißdrähten geschweißt wurden (Abb. 107). Diese Poren sind in der Regel ungefährlich. Ihre runde Form braucht nicht einmal die Dauerfestigkeit herabzusetzen. Allerdings dürfen sie nicht mit groben Blasen verwechselt werden, die bei unbrauchbaren Drähten schon mit dem bloßen Auge in der Schweißnaht festzustellen sind (Abb. 108). Diese setzen selbstverständlich die Festigkeit stark herab.

Stickstoffeinschlüsse in Gestalt von Nitridnadeln sind nur im normalgeglühten Schweißgut unter Umständen festzustellen (Abb. 109). Ihr Fehlen schließt das Vorhandensein von Stickstoff jedoch nicht aus.

2. Mechanisch-technologische Gütewerte.

Die mechanisch-technologischen Gütewerte der Schweißverbindungen sind abgesehen von deren Form und Ausbildung abhängig vom Gefügestand. Es soll an dieser Stelle nur die gesamte Schweißverbindung in ihren Güteeigenschaften behandelt werden, nicht aber das reine Schweißgut. Die Eigenschaften des reinen Schweißgutes sind ja nur bei ungewöhnlich dicken Nähten von Bedeutung, im Regelfalle muß die gesamte Verbindung als solche betrachtet werden.

Bei der Prüfung von Schweißverbindungen stellt man gewöhnlich die statische Zugfestigkeit, die Verformbarkeit gemessen am Biegewinkel, die Kerbschlagzähigkeit sowie die Härte fest. In manchen Fällen untersucht man auch die Dauerfestigkeit.

Streckgrenze, Dehnung und Einschnürung kann man an Schweißverbindungen fast nie feststellen, da die eigentliche Verbindung nur einen geringen Teil des Probestabes ausmacht, so daß also nicht nachgewiesen werden kann, ob die ermittelten Werte der Schweißverbindung oder dem Baustoff zugeschrieben werden müssen. Die statische Zugfestigkeit der üblichen Baustähle St 00 bis St 52 zu erreichen, ist bei Verwendung geeigneter Schweißdrähte und einwandfreier Arbeitsausführung nicht schwierig. Nackte, Seelen- und umhüllte Drähte, die ausreichende Werte liefern, stehen in genügender Menge zur Verfügung.

Gute Biegewinkel zu erzielen, ist wesentlich schwieriger. Die genannten Stahlsorten ergeben in ungeschweißtem Zustande einen Biegewinkel von 180° . Mit Schweißverbindungen kann dieser Winkel nur dann erreicht werden, wenn ummantelte Drähte verwendet werden. Mit diesen kann an St 37 ein Biegewinkel von 90° — 180° erreicht werden, während mit Seelendrähten und dünn umhüllten Drähten Werte von etwas über 90° , mit nackten Drähten jedoch nur 40° — 50° erzielt werden. Bei St 52 erreicht man auch mit ummantelten Drähten in der Regel nur Werte von 90° und darüber, nur bei Verwendung weniger besonderer Schweißdrähte 180° . Mit Seelendrähten können am St 52 90° , mit nackten Drähten im allgemeinen nur 40° — 50° erzielt werden.

Mit ummantelten Drähten kann an St 34 eine Kerbschlagzähigkeit von 8 mkg/cm^2 , an St 37 und St 52 von 5 mkg/cm^2 darüber erreicht werden. Bei dünn umhüllten und bei Seelendrähten wird der Wert von 5 mkg/cm^2 nur selten überschritten, während bei nackten Drähten nur Werte von 1 — 2 mkg/cm^2 üblich sind.

Die Härte der Schweißnähte entspricht im allgemeinen ihrer Festigkeit. Schweißnähte an Baustählen sind bei Verwendung der richtigen Schweißdrähte immer gut bearbeitbar.

Die Dauerfestigkeit der Schweißverbindungen ist wesentlich geringer als die des ungeschweißten Baustoffes. Einwandfrei geschweißte Verbindungen mit abgearbeiteter Raupe ergeben bei St 37 Werte von mehr als 17 kg/mm^2 , bei

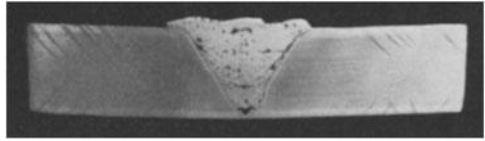


Abb. 108. Blasen in einer schlecht geschweißten Naht.
V = 1 \times .



Abb. 109. Nitridnadeln im Schweißgut (normal-geglüht).
V = 530 \times , davon $\frac{3}{4}$.

St 52 nur 18 kg/mm² und darüber. Auffallend ist es, daß diese Werte unter Umständen auch mit nackten Drähten ebenso wie mit Seelendrähten, dünn umhüllten und ummantelten Drähten erzielt werden können. Allerdings ist es wesentlich schwieriger, mit nackten Drähten vollkommen einwandfreie Nähte herzustellen als z. B. mit Manteldrähten. Schon geringe Fehlstellen setzen aber bekanntlich die Dauerfestigkeit wesentlich herab.

Für die Beurteilung der einzelnen Schweißdrahtsorten dürfen jedoch nicht die genannten Werte schematisch zugrunde gelegt werden. Es sind bei der Auswahl der Drähte für eine bestimmte Arbeit oft ganz andere Gesichtspunkte maßgebend, nämlich solche schweißtechnischer und wirtschaftlicher Art usw. Diese werden in einem besonderen Abschnitt behandelt.

3. Widerstand gegen Rosten.

Schweißnähte sind in der Regel gegen Rosten widerstandsfähig. Die Zunderschicht, die jede unbearbeitete Schweißnaht bedeckt, schützt diese ähnlich wie die Walzhaut das Blech. Jedoch sind auch bearbeitete Schweißnähte nicht besonders gefährdet. Überdies werden im Stahlbau ja alle Werkstücke mit einem Rostschutzmittel überzogen. Es muß aber darauf aufmerksam gemacht werden, daß nur einwandfrei gesäuberte Nähte, auf deren Oberfläche keine Schlackenteilchen mehr vorhanden sind, gut angestrichen werden können. Sind Schlackenreste noch vorhanden, so lösen diese sich allmählich und können dann den Anstrich zerstören.

E. Schweißdrahtlieferbedingungen.

Die Fülle der von den Lieferanten hergestellten Schweißdrähte ist außerordentlich groß, so daß es auch dem Fachmann oft schwer fällt, die richtige Wahl zu treffen. Um in dieser Beziehung eine Erleichterung zu schaffen, sind Lieferbedingungen für Schweißdrähte herausgegeben worden. Die für die allgemeine Industrie bestimmten Lieferbedingungen sind in DIN Vornorm 1913 zusammengefaßt, während die Deutsche Reichsbahn ihre eigenen Lieferbedingungen auf-

Zahlentafel 2. Schweißdraht für Lichtbogenschweißung nach DIN Vornorm 1913.

Schweißdraht				Geschweißte Proben				
Art	Sorte Marke	Kenn- farbe	Zulässige Beimengungen		Zugfestig- keit σ_B kg/qmm ² mindestens	Biegewinkel Grad mindestens Blech für 10mm Dicke	Kerbschlag- zähigkeit mkg/cm ² mindestens	Schmied- barkeit
			P	S				
			% höchstens					
Verbindungs- draht	E 34 k	gelb	zusammen 0,7		34	150	7	ja
	E 37/42	rot	0,04	0,03	37/42 ¹	50 ²	—	ja
	E 37/42 K	rot	0,03	0,03	37/42 ¹	90	5	ja
	E 52	grün	0,04	0,03	52	50	—	ja
	E 52 K	grün	0,03	0,03	52	70	5	ja
Auftragdraht	Ea 150	weiß	—	0,03	—	—	—	—
	Ea 250	braun	—	0,03	—	—	—	—
	Ea 350	violett	—	0,03	—	—	—	—

Die Drähte mit dem Zusatz K in der Markenbezeichnung sind außer durch die Grundfarben noch durch Sonderbezeichnung, wie Schachtelpackung, Schilder usw. zu kennzeichnen.

¹ Die Mindestzugfestigkeit der Schweißverbindung muß der Nennfestigkeit des Werkstoffes entsprechen,

² Werden 42 kg/mm² verlangt, so beträgt der Biegewinkel mindestens 40°.

Zahlentafel 3. Schweißdrähte für Lichtbogenschmelzschweißung nach der Reichsbahnvorschrift.
Drahtsorten und Mindestgütwerte.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		13	14
											Gütwerte für Proben aus reinem Schweißgut			
Lfd. Nr.	Schweißdraht für	Drahtsorten	Kennfarbe	Zugf. σ B kg/mm ²	Brinellhärte kg/mm ²	Biege- winkel bis 1. Anriß (querver- schweißte Probe)	Kerb- zähligkeit mkg/cm ²	Warmverform- barkeit nach		Biege- winkel bis 1. Anriß (längs- geschweißte Proben mit Nut)	Zugf. σ B kg/mm ²	Dehnung (langer Propor- tionalstab, \varnothing 10 mm)	Bemerkungen	
								Biege- versuch	Schmie- de- versuch					
1	Verbindungs- schweißung	E 34 ¹	gelb	34	—	180	8	ja	ja	—	34	25	Schweißdrahtsorte E 34 z ist auch als E 37 und E 37 z bedingungs- gemäß Schweißdrahtsorte E 37 und E 37 z eignet sich auch für St 42 Schweißdrahtsorte E 52 ist auch als E. 37 und Sorte E 52 z als E 37, E 37 z und E 52 bedingungs- gemäß Die härteren Schweiß- drahtsorten sind für besondere Beanspru- chung — starke Ab- nutzung — bestimmt	
2		E 34 z	rot	37	—	50	—	—	ja	—	—	—		
3		E 37	„	—	—	—	—	—	—	ja	—	—		
4		E 37 z	„	—	—	90	5	ja	ja	—	37	20		
5		E 52	grün	—	—	50	—	—	—	ja	52	—		
6		E 52 z	„	—	—	90	5	ja ³	ja	20 ^{0 3}	52 ³	20 ³		
7	desgl.	Sonder- güten	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
8	Auftrags- schweißung	Ea 150	weiß	—	—	—	—	—	—	—	—	—	für Sonderstähle, Kessel, Feuerbüchsen, Kesselwagen usw. nach besonderen Vorschriften (für Brücken s. Anhang)	
9		Ea 250	braun	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
10		Ea 350	violett	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
11		Ea 500	grau	—	—	—	—	—	—	—	—	—		

¹ Gütwerte für E 37 sind maßgebend, der Draht wird nur ausnahmsweise an St 34 geprüft, somit im allgemeinen kein Unterschied zwischen Sorte E 34 und E 37.

² Offensichtliche Ausreißer werden nicht bewertet.

³ Nur für die erstmalige Zulassung.

gestellt hat. Da die Reichsbahn sowie die mit ihr zusammenhängenden Reichsautobahnen als Besteller von Stahlbauten eine besonders große Bedeutung besitzen, so sollen hier nicht nur die Vornorm 1913 (Zahlentafel 2), sondern auch die Schweißdrahtlieferbedingungen der Reichsbahn (Zahlentafel 3) besprochen werden.

Es würde zu weit führen, alle einzelnen Punkte zu behandeln, deshalb seien an dieser Stelle nur die Einteilung der Drähte, die vorgeschriebenen Gütwerte sowie die Art der Schweißdrahtprüfung besprochen.

Beide Lieferbedingungen unterscheiden zunächst Drähte für Verbindungsschweißungen (Zeiger E) und Drähte für Auftragsschweißungen (Zeiger Ea). Die Drähte für die Gasschmelzschweißung, für die diese Vorschriften ebenfalls gelten, haben die Zeiger G bzw. Ga.

Ein weiterer Unterschied wird gemacht durch Angabe der Festigkeit der mit den Schweißdrähten hergestellten Schweißverbindungen. Diese soll grundsätzlich mindestens gleich der Nennfestigkeit des verschweißten Baustoffes sein. Auf dieser Grundlage werden folgende Sorten eingeteilt: E 34 für St 34, E 37 für St 37 und E 52 für St 52 (Tafel 2 und 3). Bei den Drähten für Auftragschweißungen gibt die Zahl nicht die Zugfestigkeit, sondern die Brinellhärte der Auftragsschweißung an. Hier sind die Sorten Ea 150, Ea 250, Ea 350 und Ea 500 vorgesehen.

Um die einzelnen Schweißdrahtsorten in der Werkstatt leicht auseinander halten zu können, sind besondere Farbkennzeichnungen vorgeschrieben. Gelb ist die Sorte E 34, rot die Sorte E 37 und grün die Sorte E 52. Die Auftragsdrähte haben die Farben Weiß, Braun, Violett und Grau.

Bei den Verbindungsdrähten ist noch ein Unterschied gemacht zwischen gewöhnlichen Drähten und solchen mit hoher Verformbarkeit (Biegewinkel und Kerbschlagzähigkeit), die die Zeiger k bzw. z tragen.

Zur Prüfung der Verbindungsdrähte werden Stumpfnähte, in der Regel V-Nähte, hergestellt an dem Baustoff, für den die Drähte bestimmt sind. Aus den Probelplatten werden die Probestäbe für die Zug-, Biege-, Schmiede- und Kerbschlagprüfung herausgetrennt. Eine Wärmenachbehandlung ist in keinem Falle vorgesehen. Auf die Prüfung von Proben aus reinem Schweißgut wird in der Regel verzichtet. Nur die Reichsbahn behält sich vor, bei der erstmaligen Zulassung eines Schweißdrahtes auch die Eigenschaften des reinen Schweißgutes zu untersuchen.

Sehr wichtig ist die von der Reichsbahn vorgeschriebene Prüfung der Schweißnahttrissigkeit, eine Eigenschaft die im Abschnitt „Schrumpfung und Spannung“ noch besonders behandelt wird.

F. Gesichtspunkte für die Auswahl der Schweißdrähte.

Die für das Schweißen von Stahlbauten bestimmten Drähte müssen einmal den für diese geltenden Vorschriften entsprechen, dann aber auch für den einzelnen Fall praktisch geeignet sein.

1. Vorschriften.

Nach DIN 4100 dürfen nur geprüfte und DIN 1913 entsprechende Schweißdrähte für das Schweißen von Stahllhochbauten verwendet werden. Bei der Prüfung der Schweißer nach dieser Vorschrift soll bei der Kreuzstabprobe (Abb. 110) eine Zugfestigkeit von 26 kg/mm^2 bei St 37 sowie von 39 kg/mm^2 bei St 52, bei der Stumpfnahprobe (Abb. 111) von 37 bzw. 52 kg/mm^2 erreicht werden. Der Biegewinkel soll bei beiden Stahlsorten mindestens 50° betragen (Probe mit bellassener Wulst).

Diese Werte können mit sämtlichen der DIN Vornorm 1913 bzw. den Schweißdrahtlieferbedingungen der Reichsbahn entsprechenden Verbindungsschweißdrähten erreicht werden, sofern der Schweißer ein durchschnittliches Können besitzt.

Auch in DIN 4101 werden für das Schweißen vollwandiger, stählerner Straßenbrücken die gleichen Bedingungen gestellt.

Es sei jedoch an dieser Stelle bemerkt, daß das Bestehen dieser *Schweißerprüfung* noch kein Beweis für die Fähigkeiten des Schweißers ist. Die geforderten

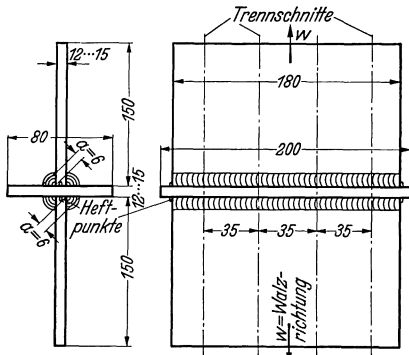


Abb. 110. Kreuzprobe nach DIN 4100 und 4101.

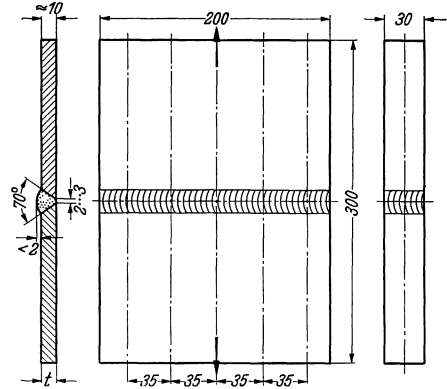


Abb. 111. Stumpfnahtheprobe nach DIN 4100 und 4101.

Werte sind nämlich so niedrig, daß sie auch bei mangelhaftem Können erreicht werden können, falls ein Schweißdraht hoher Verformbarkeit oder hoher Festigkeit verwendet wird. Die in sämtlichen Vorschriften angegebenen Proben für die Überwachung der Schweißer (Abb. 112 und 113) sagen in dieser Beziehung viel

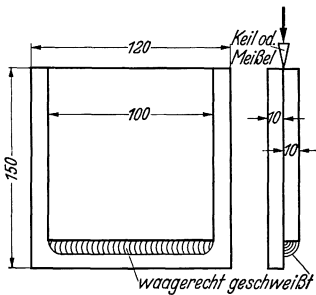


Abb. 112. Keilprobe für die Schweißerprüfung nach DIN 4100 und 4101.

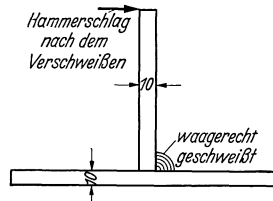


Abb. 113. Winkelprobe für die Schweißerprüfung nach DIN 4100 und 4101.

mehr aus, da bei ihnen der Bruch in der Schweißnaht erzwungen wird und nicht eine leicht erreichbare Zahl, sondern das Gefüge beurteilt wird.

Wesentlich weitgehender als die genannten Normen sind die „Vorläufigen Vorschriften für geschweißte, vollwandige Eisenbahnbrücken“ (Dienstvorschrift 848 der Deutschen Reichsbahn). Für die Schweißerprüfung werden in dieser Vorschrift zwar ebenfalls keine höheren Werte verlangt als in DIN 4100 und 4101, die Schweißdrähte müssen aber den Lieferbedingungen der Reichsbahn entsprechen und außerdem bei einer besonderen Zulassungsprüfung an Stumpfnähten eine bestimmte Ursprungsfestigkeit auf Zug ergeben. Diese muß bei Querproben (Abb. 114) 14 kg/mm² bei St 37 und 15 kg/mm² bei St 52 in unbearbeitetem Zustande der Naht betragen, bei bearbeiteten Nähten 17 bzw. 18 kg/mm², jeweils

bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechslern. Bei unbearbeiteten Längsnähten (Abb. 115) sind 17 bzw. 18 kg/mm² vorgeschrieben. Diese zusätzliche Prüfung wird nur von guten Schweißdrähten bestanden.

Die Reichsbahn schreibt außerdem in allen Fällen vor, daß die für Reichsbahnzwecke zu verwendenden Drähte außer der laufenden Abnahme zunächst eine Zulassungsprüfung durchmachen, über deren Ergebnis der Hersteller ein Zeugnis erhält.

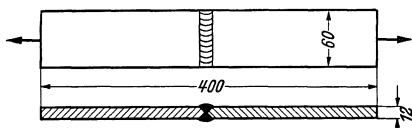


Abb. 114. Schweißzugprobe für die Zulassung von Schweißdrähten nach Reichsbahnvorschrift 848.

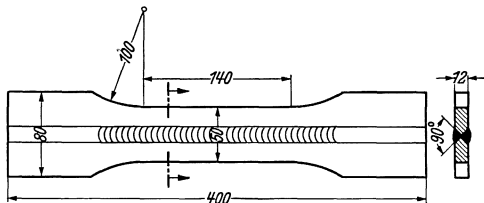


Abb. 115. Schweißzugprobe für die Zulassung von Schweißdrähten nach Reichsbahnvorschrift 848.

Vor der Beschaffung von Schweißdrähten für Schweißarbeiten, die für die Reichsbahn bestimmt sind, tut der Besteller deshalb gut daran, sich dieses Zeugnis vorlegen zu lassen.

2. Wirtschaftliche und praktische Gesichtspunkte.

Die billigsten Schweißdrähte sind die nackten Drähte, dann folgen im Preise die dünnumhüllten Drähte, die Seelendrähte und schließlich die ummantelten Drähte.

Bei den dünnumhüllten und bei den ummantelten Drähten nennen die Hersteller meistens den Stückpreis. Da aber die Länge oft verschieden ist (250 bis 450 mm), so ist es besser, die Preise der reinen Drähte (ohne Umhüllungsmasse) gewichtsmäßig miteinander zu vergleichen. Es ergeben sich dann zur Zeit etwa folgende Werte, bezogen auf das reine Stahlgewicht:

Nackte Drähte	. . . . .	3 (3,25) mm	∅	0,26—0,35 RM./kg
		4	mm	∅ 0,25—0,32 RM./kg
		5	mm	∅ 0,24—0,31 RM./kg
Dünnumhüllte Drähte	. . . . .	3 (3,25) mm	∅	0,75—1,00 RM./kg
		4	mm	∅ 0,65—0,80 RM./kg
		5	mm	∅ 0,60—0,70 RM./kg
Seelendrähte	. . . . .	3 (3,25) mm	∅	0,85—1,10 RM./kg
		4	mm	∅ 0,81—1,07 RM./kg
		5	mm	∅ 0,78—1,02 RM./kg
Ummantelte Drähte	. . . . .	3 (3,25) mm	∅	1,60—5,70 RM./kg
		4	mm	∅ 1,35—4,60 RM./kg
		5	mm	∅ 1,20—2,85 RM./kg

Bei den Manteldrähten wurde der Berechnung ein Gewichtsanteil des Mantels am Gesamtgewicht von 30% zugrunde gelegt. Bei dünnumhüllten Drähten kann das Gewicht der Hülle praktisch vernachlässigt werden.

Zum Vergleich seien noch für die Manteldrähte die Preise je Kilogramm Gesamtgewicht angegeben:

3 (3,25) mm	∅	1,10—4,00 RM./kg
4	mm	∅ 0,95—3,20 RM./kg
5	mm	∅ 0,85—2,00 RM./kg

Der Anteil des Mantelgewichtes schwankt zwischen 25—50%. Die oben genannten Preise sind also zweckmäßig im Einzelfall neu zu errechnen.

Die vorstehenden Preise sind Listenpreise, bei größeren Bestellungen von dünnumhüllten und ummantelten Drähten werden Preisermäßigungen bis zu 25% gewährt.

Hochlegierte Schweißdrähte, darunter auch solche für sehr harte, zähe und verschleißfeste Auftragschweißungen sind wesentlich teurer.

Die großen Preisunterschiede sowohl zwischen den einzelnen Schweißdrahtgattungen, wie innerhalb dieser Gattungen selbst, dürfen nicht zu der Ansicht verleiten, daß diese nur in Güteunterschieden begründet und deshalb in allen Fällen berechtigt sind.

Nähte, die praktisch frei von Sauerstoff und Stickstoff sind und deshalb eine besonders hohe Verformbarkeit besitzen, lassen sich allerdings nicht mit den billigen, nackten Drähten herstellen, sondern nur mit den wesentlich teureren, ummantelten Drähten. Wird eine hohe Verformbarkeit verlangt, so muß deshalb diese Schweißdrahtgattung gewählt werden. Damit ist aber nicht gesagt, daß, abgesehen von Schweißungen an Dampfkesseln, für jede Schweißarbeit an einem hochbeanspruchten Bauteil einer dieser oft als „hochwertig“ bezeichneten Schweißdrähte verwendet werden muß. Es gibt genug Beispiele dafür, daß hochbeanspruchte Bauteile, die bei zweckmäßiger Formgebung und Anordnung der Schweißnähte mit nackten Drähten geschweißt worden sind, allen Betriebsbeanspruchungen, auch solchen dynamischer Art, dauernd gewachsen sind.

Von großem Einfluß auf die Beschaffung der Schweißdrähte ist die Art der zur Verfügung stehenden Schweißgeräte. Sind in der Hauptsache nur wechselstromliefernde Umspanner (Transformatoren) vorhanden, so scheidet nackte Drähte vollständig aus, da diese nur mit Gleichstrom verschweißt werden können. Nur wenn Gleichstrom zum Schweißen zur Verfügung steht (Umformer und Gleichrichter), wird durch die Stromart die Wahl der Schweißdrähte nicht eingeengt.

Sehr wichtig ist die Lage der Nähte beim Schweißen. Können die Nähte in waagerechter Lage geschweißt werden, so ist es möglich, mit ummantelten Drähten bei hoher Stromstärke so große Schweißgeschwindigkeiten zu erzielen, daß der höhere Preis gegenüber nackten Drähten an Bedeutung verliert. Muß dagegen senkrecht oder überkopf geschweißt werden, so ist die Stromstärke in allen Fällen niedrig zu halten, damit das Schweißgut nicht abtropft. In diesem Falle sind die billigen, nackten Drähte ihrem Preise entsprechend auch wirtschaftlicher als andere Drähte. Hohlkehlnähte aber, die in vielen Fällen vorgeschrieben werden, lassen sich jedoch nur mit ummantelten Drähten schweißen.

3. Güte der Schweißverbindungen.

Mit allen, für die betreffende Stahlsorte bestimmten Schweißdrähten kann die statische Zugfestigkeit des Baustoffes ohne Schwierigkeiten erreicht werden. Die übrigen Eigenschaften zu erzielen, wie Streckgrenze, Dehnung und Kerbschlagzähigkeit ist aber wesentlich schwieriger.

Da die Streckgrenze und die Dehnung, wie schon oben erwähnt, an Schweißverbindungen im allgemeinen nicht gemessen werden können, begnügt man sich damit, das Maß der Verformbarkeit mit Hilfe des erreichbaren Biegewinkels zu ermitteln. Die höchsten Biegewinkel an St 37 (180°) können nur mit ummantelten Drähten erreicht werden, dabei gibt es auch in dieser Gattung eine Reihe von Sorten, mit denen höhere Werte als 90° nur selten erzielt werden (s. S. 97). Bei St 52 ist ein Winkel von 180° nur in Ausnahmefällen erreichbar.

Ist die Verformbarkeit einer Schweißverbindung, gemessen am Biegewinkel, groß, so kann angenommen werden, daß Schrumpfspannungen durch plastische Verformung abgebaut und damit unschädlich gemacht werden können. Voraussetzung dafür ist jedoch, daß diese Spannungen nicht mehrachsrig auftreten, da dann eine Verformung nicht mehr möglich ist.

Man bevorzugt deshalb in vielen Fällen für Schweißverbindungen, bei denen starke Schrumpfspannungen zu erwarten sind, Drähte mit hoher Verformbarkeit, also z. B. ummantelte Drähte.

Die Kerbschlagzähigkeit ist ein Maß für die Alterungsbeständigkeit. Mit Alterung ist in der Regel bei Stahlbauten nicht zu rechnen. Man hat deshalb auch für die Drahtsorten, die für Stahlbauten in Betracht kommen, verhältnismäßig niedere Werte festgesetzt. Die höhere Kerbschlagzähigkeit teurer Drähte braucht deshalb in der Regel für den Stahlbauer kein Grund zu sein, diese zu beschaffen.

Nach den neuen Schweißdrahtlieferbedingungen der Reichsbahn ist es zulässig, Drähte der Sorte E 52 z an Stelle von Drähten der Sorten E 52, E 37 z und E 37 zu verwenden, ebenso sind die Sorten E 52 als E 37, E 37 z und E 37 für St 42, E 37 z als E 37 sowie E 34 z als E 37 z und E 37 bedingungsgemäß.

Der Stahlbauer, für den die Stahlsorten St 37 und St 52 in der Hauptsache in Frage kommen, wird also in der Regel mit den Sorten E 52 z und E 52 auskommen, so daß nur zwei Sorten auf Lager gehalten werden müssen, falls nicht für besondere Zwecke, z. B. für Hohlkehlnähte oder für Senkrecht- und Überkopfschweißungen, eine größere Auswahl von Schweißdrähten notwendig ist.

VI. Gasschmelzschweißen und Brennschneiden.

Für das Schweißen und das Brennschneiden von Stahl werden folgende Gase hauptsächlich verwendet:

Azetylen, Leuchtgas, Wasserstoff und Sauerstoff.

Die übrigen Gase kommen nur für Sonderfälle in Betracht. Für das Schweißen von Stahl ist die Verwendung anderer Gase als Azetylen und Sauerstoff nicht wirtschaftlich. Nur für das Brennschneiden kommen auch Leuchtgas und Wasserstoff an Stelle von Azetylen in Frage.

A. Azetylen.

Azetylen (C_2H_2) wird als Kalziumkarbid und Wasser hergestellt. Kalziumkarbid (CaC_2) wird aus Kohle und Kalk im elektrischen Lichtbogenofen erzeugt.

Aus 1 kg Karbid können theoretisch 348,7 Liter Azetylen hergestellt werden. In der Praxis rechnet man mit etwa 300 Liter Azetylen je Kilogramm Karbid.

Zur Erzeugung von Azetylen muß je Kilogramm Karbid 0,56 kg Wasser zugesetzt werden. In der Praxis wird meistens etwa das Zwanzigfache dieser Menge an Wasser (10 l) zugeführt, um eine zu große Erwärmung zu verhindern, da bei der Erzeugung von Azetylen etwa 450 Wärmeeinheiten entwickelt werden. Als Rückstand bleiben 1,16 kg Ätzkalk.

Azetylen ist farblos, nicht giftig und hat einen eigentümlich stechenden Geruch (Knoblauchgeruch). Es ist 10% leichter als Luft.

In Verbindung mit Luft neigt Azetylen zum Zerknallen. Schon bei 2,8% Azetylen in Luft beginnt die Zerknallgefahr und endet erst bei mehr als 73% Azetylen in Luft. Bei Mischung mit Sauerstoff beginnt die Zerknallgefahr ebenfalls bei 2,8%, endet aber erst bei mehr als 93%.

Bei einem Druck von mehr als 1,6 atü beginnt die Zersetzung des Azetylen. Ebenso gefährlich ist eine Temperatur von mehr als 100° C. Kommt Azetylen mit Kupfer in Berührung, so können sich zerknallfähige Verbindungen bilden.

Die Azetylen-Sauerstoff-Flamme hat eine Temperatur von etwa 3100° C.

1. Azetylerzeuger.

Für das Schweißen und für das Brennschneiden wird das Azetylen entweder an Ort und Stelle in Azetylenentwicklern erzeugt, oder es wird Azetylen in Flaschen bezogen und so verwendet.

Da die Bedienung von Azetylerzeugern nicht ungefährlich ist, müssen alle Erzeuger ebenso wie die Wasservorlagen, die in einem späteren Abschnitt behandelt werden, vom „Deutschen Azetylen-Ausschuß“ geprüft und zugelassen werden. Änderung an den Geräten ohne Genehmigung des Ausschusses ist verboten.

Weiter besteht eine besondere Vorschrift: „Polizeiverordnung über Herstellung, Aufbewahrung und Verwendung von Azetylen, sowie über Lagerung von Kalziumkarbid“. In dieser Vorschrift, kurz auch Azetylenverordnung (AV) genannt, sind die polizeilichen Vorschriften zusammengefaßt. Die Aufstellung von Azetylenentwicklern muß ebenso wie die Lagerung von Karbid der Ortspolizeibehörde angezeigt werden.

Nach der Größe unterscheidet man:

1. M-Entwickler (Montage-Entwickler, ortsbeweglich) bis zu 2 kg Karbidfüllung und bis zu 2000 l/Std. Azetylerzeugung.
2. J-Entwickler (Innen- oder Werkstattentwickler, ortsbeweglich) bis zu 10 kg Karbidfüllung und bis zu 6000 l/Std. Azetylerzeugung.
3. S-Entwickler (Stationäre Entwickler) über 10 kg Karbidfüllung und mehr als 6000 l/Std. Azetylerzeugung.

Nach dem erzeugten Gasdruck unterscheidet man folgende Bauarten:

1. Niederdruckentwickler, bis 300 mm (0,03 atü) Wassersäule.
2. Mitteldruckentwickler, 300—2000 mm (0,2 atü) Wassersäule.
3. Hochdruckentwickler, 2000—15000 mm (1,5 atü) Wassersäule.

Nach der Arbeitsweise unterscheidet man:

1. Einwurfentwickler, das Karbid fällt in das Wasser.
2. Zuflußentwickler, das Wasser fließt auf das Karbid.
3. Tauch- und Verdrängungsentwickler, das Wasser benetzt das Karbid je nach der Gasentnahme.

Die Art der Azetylerzeugung ist ohne Einfluß auf die Güte und Wirtschaftlichkeit des Gasschmelzschweißens und des Brennschneidens. Insbesondere spielt es keine Rolle, ob mit Hoch-, Mittel- oder Niederdruckazetylen geschweißt oder geschnitten wird. Bei Hochdruckanlagen ist allerdings die Sicherheit, daß auch an entfernten Zapfstellen der Azetylenleitung noch ein genügender Druck vorhanden ist, größer als bei Mittel- oder Niederdruckanlagen. Auch können für Hochdruckazetylen Rohrleitungen mit geringerem Querschnitt verwendet werden als für Niederdruckazetylen.

Reicht der Druck an entfernten Zapfstellen mit der Zeit nicht mehr aus, so kann, wenn man nicht den Leitungsquerschnitt erhöhen will, zwischen Erzeuger und Leitung ein Verdichter eingebaut werden, so daß man ohne Änderung des Erzeugers zu Hochdruckazetylen übergehen kann.

Niederdruckentwickler (Abb. 116) besitzen eine bewegliche, schwimmende Gasglocke, die durch ihr Gewicht den Gasdruck bestimmt. Ortsbewegliche Entwickler dieser Bauart müssen sehr vorsichtig gefahren werden, da sonst Wasser- und Gasverluste unvermeidlich sind.

Bei Mitteldruckentwicklern (Abb. 117) wird das Wasser durch den Gasdruck in einen höher gelegenen, offenen Behälter gedrückt. Durch den Unterschied zwischen dem oberen und unteren Wasserspiegel wird der Gasdruck bestimmt. Auch derartige Entwickler müssen vorsichtig bewegt werden, um das Herauspritzen des Wassers zu vermeiden.

Hochdruckentwickler sind allseitig geschlossen. Man unterscheidet zwei Behälterbauarten, nasse und trockene Behälter. Bei den nassen Behältern drückt

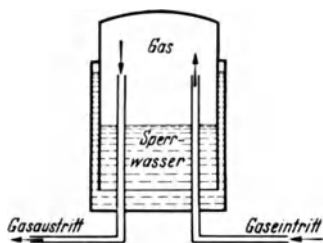


Abb. 116. Gassammler eines Niederdruckentwicklers.

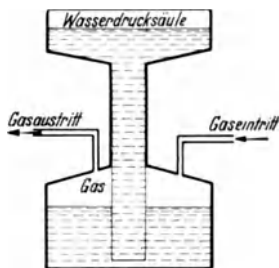


Abb. 117. Gassammler eines Mitteldruckentwicklers.

sind bei beiden Bauarten unmöglich. Das Hochdrucksystem ist deshalb besonders bei ortsbeweglichen Entwicklern dem Mittel- und dem Niederdrucksystem vorzuziehen. Auf den Vorteil des Hochdrucksystems bei langen Leitungen, die von ortsfesten Entwicklern ausgehen, wurde oben schon hingewiesen.

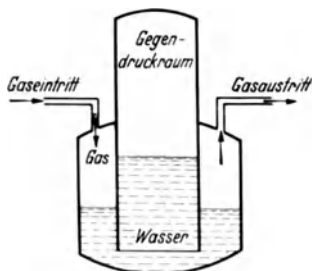


Abb. 118. Gassammler eines Hochdruckentwicklers, nasser Behälter.

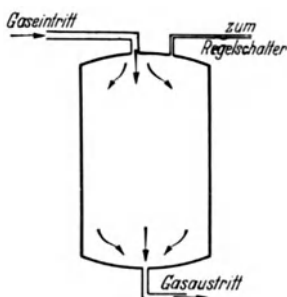


Abb. 119. Gassammler eines Hochdruckentwicklers, trockener Behälter.

Bei Einwurfentwicklern (Abb. 120), die jedoch nur ortsfest gebaut werden, fällt das Karbid in eine verhältnismäßig große Wassermenge. Das Wasser und das Gas bleiben deshalb kühl. Dies ist ein großer Vorteil, da heißes Gas Wasser aufnimmt, so daß sein Heizwert sinkt.

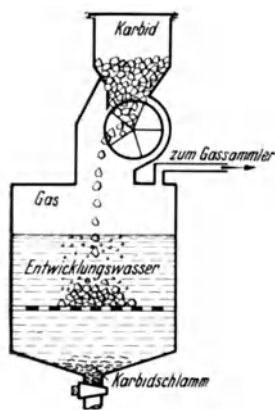


Abb. 120. Einwurfentwickler.

Bei diesem System muß besonders darauf geachtet werden, daß mit der Beschickung keine Luft in das Innere des Entwicklers gelangt. Die gelegentlich im Karbid zu findenden, von seiner Herstellung herrührenden, Ferro-Silizium-Stücke können nämlich beim Einfallen im Entwickler Funken schlagen, die ein etwa vorhandenes zerknallfähiges Azetylen-Luft-Gemisch entzünden würden. Die Beschickungsvorrichtung ist deshalb bei neuzeitlichen Einwurfentwicklern mit Schleusen so ausgerüstet, daß ein Zutritt von Luft unmöglich ist, oder während des Beschickens ein Strom von Gas durch die Einwurfföffnung nach außen strömt und so die Luft fernhält. Im Innern dieser Entwickler sind alle toten Räume vermieden, so daß bei der Inbetriebnahme keine Luftreste zurückbleiben können. Die Karbidzufuhr und damit die Gaserzeugung wird dabei durch den Gasdruck entweder mechanisch über Hebel und Zahnräder oder auf elektrischem Wege durch Ein- und Ausschalten eines Elektromotors, der das Beschickungsband oder die Beschickungstrommel bewegt, geregelt.

Zuflußentwicklern wird das Karbid in einer oder mehreren Schubladen zugeführt (Abb. 121). Das Wasser strömt dabei von oben in die einzelnen Fächer der Schubladen, in denen das Karbid und damit auch das Gas ziemlich heiß werden. Das Gas wird deshalb in der Regel noch besonders gekühlt. Zuflußentwickler werden ortsfest wie auch ortsbeweglich gebaut. Die einfache, auch bei Bedienungsfehlern ungefährliche Bedienungsweise ist ein Vorteil gegenüber den Einwurfentwicklern. Diese Entwickler gestatten im Gegensatz zu den häufig anzutreffenden Verdrängungsentwicklern einen ununterbrochenen Betrieb.

Verdrängungsentwickler (Abb. 122) besitzen einen mit Karbid gefüllten Korb, den das Wasser je nach dem Steigen oder Fallen des Gasdruckes mehr oder weniger stark benetzt. Die Entwicklung vollzieht sich entweder im Innern des Behälters oder getrennt von diesem. Das Verdrängungssystem ist bei ortsbeweglichen Entwicklern bis zu einer Füllung von 4—5 kg empfehlenswert, für größere Füllungen kommen Schubladentwickler in Frage. Ortsfeste Entwickler dieser Bauart sind nicht mehr üblich.

Zu den Verdrängungsentwicklern gehören auch die Beagidentwickler. Sie werden nicht mit Karbid, sondern mit Beagid genannten Preßlingen, die aus feingemahlenem Karbid und einem Bindemittel bestehen, beschickt. Diese Beagidkörper sind allerdings etwas teurer als Karbid, die Nachvergasung ist aber sehr gering, auch können die Beagidkörper bei Unterbrechung des Betriebes leicht aus dem Entwickler entfernt

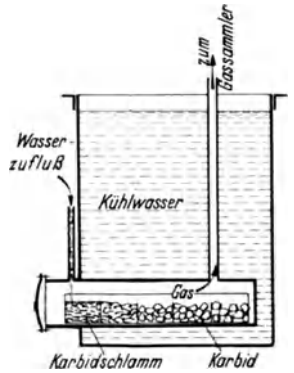


Abb. 121. Zuflußentwickler.

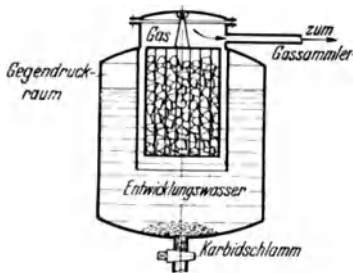


Abb. 122. Verdrängungsentwickler.

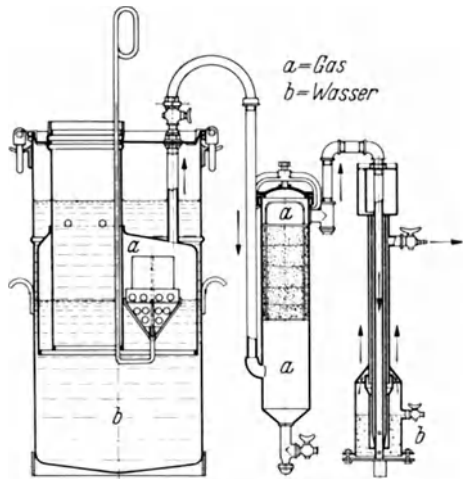


Abb. 123. Niederdruck-Beagid-Entwickler.

werden, ohne daß eine Zersetzung an der Luft durch Feuchtigkeitsaufnahme zu befürchten ist. Die Körper können auch während des Betriebes eingesetzt werden, so daß dieser pausenlos durchgeführt werden kann. Da Beagidentwickler nur nach dem Niederdrucksystem gebaut werden, so müssen sie vorsichtig gefahren werden, um Wasser- und Gasverluste zu vermeiden.

Die sehr einfache Bauart der Beagid-Entwickler (Abb. 123) macht diese für Baustellenarbeiten besonders geeignet.

Der Preis für das in Entwicklern aus Karbid erzeugte Acetylen beträgt etwa 0,95 RM./m³.

Bei der Erzeugung von Azetylen aus Karbid fällt sehr viel Kalkschlamm an dessen Beseitigung oft große Mühe bereitet. Es ist deshalb in jüngster Zeit der Versuch gemacht worden, Entwickler zu bauen, in denen dem Karbid nur soviel Wasser zugeführt wird, wie unbedingt zur Gaserzeugung nötig ist. An Stelle von Schlamm bleibt dann Kalkstaub zurück, der in Säcke abgefüllt und dann wesentlich einfacher als Karbidschlamm weggeführt werden kann. In manchen Gegenden werden Karbidschlamm ebenso wie der Kalkstaub zu Dünge- und Bauzwecken verwertet. Bis jetzt werden diese Entwickler nur als Niederdruckentwickler ortsfest gebaut.

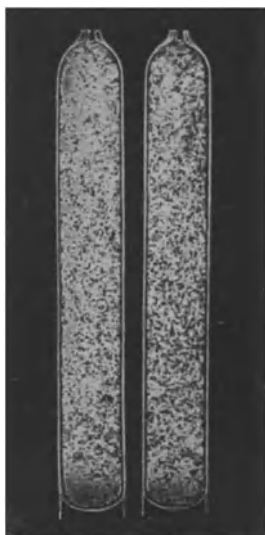


Abb. 124. Füllmasse in einer Azetylenflasche.

2. Azetylenflaschen.

Azetylen kann auch gebrauchsfertig in Flaschen bezogen werden. Da Azetylen nicht wie andere Gase ohne Gefahr verdichtet werden kann, muß ein anderer Weg eingeschlagen werden, um größere Azetylenmengen in dem kleinen Raum einer Flasche unterzubringen.



Abb. 125. Anteil der einzelnen Füllbestandteile in einer Azetylenflasche.

Azetylen wird zu diesem Zweck in Azeton, einer klaren, brennbaren Flüssigkeit gelöst. 1 Liter Azeton vermag bei einem Druck von 1 Atm. 25 Liter Azetylen aufzunehmen, bei einem Druck von 15 Atm. wie er bei den Azetylenflaschen üblich ist, jedoch 375 Liter. Eine Stahlflasche, der Regelgröße

enthält 15 Liter Azeton, also etwa 5,6 m³ Azetylen. In den Azetylenflaschen befindet sich das Azeton jedoch nicht frei, sondern es wird von einer Füllmasse (Abb. 124) aufgesogen. Diese Füllmasse besteht aus porösen Stoffen, wie

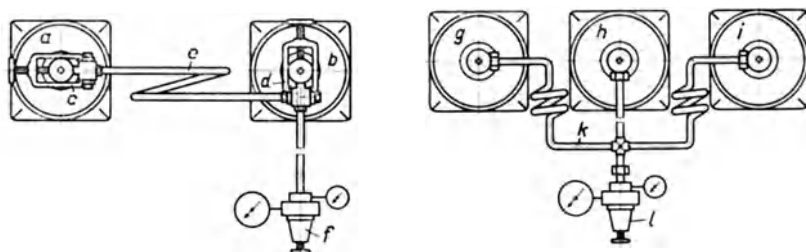


Abb. 126. Zusammenschließen mehrerer Flaschen.

Kieselgur, Holzkohle, Asbest, Bimskies, Torf, Zellstoff, Holzschliff u. dgl., denen meist noch ein Bindemittel zugesetzt ist.

Aufgabe der Füllmasse ist es, einmal das Azeton aufzusaugen, dann aber, jede Explosionswelle, die z. B. vom Brenner her kommt, aufzuhalten und so den Flascheninhalt vor dem Zerknall zu schützen. Diese zweite Aufgabe wird dadurch erfüllt, daß in den engen Röhrrchen der porösen Masse jede Zerknallwelle sofort erstickt wird.

Azetylenflaschen (Abb. 125) enthalten 25% poröse Masse sowie 38% Aceton, das sich nach der Sättigung mit Azetylen um 29% auf 67% ausdehnt. Der Rest

von 8% der Flasche ist zwar mit Füllmasse, jedoch nicht mit Azeton gefüllt. In diesem Raum, Sicherheitsraum genannt, sammelt sich das Azetylen, auch kann sich darin der Flascheninhalt ausdehnen, so daß ein gefährliches Ansteigen des Druckes vermieden wird.



Abb. 127. Flaschenwagen für Bauarbeiter.

Azetylenflaschen werden mit 5, 10, 15, 20 und 40 Liter Inhalt hergestellt. In der Regel verwendet man 40-Liter-Flaschen, für Rüstarbeiten aber auch kleinere Flaschen.

Mehr als 1000 Liter Gas soll auch den großen Flaschen stündlich nicht entnommen werden, da sonst Azeton mitgerissen wird. Dies entspricht beim Schweißen von Stahl einer höchstmöglichen Blechdicke von 10 mm, beim Brennschneiden von 100 mm. Sind dickere Bleche zu schweißen oder zu schneiden, so müssen 2 oder mehr Flaschen zusammengeschlossen werden (Abb. 126). Um ein Mitreißen von Azeton zu verhindern, müssen die Flaschen bei Gasentnahme stets senkrecht stehen. Aus dem gleichen Grunde soll auch der Flaschendruck nicht unter 3 atü sinken, es kann deshalb nicht der ganze Inhalt, sondern nur etwa 4,5 cbm verbraucht werden.



Abb. 128. Tornistergerät für Rüstarbeiter.

Mitgerissenes Azeton vermindert die Flammentemperatur, so daß die Güte der Schweißung sinkt. Außerdem muß es dem Füllwerk wieder ersetzt werden. Azetylenflaschen sind kenntlich durch gelben Farbanstrich oder gelben Farbstreifen. Da ihr Ventil nicht wie das der Sauerstoff- und der Wasserstoffflaschen

ein Handrad, sondern nur einen Vierkant besitzt, sowie der Druckminderer (s. diesen) ebenfalls abweichend von den anderen Gasflaschen nicht angeschraubt, sondern mit einem Bügel befestigt wird, können Azetylenflaschen auch bei undeutlichem Farbanstrich nicht mit anderen Flaschen verwechselt werden.

Flaschenazetylen ist besonders rein und stets kühl. Sein Preis ist aber auch etwas höher als der von Entwicklerazetylen. Er beträgt etwa 1,90 RM./m³.

Dieser höhere Preis kann weder durch Erhöhung der Arbeitsgüte noch der Schweißgeschwindigkeit ausgeglichen werden. In dieser Beziehung bestehen keine merklichen Unterschiede zwischen einwandfreiem Entwicklerazetylen und Flaschenazetylen. Der Vorzug dem Entwicklerazetylen gegenüber besteht dagegen in der verhältnismäßig ungefährlichen Handhabung der Flaschen sowie in der steten Betriebsbereitschaft. Für Rüstarbeiten ist deshalb die Verwendung von Azetylenflaschen von besonderem Vorteil (Abb. 127 und 128). Wird nur wenig geschweißt oder geschnitten, so kann auch in der Werkstatt das Flaschenazetylen wirtschaftlicher sein als das Entwicklerazetylen.

B. Sauerstoff.

Sauerstoff wird in Flaschen von 40 Liter Inhalt unter einem Druck von 150 Atm. geliefert. Die Flaschen enthalten demnach 6,0 m³ Sauerstoff. Zum Unterschiede von anderen Gasflaschen sind die Sauerstoffflaschen blau gestrichen. Ihr Flaschenventil ist wie das der Wasserstoffflaschen mit einem Handrad versehen. Das Druckminderventil wird angeschraubt, und zwar mit $\frac{3}{4}$ '' Rechtsgewinde, während Wasserstoffflaschen (rot gestrichen) Linksgewinde $\frac{1}{2}$ '' besitzen.

Der Reinheitsgrad von Sauerstoff soll 99,5% und mehr betragen. Bei geringerer Reinheit sinkt besonders beim Brennschneiden die Leistung sehr stark ab. Sauerstoff kostet etwa 0,50 RM./m³.

C. Zubehör.

1. Wäscher und Reiniger.

Das rohe Azetylen ist mit Ammoniak und Schwefelwasserstoff verunreinigt. Um es von diesen Stoffen zu befreien, wird es durch mit Wasser gefüllte Wäscher hindurchgeleitet, in denen es außerdem auch noch gekühlt wird. Die Azetylenentwickler besitzen dazu noch Reiniger, die mit Koks, Bimsstein u. dgl. gefüllt sind, um etwa mitgerissene Kalkteilchen zurückzuhalten. Eine besondere chemische Reinigung erübrigt sich.

2. Azetylen- und Sauerstoffleitungen.

Azetylenleitungen dürfen nicht aus Kupfer bestehen, da Azetylen und Kupfer eine zerknallfähige Verbindung eingeht.

Für Sauerstoffleitungen ist Kupfer oder ein anderer nichtrostender Werkstoff empfehlenswert.

Azetylenleitungen dürfen nicht in Kanälen liegen, da sich dort bei Undichtigkeiten gefährliche Gas-Luft-Gemische bilden können.

3. Wasservorlagen.

Jeder Azetylenentwickler *muß* mit einer Wasservorlage ausgerüstet sein. Liefert ein Entwickler Gas für mehr als einen Schweiß- oder Schneidstand, so ist jeder Stand zusätzlich mit einer weiteren Wasservorlage auszurüsten. Nur bei Verwendung von Flaschenazetylen wird auf die Wasservorlage verzichtet.

Zweck der Wasservorlagen ist es, Flammenrückschläge, die vom Brenner ausgehend den Entwickler zum Zerknall bringen könnten, aufzuhalten, sowie ein

Eindringen des Sauerstoffes in die Azetylenleitung und weiter in den Entwickler zu verhindern. Bei Niederdruckanlagen soll in der Wasservorlage auch noch ein etwaiger Unterdruck durch Ansaugen von Luft beseitigt werden, so daß keine Luft durch den Entwickler hindurch angesaugt werden kann, die dort ein gefährliches Gas-Luft-Gemisch verursachen könnte.

Die vom Deutschen Azetylen-Ausschuß zugelassenen Wasservorlagen — nur solche dürfen in den Verkehr gebracht werden — tragen eine Zulassungsnummer. Diese beträgt bei den nach den neuesten Vorschriften zugelassenen Wasservorlagen

- für Niederdruck 500 und mehr (Gebrauchsstellenvorlagen),
1500 und mehr (Hauptvorlagen an den Entwicklern),
- für Hochdruck 1000 und mehr (Gebrauchsstellenvorlagen),
2000 und mehr (Hauptvorlagen an den Entwicklern).

Es empfiehlt sich, nur Wasservorlagen mit diesen Zulassungsnummern zu beschaffen, da die Zulassung der anderen Wasservorlagen zurückgezogen ist.

Die Wirkungsweise einer einfach gebauten Wasservorlage zeigt Abb. 129. Bei dieser Bauart ist die Sicherheit gegen Flammenrückschläge von der Höhe des Wasserstandes abhängig. Mit dieser Höhe hängt jedoch auch der Druckverlust zusammen, der beim Niederdrucksystem dann unter Umständen so groß sein kann, daß das Schweißen erschwert wird. Abb. 130 zeigt eine Niederdruckwasservorlage, die auch bei geringer Wasserhöhe Flammenrückschläge sicher aufhält. Sie ist nach dem Verzögerungssystem gebaut und wirkt so, daß eine vom Brenner ausgehende Zerknallflamme einen Umweg durch die Rohrschlange machen muß, der durch sie erzeugte Druck jedoch unmittelbar auf das Sperrwasser einwirkt. Dieses wird in dem Azetyleneintrittsraum in die Höhe gedrückt, während in den anderen Raum die Öffnung des Sicherheitsrohres frei gelegt wird, so daß der Überdruck unschädlich entweichen kann.

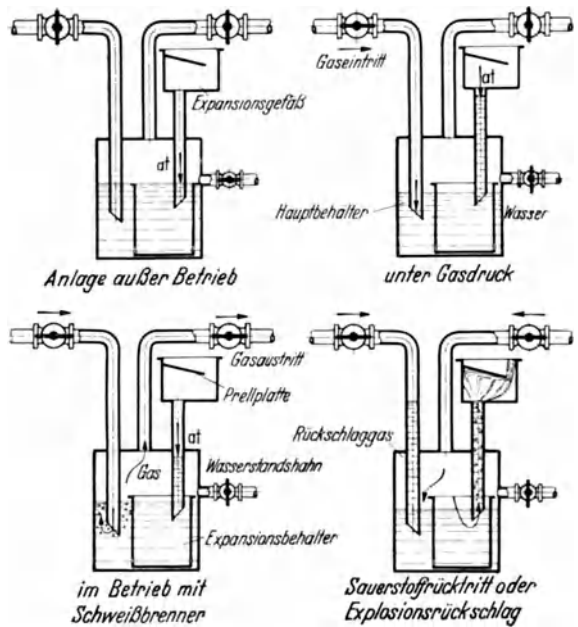


Abb. 129. Wirkungsweise einer Niederdruckwasservorlage alter Bauart.

Hochdruck-Wasservorlagen besitzen kein derartiges Rohr. Sie sind entweder so fest gebaut, daß sie dem Zerknall standhalten, oder aber besitzen sie eine mit einer Zinnfolie oder einem Ventil verschlossenen Öffnung, durch die der Druck entweichen kann.

Manche Wasservorlagen sind außerdem mit einem Ventil ausgerüstet, das den Sauerstoffrücktritt zuverlässig verhindert.

Geht durch eine Wasservorlage zu viel Azetylen hindurch, so kann sich eine zusammenhängende Kette von Gasbläschen statt einzelner Bläschen bilden. In diesem Falle kann dann die Flamme ihren Weg durch diese Bläschenkette

nehmen, die Wirkung der Wasservorlage ist damit aufgehoben. Dies kann durch eingebaute Verteilersiebe verhindert werden (Abb. 131).

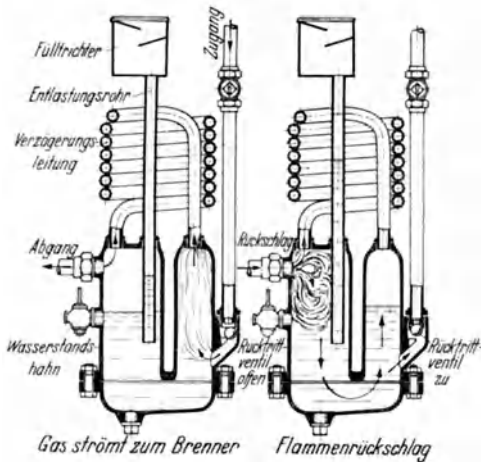


Abb. 130. Wirkungsweise einer Niederdruckwasservorlage nach dem Verzögerungssystem.

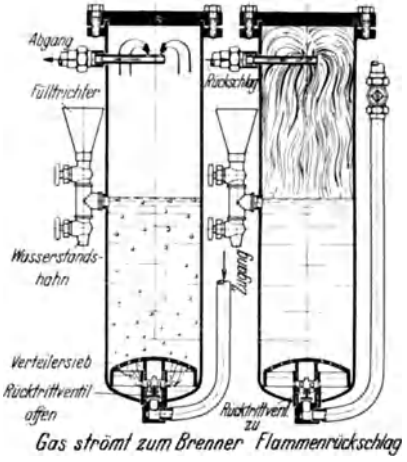


Abb. 131. Wirkungsweise einer Hochdruckwasservorlage.

In allen Fällen ist es jedoch verboten, an Gebrauchsstellenvorlagen mehr als einen Brenner anzuschließen, da dann unter Umständen der Azetylendurchgang zu groß ist.

4. Absperrventile und Druckminderer.

Die Absperrventile der Sauerstoffflaschen besitzen eine zweiteilige, die der Azetylenflaschen eine einteilige Spindel. Jene werden mit einem Handrad, diese

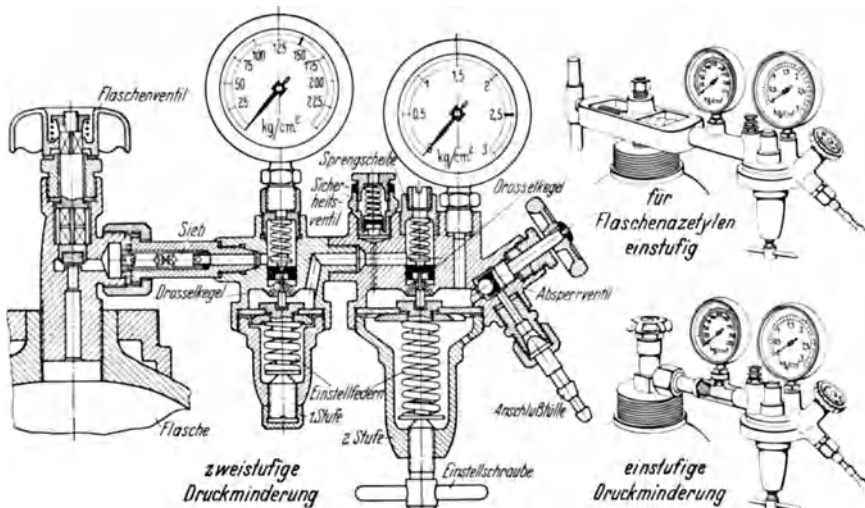


Abb. 132. Druckminderer, zweistufig für Sauerstoff, einstufig für Azetylen.

mit einer Schlüsselknagge bedient. An den Ventilen der Sauerstoffflaschen werden die Druckminderer angeschraubt, an denen der Azetylenflaschen mit Bügeln befestigt. Die Druckminderer (Abb. 132) besitzen zwei Druckmesser, einen zur

Angabe des Druckes des Flascheninhaltes und einen zur Angabe des Arbeitsdruckes.

Zweistufige Druckminderer sind besonders für Sauerstoffflaschen einstufigen vorzuziehen, da sie den Arbeitsdruck gleichmäßiger halten, auch ist bei ihnen die Gefahr des Einfrierens und des Ausbrennens geringer.

5. Schweiß- und Schneidbrenner.

In der Regel werden Ansaug- (Injektor-) Brenner benützt. Diese sind für Hoch-, Mittel- und Niederdruckazetylen gleich gut geeignet. In ihnen saugt der unter einem Druck von etwa 3 atü stehende Sauerstoff das Brenngas, das einen weit niedrigeren Druck aufweist, an.

Es gibt jedoch auch Gleichdruckbrenner, bei denen beide Gase dem Brenner unter gleichem Druck zugeführt werden. In diesem Falle muß dann der Sauerstoff auf den niederen Druck des Azetylen entspannt werden.

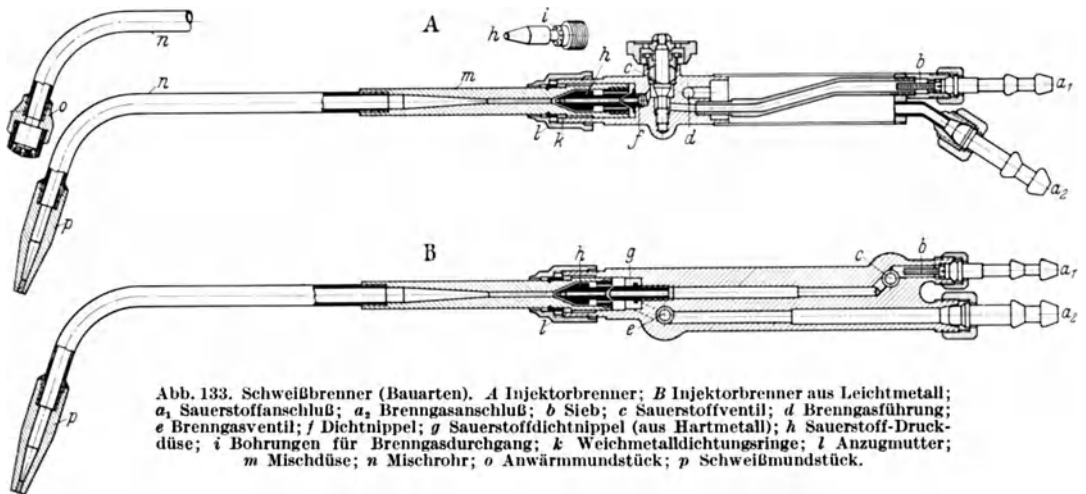


Abb. 133. Schweißbrenner (Bauarten). *A* Injektorbrenner; *B* Injektorbrenner aus Leichtmetall; *a*₁ Sauerstoffanschluß; *a*₂ Brenngasanschluß; *b* Sieb; *c* Sauerstoffventil; *d* Brenngasführung; *e* Brenngasventil; *f* Dichtnippel; *g* Sauerstoffdichtnippel (aus Hartmetall); *h* Sauerstoff-Druckdüse; *i* Bohrungen für Brenngasdurchgang; *k* Weichmetaldichtungsringe; *l* Anzugmutter; *m* Mischdüse; *n* Mischrohr; *o* Anwärmstück; *p* Schweißmündstück.

Neben diesem *Gleichdruckverfahren* sei auch noch das *Konstantdruckverfahren* erwähnt, bei dem der Druck des Sauerstoffes zentral geregelt und nicht, wie sonst üblich, an den einzelnen Schweiß- und Schneidstellen eingestellt wird.

Beide Verfahren kommen nur für ortsfeste Anlagen in Betracht und sind für Brennschneidarbeiten nicht geeignet, da beim Brennschneiden der Druck des Sauerstoffes zwischen 2 und 10 atü entsprechend der zu schneidenden Werkstoffdicke regelbar sein muß.

An einen brauchbaren Schweißbrenner werden folgende Forderungen gestellt:

Rückschlagsicherheit, gleichbleibende Ansaugfähigkeit auch bei Erwärmung, geringes Gewicht und leichte Bedienbarkeit.

Bei einem rückschlagsicheren Brenner darf die Flamme, die gelegentlich, z. B. wenn die Brennermündung verstopft wird, ins Innere zurückschlägt, dort nicht weiterbrennen, sondern muß erlöschen (abknallen). Erlischt die Flamme nicht, so schmort der Brenner ab, falls nicht sofort die Gaszufuhr abgestellt wird. Die Rückschlagsicherheit hat also nichts mit der Sicherheit gegen ein Zurückschlagen einer Zerknallwelle in die Leitung und in den Entwickler zu tun. Diese wird allein durch Verwendung einer Wasservorlage gewährleistet.

Der Brenner muß auch bei Erwärmung seine Ansaugfähigkeit beibehalten, sonst wird das richtige Mischungsverhältnis der Gase (Azetylen : Sauerstoff = 1 : 1) gestört, so daß die Güte der Schweißung nachläßt.

Um den Schweißer nicht zu ermüden, soll das Gewicht des Brenners möglichst gering sein. Brenner aus Leichtmetall sind deshalb besonders gut geeignet.

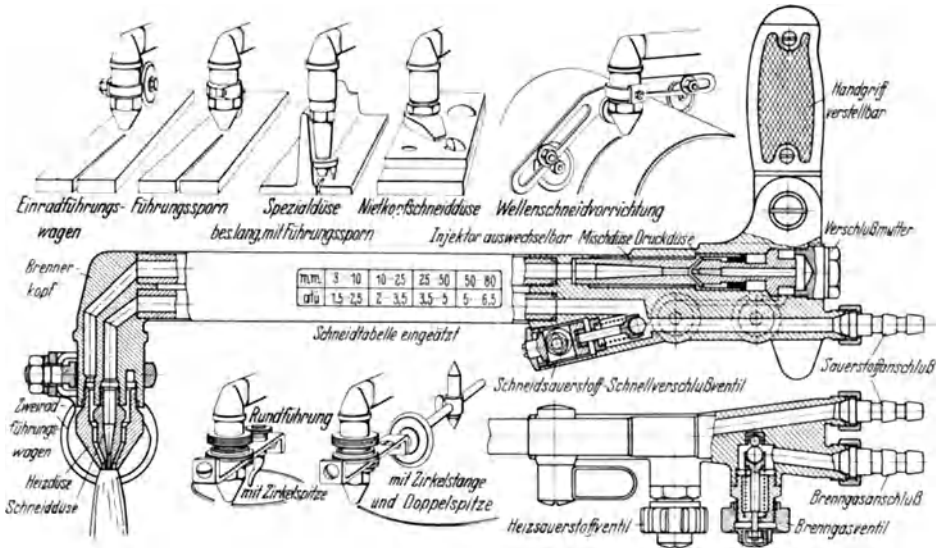


Abb. 134. Schneidbrenner.

Das Ventil, mit dem die Azetylenzufuhr an- und abgestellt bzw. geregelt wird, soll vor der Hand liegen, damit es mit der den Brenner führenden Hand während des Schweißens bedient werden kann (Abb. 133).



a Schlechter Handschnitt.



b Guter Handschnitt.



c Maschinenschnitt.

Abb. 135. Brennschnitte.

Fast alle Schweißbrenner sind mit auswechselbaren Einsätzen versehen, so daß je nach der zu verschweißenden Blechdicke größere oder kleinere Mundstücke eingesetzt werden können.

Für Schneidbrenner gelten grundsätzlich die gleichen Forderungen wie für Schweißbrenner. Sie sind wie diese gebaut, besitzen aber außer der Heizdüse noch eine besondere Schneiddüse für den Schnellsauerstoff (Abb. 134). Diese

ist entweder hinter jener angeordnet oder liegt in deren Innern, so daß dann die Heizdüse als Ringdüse ausgebildet ist.

Der Schneidsauerstoff wird in der Regel dem Brenner durch ein besonderes Ventil aus der gemeinsamen Heiz- und Schneidsauerstoffleitung zugeführt. In diesem Falle ändert sich der Druck in der Heizsauerstoffleitung, sobald



Abb. 136. Ortsfeste Brennschneidemaschine.

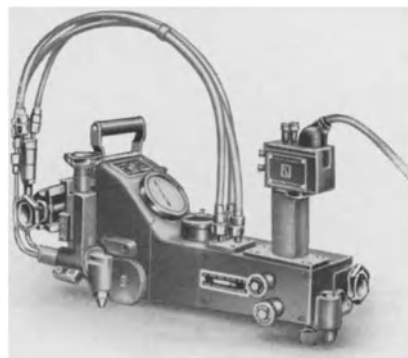


Abb. 137. Ortsveränderliche Brennschneidemaschine.

der Schneidsauerstoff angestellt wird. Jener muß dann nachgeregelt werden. Bei Beschaffung von Brennern insbesondere von kombinierten Schweiß- und Schneidbrennern muß darauf geachtet werden, daß der Sauerstoff für die Heizflamme für sich regelbar ist.

Bei Brennschneidmaschinen sind beide Sauerstoffleitungen in der Regel vollkommen voneinander getrennt.

Während Handschnitte meist etwas unsauber ausfallen, können Maschinenschnitte sehr glatte Kanten ergeben (Abb. 135). Brennschneidmaschinen werden als ortsfeste Maschinen (Abb. 136) wie als ortsveränderliche Maschinen gebaut (Abb. 137 und 138). Die letzteren können

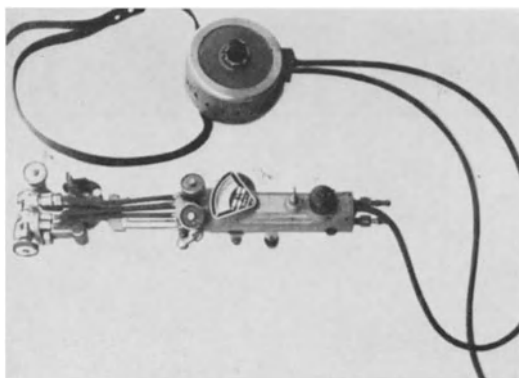


Abb. 138. Ortsveränderliche Brennschneidemaschine.

in vielen Fällen für Arbeiten verwendet werden, die sonst von Hand ausgeführt werden müßten. Sie besitzen motorischen Antrieb, so daß der Vorschub gleichmäßig ist. Werden sie an einem Lineal entlang geführt, so können gerade Schnitte oder Kurven von großer Genauigkeit hergestellt werden.

D. Ausführung von Schweiß- und Schneidarbeiten.

Bei der Gasschweißung unterscheidet man zwei Arbeitsverfahren: Rechtsschweißung und Linksschweißung.

Die ältere Linksschweißung (Abb. 139) sollte nur noch für Bleche bis zu einer Dicke von etwa 5 mm angewendet werden. Kennzeichnend für dieses Verfahren

ist das Vorwärmen durch die in der Schweißrichtung brennende Flamme, die den ruhig geführten Draht in halbkreisförmiger Bewegung umgibt.

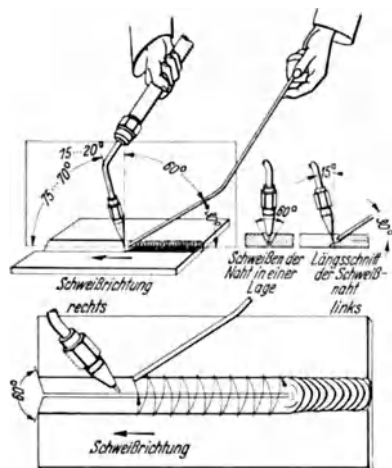
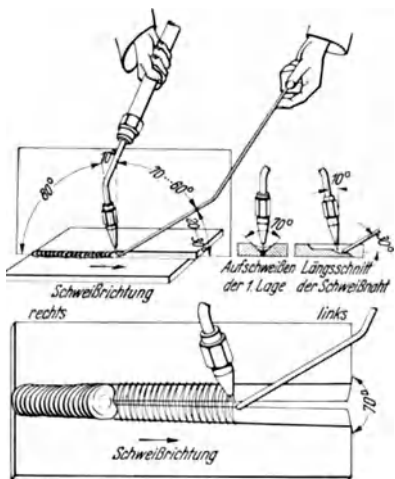


Abb. 139. Nachlinksschweißung bis Blechdicke 5 mm anzuwenden.

Abb. 140. Nachrechtsschweißung. Bei dickeren Blechen anzuwenden.

Bei der neuzeitlichen Rechtsschweißung (Abb. 140) wird die Flamme entgegengesetzt der Schweißrichtung ruhig gehalten, während mit dem Schweißstab eine

Zahlentafel 4. Gasverbrauch und Leistung beim Schweißen.

Brenner Bezeichnung mm	Blechdicke mm	Sauerstoff			Azetylen		Schweiß ¹	
		Druck atü	l/Std	l/m	l/Std.	l/m	Zeit Min./m	Leistung m/Std.
0,5—1	0,5	2,5	80	6,6	80	6,6	5	12
	1			14		14	8,5	7
1—2	1	2,5	150	15	150	15	6	10
	2			30		30	12	5
2—4	2	2,5	300	40	300	40	8	7,5
	4			108		108	21	2,8
4—6	4	2,5	500	108	500	108	13	4,6
	6			250		250	30	2,0
6—9	6	2,5	750	225	750	225	18	3,3
	9			535		535	42	1,4
9—14	9	2,5	1250	545	1250	545	26	2,3
	14			1390		1390	65	0,9
14—20	14	2,5	1800	1200	1800	1200	40	1,5
	20			3000		3000	100	0,6
20—30	20	2,5	2600	2600	2600	2600	60	1
	30			5200		5200	120	0,5

¹ Durchschnittswerte einschließlich Flammenregeln und Drahtwechselln, ausschließlich Vorrichtungen.

Die Angaben für Gasverbrauch, Schweißzeit und Leistung schwanken je nach Beschaffenheit des Werkstoffes, der Gewissenhaftigkeit und Geschicklichkeit des Arbeiters.

Der Azetylenverbrauch kann je nach Einstellung der Flamme im Mittel bis zu 10% niedriger als der Sauerstoffverbrauch sein.

Zahlentafel 5. Gasverbrauch und Leistung beim Schneiden.

Blechdicke mm	Bezeichnung der		Schneiden mit Sauerstoff-Azetylen						Schneiden mit Sauerstoff-Leuchtgas						
	Heizdüs- en	Schneid- düs- en	Schneid- leistung m/Std.	Sauerstoff			Azetylen		Schneid- leistung m/Std.	Sauerstoff			Leuchtgas		
				l/Std.	l/m	etwa atü	l/Std.	l/m		l/Std.	l/m	etwa atü	l/Std.	l/m	
2	2—25 u. 30—70	2—25	18	800	45	1,4	300	17	15	800	53	1,4	1100	75	
5			17	1100	65	1,8	350	20	14	1100	78	1,8	1250	90	
10			15,5	1700	110	2,5	400	26	13	1700	130	2,5	1500	115	
20			14	2200	160	3,2	500	36	11,5	2200	190	3,2	1700	150	
30			12,5	3100	250	3,7	550	44	10,5	3100	295	3,7	1850	175	
40		30—70	30—70	11	4300	390	4,2	650	59	9,5	4300	450	4,3	2000	210
50				10	5500	550	4,7	750	75	9	5500	610	4,7	2100	235
60				9,5	6300	660	5,5	800	85	8,5	6300	740	5,5	2200	260
70				9	7100	790	6,2	850	95	8,2	7100	870	6,2	2250	275
80				8,6	7900	920	7	900	105	8	7900	990	7	2300	290
100	75—125 u. 130—180	75—125	8	9500	1180	8,4	1000	125	7,3	9500	1300	8,4	2500	345	
125			7,5	11300	1500	9,5	1150	155	6,5	11300	1740	9,5	2600	400	
150		130—180	130—180	7	13000	1850	10,5	1300	185	6	13000	2160	10,5	2750	460
175				6,5	15000	2300	11,3	1400	215	5,5	15000	2730	11,3	2850	520
200				6	17000	2850	12	1460	240	5	17000	3400	12	2950	590
250	185—245	185—245	5,5	21000	3800	12,7	1600	290	4,2	21000	5000	12,7	3050	725	
300	250—300	250—300	5	25000	5000	13	1700	340	3,8	25000	6600	13	3150	830	

Die Angaben für Gasverbrauch und Schneidzeit je Meter Schnittlänge sind nur annähernd und schwanken je nach der Beschaffenheit der Gase, des Schneidmaterials und der Geschicklichkeit des Arbeiters.

Rührbewegung ausgeführt wird. Der Öffnungswinkel ist bei der Rechtsschweißung bedeutend kleiner als bei der Linksschweißung. Dementsprechend geringer ist der Zeit- und Stoffaufwand für die Arbeit sowie das Schrumpfbestreben der Naht. Angaben über Zeit- und Werkstoffverbrauch für das Schweißen und Brennschneiden von Stahlblechen sind den Zahlentafeln 4 und 5 zu entnehmen.

Die Güte der Schweiß- und Brennschneidarbeiten hängt hauptsächlich von der richtigen (neutralen) Einstellung der Flamme ab (Abb. 141 a und b).

Durch Hämmern bei Rotglut kann die Güte (besonders die Kerbschlagzähigkeit) verbessert werden.

Als Zusatz werden bis jetzt ausschließlich nackte Drähte verwendet.

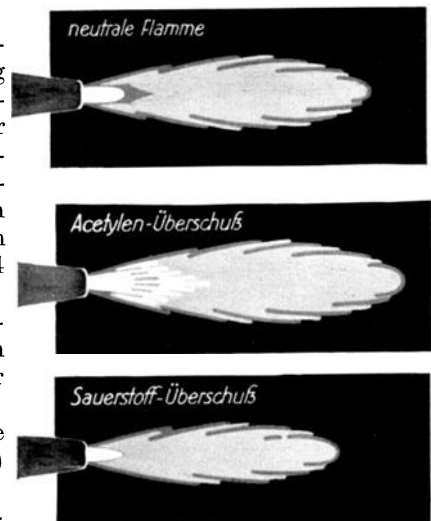


Abb. 141 a. Einstellen der Schweißflamme.

E. Unfallverhütung beim Gasschweißen und Brennschneiden.

Karbidlager. Die Karbidtrommeln sollen auf Holzrost von etwa 200 mm Höhe gelagert werden, damit sie vor Wasser geschützt sind. Sie dürfen nie mit

Stahlwerkzeugen geöffnet werden, sondern nur mit solchen aus Kupfer oder Leichtmetall, um Funken zu verhüten. Geöffnete Karbidtrommeln müssen durch gut sitzende Deckel vor dem Eindringen von Wasser geschützt werden.

Karbidmengen bis zu 100 kg können auch in trockenen Kellern gelagert werden. Für Mengen über 1000 kg gelten besondere Vorschriften (AV). Karbidbrände dürfen nur mit Hilfe von Trockenfeuerlöschern oder durch Aufwerfen von trockenem Sand gelöscht werden. In den Lagerräumen sollen keine Wasser-

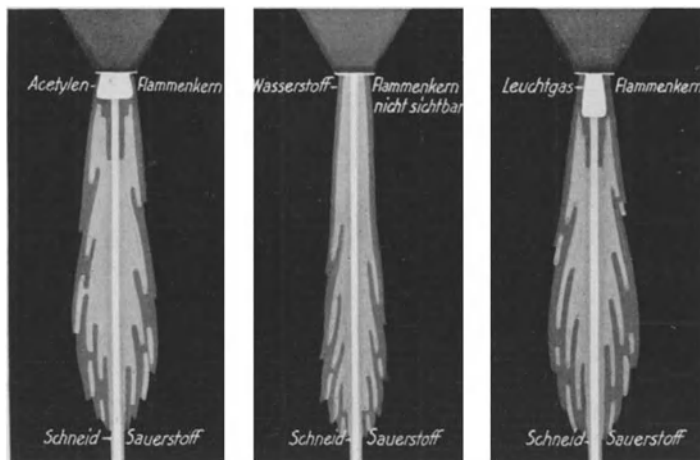


Abb. 141 b. Schneidflamme bei verschiedenen Brenngasen.

oder Dampfleitungen sowie leicht brennbare Gegenstände und Flüssigkeiten sein. Die Räume sind gut zu entlüften.

Azetylen- und Sauerstoffflaschen. Die Flaschen sollen kühl gelagert und vor Hitze (besonders Sonnenbestrahlung) geschützt werden. Sie müssen vor dem Umfallen durch Gerüste oder Schellen gesichert werden. Azetylenflaschen dürfen nicht liegen, sondern müssen stets aufrecht stehen. Die Lagerräume sollen gut gelüftet sein.

Die Flaschen müssen mindestens 3 m von jedem Feuer, jeder Schweiß- oder Schneidstelle sowie Schaltern oder Steckdosen entfernt sein.

Die Azetylenflaschen sind ab und zu, besonders vor Arbeitsschluß, durch Befühlen mit der Hand zu prüfen, ob sie sich nicht, z. B. durch einen Flammenrückschlag, erhitzt haben. Heiße Flaschen sind gründlich zu kühlen und dann unter Umständen im Freien zu entleeren. Brennende Flaschen sind sofort zu schließen (Asbesthandschuhe bereit halten), zu kühlen und im Freien zu entleeren. Das Füllwerk ist zu benachrichtigen.

Druckminderer. Die Druckminderer sind vierteljährlich auf Dichtheit und richtiges Arbeiten zu prüfen. Druckminderer für Sauerstoff dürfen *nicht* eingefettet werden.

Entwickler. Die Bedienungsvorschrift ist genau zu beachten. Es darf nur die auf dem Leistungsschild angegebene Karbidkörnung verwendet werden.

Hochdruckentwickler müssen alle 2 Jahre durch einen amtlichen Sachverständigen geprüft werden, falls sie nicht mit einem anerkannten Sicherheitsventil (Stempel HV oder WA mit Zulassungsnummer) ausgerüstet sind.

Alle Entwickler sind einmal jährlich gründlich zu säubern und dann zu untersuchen. Dabei ist angesetzter Schlamm zu entfernen, jedoch ohne Zuhilfenahme

funkenreißender Werkzeuge. Jährlich zweimal ist die Arbeitsweise der Entwickler, zweimal wöchentlich die der Sicherheitsventile zu prüfen.

Arbeitsräume für Kleinentwickler müssen mindestens 20 m² Grundfläche und 60 cbm Rauminhalt haben.

Sämtliche Feuerquellen (auch brennende Zigarren) müssen mindestens 5 m vom Entwickler entfernt sein. Eingefrorene Entwickler dürfen nicht mit Feuer aufgetaut werden.

Kalkschlammgruben. Die Kalkschlammgruben dürfen keinen dichtschießenden Deckel haben, damit Gase entweichen können. Offene Gruben müssen umzäunt werden. Jede Feuerquelle muß mindestens 5 m entfernt sein.

Wasservorlagen. Das Wasser ist zweimal wöchentlich zu erneuern. Der Wasserstand ist täglich im drucklosen Zustande zu prüfen. Hauptwasservorlagen an großen Entwicklern sind alle Halbjahre, solche an Kleinentwicklern und an den Zapfstellen vierteljährlich im Innern zu untersuchen.

Schweiß- und Schneidbrenner. Es ist stets zuerst der Sauerstoff-, dann erst der Azetylenhahn zu öffnen (Merkwort SA). Beim Schließen wird umgekehrt vorgegangen. Täglich ist die Saugfähigkeit bei abgenommenem Azetylschlauch zu prüfen.

Schutzkleidung. Schweißer und Brennschneider sind mit den gleichen Anzügen wie Elektroschweißer auszurüsten.

Da die Flamme keine ultravioletten Strahlen aussendet, sind Schutzschilde oder Masken überflüssig. Vor den grellen Lichtstrahlen sind jedoch die Augen durch Schutzbrillen zu schützen (Kennziffer für Schweißer 454, für Brennschneider 344 oder 741).

Schutz vor Gasen. Die Flamme verbraucht viel Sauerstoff. Es entsteht deshalb bei Arbeiten in engen Räumen Sauerstoffmangel. Als Folge davon kann das Azetylen nicht vollständig verbrennen und es bildet sich dann das *sehr gefährliche* Kohlenoxyd. In derartigen Fällen muß für reichliche Luftzufuhr gesorgt werden. Zufuhr von reinem Sauerstoff ist gefährlich, da dann die mit Öl getränkte Schutzkleidung sich entzünden kann.

VII. Vorbereitung, Ausführung und Kosten von Schweißnähten.

A. Nahtformen und ihre Vorbereitung.

Für den Stahlbau kommen hauptsächlich zwei Nahtformen in Betracht: Stumpfnähte und Kehlnähte. Diese sind mit ihren zeichnerischen Sinnbildern dargestellt in DIN 1912 (s. Abb. 142). Die Verwendung der einzelnen Nahtformen, ihr Einfluß auf die Festigkeit besonders auf die Dauerfestigkeit wird im zweiten Band geschildert.

Stumpfnähte (Abb. 143) werden als I-, V-, X- und als Tulpen- oder Kelchnähte (Abb. 144) hergestellt. Andere Nahtformen, z. B. mit gekrümmten Flanken, haben sich nicht als praktisch erwiesen. Grundsätzlich sind die Nahtformen zu bevorzugen, die mit dem Schneidbrenner hergestellt werden können. Kelchnähte sind deshalb nur bei ganz großen Blechdicken anzuwenden.

V-Nähte sind am einfachsten herzustellen. Sie sind jedoch nur bei dünnen Blechen anwendbar, da bei ihnen die Masse des einzuschweißenden Schweißgutes sehr groß ist. Je mehr aber geschweißt werden muß, desto größer werden Schrumpfung und Spannung, und im gleichen Maße nehmen auch die Kosten zu. V-Nähte sind vor allem da anzuwenden, wo nur von einer Seite aus geschweißt werden kann.

Abb. 142 a. Simmbilder für Schweißnähte. (Nach DIN 1912.)

Benennung	maßstäbliche Darstellung	Sinnbild
Kehlnaht einseitig	Stirnstoß	
	<i>Überlappter Stoß, durchlaufende Naht¹⁾</i>	
Kehlnaht einseitig		
	<i>Überlappter Stoß, unterbrochene Naht¹⁾</i>	
Kehlnaht zweiseitig		
Kehlnaht einseitig		
	<i>Überlappter Stoß, unterbrochene und durchlaufende Naht¹⁾</i>	
Kehlnaht zweiseitig		
Kehlnaht beidseits durchlaufend	<i>Laschenstoß</i>	

Benennung	maßstäbliche Darstellung	Sinnbild
Büchelnahht		
	I-Naht	
	V-Naht	
	X-Naht	
Stumpfnaht ¹⁾		
Kehlnaht ¹⁾	<i>überwölbte Kehlnaht durchlaufend</i>	
	<i>flache Kehlnaht durchlaufend</i>	
	<i>hohle Kehlnaht durchlaufend</i>	

¹⁾ Bei Schweißnähten ohne Wulst werden stoff Kreisbogen gerade Linien gezeichnet z. B.:

Bedeutung des Maßes a:

Außer der Dicke a der Schweißnaht (z. B. 7 mm) kann nach die Länge der Schweißnaht (z. B. 200 mm) wie folgt angegeben werden:

Darstellung für verdeckte Schweißnähte:

¹⁾ Gezeichnet sind nur überwölbte Kehlnähte, für flache und hohle Kehlnähte sind die dafür geltenden Simmbilder entsprechend anzuwenden. Es wird empfohlen, die Simmbilder bei allen Maßstäben der Zeichnung, auch bei Darstellung in natürlicher Größe, anzuwenden.

Abb. 142 b. Sinnbilder für Schweißnähte. (Nach DIN 1912.) Fortsetzung von S. 120.

Benennung	maßstäbliche Darstellung	Sinnbild	
Kehlnaht	überwölbte Kehlnaht unterbrochen		
	hohle Kehlnaht unterbrochen		
	überwölbte Kehlnaht zickzack		
	Langloch		
	Rundloch		
Darstellung für verdeckte Schweißnähte:			
Bedeutung des Maßes a :			
<p>¹⁾ Gezichnet sind nur überwölbte Kehlnähte, für flache und hohle Kehlnähte sind die dafür geltenden Sinnbilder entsprechend anzuwenden. Es wird empfohlen, die Sinnbilder bei allen Maßstäben der Zeichnung, auch bei Darstellung in natürlicher Größe, anzuwenden.</p>			
Benennung	maßstäbliche Darstellung	Sinnbild	
Kehlnaht einseitig	T-Stoß, durchlaufende Naht ¹⁾		
	Kehlnaht einseitig		
	Kehlnaht zweiseitig	T-Stoß, unterbrochene Naht ¹⁾	
		Kehlnaht zweiseitig	
	Kehlnaht zickzack		
Kehlnaht zweiseitig	T-Stoß, unterbrochene und durchlaufende Naht ¹⁾		
	Kehlnaht zweiseitig		
Kehlnaht außen	Winkelstoß, durchlaufende Naht ¹⁾		
	Kehlnaht außen		
Kehlnaht außen und innen	Winkelstoß, durchlaufende Naht ¹⁾		
	Kehlnaht außen und innen		

X-Nähte beanspruchen bei gleicher Blechdicke und gleichem Öffnungswinkel nur die Hälfte des Schweißgutes der V-Nähte. Voraussetzung ist jedoch, daß die Schweißnaht von der Rückseite zugänglich ist. Bei größeren Blechdicken beanspruchen jedoch auch X-Nähte zu viel Schweißgut. Hier sind dann die Kelchnähte am Platze, bei denen der Winkel der beiden Flanken 20° und weniger beträgt.

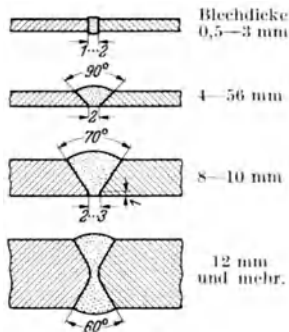


Abb. 143. Vorbereitung von Nähten für die Lichtbogenschweißung.

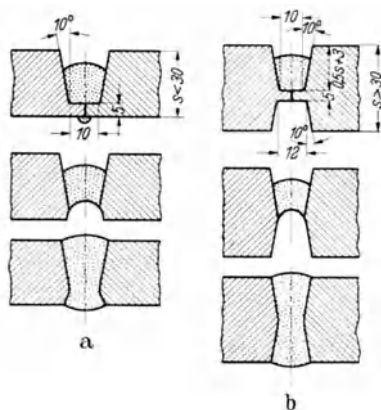


Abb. 144. Vorbereitung von Nähten für die Lichtbogenschweißung an dicken Blechen nach E. SÖLLENBECK.

Die geringste Vorbereitung erfordern meistens Kehlnähte. In vielen Fällen genügt es, die Bleche mit gerade geschnittenen Kanten aufeinanderzulegen.

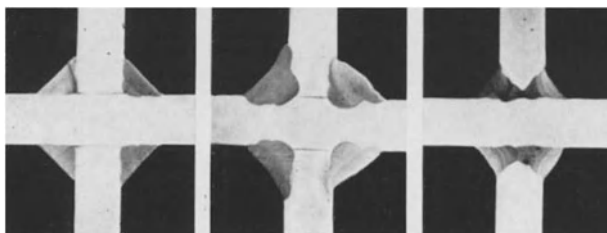


Abb. 145. Vorbereitungs- und Ausführungsarten von Kehlnähten.

Es ist dann allerdings nicht möglich, ganz durchzuschweißen. Ist eine vollkommen durchgeschweißte Verbindung notwendig, so müssen die Kanten gebrochen werden (Abb. 145). Die im Brennschnitt hergestellten Kanten der Schweißnähte brauchen bei Stählen der Sorten St 00 bis St 52 nicht mit spanabhebenden Werkzeugen bearbeitet zu werden. Es genügt, etwa anhaftenden Zunder abzubürsten oder abzuschleifen. Nur unsauber geschnittene Kanten müssen abgehobelt oder abgefräst werden.

B. Ausführung.

Das Schweißgut der Nähte soll an allen Stellen mit dem Baustoff eine gute, geschmolzene Verbindung aufweisen und frei von Rissen, Poren und Schlacken sein. Um ein feinkörniges Gefüge zu erzielen, bevorzugt man besonders bei Stumpfnähten Mehrlagennähte (s. S. 93). Besonderer Wert ist auf die zuerst eingeschweißte Lage zu legen. Bei kleineren Stücken sind diese mit dünnen Drähten (3 bzw. 3,25 mm Durchmesser) zu schweißen, um auf dem Nahtgrund

guten Einbrand zu erzielen. Dünne Drähte ergeben jedoch schwache Nähte, die den bei größeren Stücken unvermeidlichen Schrumpfspannungen nicht standhalten können. Risse in den Nähten sind dann die Folge. Der Versuch, mit Schweißstäben von ovalem oder rechteckigem Querschnitt guten Einbrand in der Wurzel mit kräftigen Schweißnähten zu erzielen, führte nicht zum Erfolg. Man verzichtet deshalb häufig bei dicken Stücken auf eine einwandfreie Beschaffenheit der zuerst geschweißten Lage und schweißt sofort mit 4 oder 5 mm dicken Stäben, bei denen man dann die Gewähr hat, daß die Nähte nicht reißen. Diese Lagen (Wurzelraupen) werden dann bei V- und X-Nähten nach dem Auftragen einiger weiterer Lagen von der Rückseite aus wieder ausgemeißelt und durch einwandfreie Raupen ersetzt.

V-Nähte, die nur von einer Seite aus geschweißt werden, können nie als ganz vollwertig angesehen werden, da mit Fehlern in der untersten, nicht nachgeschweißten Lage immer zu rechnen ist. Beim Entwurf eines Stückes sollen deshalb alle hochbeanspruchten Stumpfnähte vermieden werden, die nur von einer Seite aus geschweißt werden können.

Die Oberfläche der Schweißnähte soll möglichst allmählich in die des Werkstückes übergehen. Scharfe Kerben, z. B. Einbrandkerben bei Stumpfnähten, oder starke Überhöhungen bei Kehl- und Stumpfnähten sind durch Zuschweißen oder Überschleifen zu beseitigen.

C. Kosten von Schweißnähten.

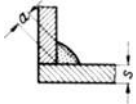
Der Zeitaufwand für das Schweißen von Nähten in waagerechter Lage kann den Zahlentafeln 6—11 entnommen werden. Diese enthalten allerdings nur die reinen Abschmelzzeiten, also die Zeiten, in denen der Lichtbogen brennt. Hierzu kommen noch die Zeiten für das Auswechseln der Elektroden, Abbürsten der Schlacken usw. Zu diesen Zeiten kommen dann noch weitere Verlustzeiten, wie z. B. für das Vorbereiten und Wenden der Werkstücke. Diese können z. B. im Brückenbau bis zu 60% betragen.

Sorgfältigste Arbeitsvorbereitung und jede denkbare Erleichterung beim Schweißen, z. B. durch Verwendung von Dreh- und Wendevorrichtungen, die das unwirtschaftliche Senkrecht- und Überkopfschweißen möglichst ausschalten, müssen dazu beitragen, diese ungewöhnlich hohen Verlustzeiten möglichst zu verringern. Dies ist auch schon im Interesse des haushälterischen Einsatzes des kleinen Stammes wirklich hochwertiger Schweißer notwendig.

Außer dem Lohnaufwand muß der Stoffverbrauch berücksichtigt werden, der ebenfalls den Zahlentafeln 6—11 entnommen werden kann. Zu den angegebenen Nahtgewichten ist ein Zuschlag von etwa 20% für Abfallstücke, Spritzer und Abbrand zu machen. Werden umhüllte Drähte verwendet, so ist das Gewicht der Umhüllung noch hinzuzurechnen.

Für Abschreibung und Verzinsung der Schweißgeräte und des Zubehörs dürften 10% des Beschaffungspreises ausreichen. Das ergibt für einen Schweißstand, der mit einem Umformer oder Gleichrichter der Regelgröße ausgerüstet ist, etwa 200 RM./Jahr, also rund 8 Rpf./Std., für einen Stand, der mit einem Umspanner mit Kondensator versehen ist, etwa 170 RM./Jahr, also etwa 7 Rpf./Std. Dazu kommen noch die Instandhaltungskosten, deren Höhe aber unwesentlich ist.

Die Stromkosten betragen für die Zeit, während der der Lichtbogen brennt, für 160 A und 25 V (4 mm Drahtdurchmesser) bei einem Strompreis von 10 Rpf./kWh für den Umformer und Gleichrichter mit etwa 50% Wirkungsgrad 80 Rpf./Std., für den Umspanner mit 80% Wirkungsgrad 50 Rpf./Std.

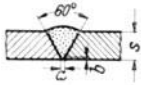


Zahlentafel 6. Kehlnähte, geschweißt mit nackten Schweißdrähten.

Blech- stärke s mm	Naht- stärke a mm	Anzahl der Lagen	Elek- troden- ∅ mm	Strom- stärke A	Naht- gewicht kg/m	Verbrauch je m Schweißnaht		
						Schweiß- drähte Stück	Strom kWh	Zeit (reine Schweißzeit) Min.
2	1,4	1	2	60	0,019	2		
4	2,8	1	3,25	110	0,078	4	0,40—0,51	4,5—6,4
6	4,2	1	4	160	0,176	5	0,86—1,13	6,2—8,3
8	5,6	1	4	160	0,314	8	1,38—1,81	10,0—13,3
10	7,1	1	4	160	0,504	13	2,25—2,95	16,2—21,6
12	8,5	2	4	160	0,722	18	3,12—4,08	22,5—30,0
16	11,3	3	4	160	1,277	32	5,53—7,25	40,0—53,2
18	12,7	4	4	160	1,613	38	6,60—8,60	47,6—63,1
20	14,1	4	4	160	1,960	49	8,50—11,10	61,1—81,8
25	17,5	4	4	160	3,063	77	13,30—17,40	96,0—128,0
8	5,6	1	5	180	0,314	6	1,80—2,52	11,0—15,5
10	7,1	1	5	180	0,504	9	2,70—3,78	16,5—23,2
12	8,5	1	5	180	0,722	13	3,90—5,49	23,2—33,6
16	11,3	2	5	180	1,277	22	6,60—9,25	40,3—56,8
18	12,7	2	5	180	1,613	28	8,40—11,73	51,2—72,2
20	14,1	3	5	180	1,960	34	10,20—14,30	62,1—87,5
25	17,5	3	5	180	3,063	53	15,80—22,15	97,0—136,2
12	8,5	1	6	210	0,722	9	4,20—5,70	18,8—26,5
16	11,3	1	6	210	1,277	15—17	7,90—9,50	35,4—44,2
18	12,7	1	6	210	1,613	19—21	9,80—12,20	43,7—56,0
20	14,1	2	6	210	1,960	23—25	11,62—14,60	52,0—68,0
25	17,5	3	6	210	3,063	36—40	18,60—22,70	83,2—106,0

Zahlentafel 7. V- und X-Nähte, geschweißt mit nackten Schweißdrähten.

Blech- stärke s mm	Maß		Anzahl der Lagen	Elek- troden- ∅ mm	Strom- stärke A	Naht- gewicht kg/m	Verbrauch je m Schweißnaht		
	a mm	b mm					Schweiß- drähte Stück	Strom kWh	Zeit (reine Schweißzeit) Min.

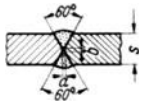


V-Nähte, geschweißt mit nackten Schweißdrähten.

4	1	0	1	3,25	110	0,113	5	0,50—0,63	5,7—8,0
6	1,5	1	1	3,25	110	0,258	10	1,10—1,26	12,5—16,0
8	1,5	1	2	4	160	0,418	10	1,73—2,26	12,5—16,7
10	2	1	2	4	160	0,671	17	2,95—3,85	21,2—28,4
12	2	1,5	3	4	160	0,920	23	4,00—5,20	28,7—38,3
14	2	2	3	4	160	1,200	30	5,20—6,80	37,5—50,0
16	2	2	4	4	160	1,550	39	6,75—8,85	48,6—65,0
10	2	1	2	5	180	0,671	12	3,60—5,02	22,0—31,0
12	2	1,5	2	5	180	0,920	16	4,80—6,72	29,4—41,5
14	2	2	3	5	180	1,200	21	6,30—8,80	38,5—54,1
16	2	2	3	5	180	1,550	27	8,10—11,35	49,5—70,0

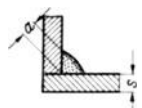
¹ Die Angaben gelten für Schweißdrähte von 450 mm Länge. In den Schweißzeiten sind die Verlustzeiten, wie Wechseln des Schweißdrahtes, Entfernen der Schlacke usw. nicht enthalten.

Zahlentafel 7 (Fortsetzung).



X-Nähte, geschweißt mit nackten Schweißdrähten.

Blech- stärke s mm	Maß		Anzahl der Lagen	Elek- troden- Ø mm	Strom- stärke A	Naht- gewicht kg/m	Verbrauch je m Schweißnaht		
	a mm	b mm					Schweiß- drähte Stück	Strom kWh	Zeit (reine Schweißzeit) Min.
12	1,5	1	2	4	160	0,510	13	2,25— 2,95	16,2—21,6
14	1,5	1	2	4	160	0,660	17	2,95— 3,85	21,3—28,3
16	1,5	1	4	4	160	0,836	21	3,64— 4,75	26,1—35,0
18	1,5	1	4	4	160	1,035	26	4,50— 5,90	32,5—43,3
14	1,5	1	2	5	180	0,660	11	3,60— 4,62	22,0—28,5
16	1,5	1	2	5	180	0,836	14	4,50— 5,88	27,5—36,2
18	1,5	1	4	5	180	1,035	18	5,40— 7,57	33,0—46,5
20	1,5	1,5	4	5	180	1,245	22	6,60— 9,25	40,2—57,0
25	2	1,5	6	5	180	1,960	34	10,2—14,25	62,2—88,0
18	1,5	1,5	4	6	210	1,035	12	6,10— 7,60	27,0—35,5
20	1,5	1,5	4	6	210	1,245	15	7,45— 9,50	33,3—44,3
25	2	1,5	6	6	210	1,960	23	11,62—14,50	52,0—67,8



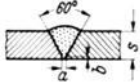
Zahlentafel 8. Kehlnähte, geschweißt mit dünnummüllten Schweißdrähten.

Blech- stärke s mm	Naht- stärke a mm	Anzahl der Lagen	Elek- troden- Ø mm	Strom- stärke A	Naht- gewicht kg/m	Verbrauch je m Schweißnaht		
						Schweiß- drähte Stück	Strom kWh	Zeit (reine Schweißzeit) Min.
2	1,4	1	2	50	0,019	2		
4	2,8	1	3,25	110	0,078	3	0,34— 0,46	3,4— 5,0
6	4,2	1	4	150	0,176	5	0,90— 1,16	6,5— 8,7
8	5,6	1	4	150	0,314	9	1,62— 2,10	11,7— 15,7
10	7,1	1	4	150	0,504	14	2,50— 3,26	18,2— 24,5
12	8,5	2	4	150	0,722	20	3,60— 4,65	26,0— 35,0
16	11,3	3	4	150	1,277	35	6,30— 8,15	45,5— 61,0
18	12,7	4	4	150	1,613	44	7,90—10,21	57,0— 77,0
20	14,1	4	4	150	1,960	53	9,55—12,40	69,0— 92,5
25	17,5	4	4	150	3,063	83	14,90—19,40	108,0—145,0
8	5,6	1	5	170	0,314	6	1,92— 2,40	10,5— 14,5
10	7,1	1	5	170	0,504	9	2,87— 3,60	15,7— 21,7
12	8,5	1	5	170	0,722	13	4,15— 5,20	22,7— 31,5
16	11,3	2	5	170	1,277	23	7,35— 9,20	40,0— 55,5
18	12,7	2	5	170	1,613	29	9,30—11,60	50,8— 70,0
20	14,1	3	5	170	1,960	35	11,20—14,00	61,0— 84,5
25	17,5	3	5	170	3,063	55	17,25—22,00	94,5—132,0
12	8,5	1	6	190	0,722	9	4,20— 5,28	20,5— 27,5
16	11,3	1	6	190	1,277	16	7,00— 9,35	34,3— 48,7
18	12,7	1	6	190	1,613	20	8,85—11,70	43,3— 61,0
20	14,1	2	6	190	1,960	25	10,70—14,60	52,5— 76,0
25	17,5	3	6	190	3,063	28	17,20—22,30	84,5—116,0

¹ Die Angaben gelten für Schweißdrähte von 450 mm Länge. In den Schweißzeiten sind die Verlustzeiten, wie Wechseln des Schweißdrahtes, Entfernen der Schlacke usw. nicht enthalten.

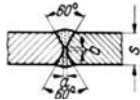
Zahlentafel 9. V- und X-Nähte, geschweißt mit dünnumhüllten Schweißdrähten.

Blech- stärke s mm	Maß		Anzahl der Lagen	Elek- troden- ø mm	Strom- stärke A	Naht- gewicht kg/m	Verbrauch je m Schweißnaht		
	a mm	b mm					Schweiß- drähte Stück	Strom kWh	Zeit (reine Schweißzeit) Min.



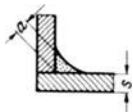
V-Nähte, geschweißt mit dünnumhüllten Schweißdrähten.

4	1	0	1	3,25	110	0,113	5	0,56—0,76	5,6—8,3
6	1,5	1	1	3,25	110	0,258	11	1,13—1,68	11,3—18,3
8	1,5	1	2	4	150	0,418	12	1,98—2,80	14,3—21,0
10	2	1	2	4	150	0,671	19	3,24—4,45	23,5—33,2
12	2	1,5	3	4	150	0,920	25	4,50—5,82	32,5—43,5
14	2	2	3	4	150	1,200	33	5,90—7,70	43,0—57,8
16	2	2	4	4	150	1,550	43	7,55—10,00	54,5—75,0
10	2	1	2	5	170	0,671	12	3,83—4,80	21,0—29,0
12	2	1,5	2	5	170	0,920	16	5,10—6,40	28,0—38,5
14	2	2	3	5	170	1,200	21	6,70—8,40	36,7—51,0
16	2	2	3	5	170	1,550	28	8,62—11,20	47,0—67,5



X-Nähte, geschweißt mit dünnumhüllten Schweißdrähten.

12	1,5	1	2	4	150	0,510	14	2,50—3,26	18,2—24,5
14	1,5	1	2	4	150	0,660	18	3,25—4,20	23,4—31,5
16	1,5	1	4	4	150	0,836	23	4,13—5,35	30,0—40,2
18	1,5	1	4	4	150	1,035	29	5,00—6,75	36,4—50,8
14	1,5	1	2	5	170	0,660	12	3,84—4,80	21,0—29,0
16	1,5	1	2	5	170	0,836	15	4,80—6,00	26,2—36,2
18	1,5	1	4	5	170	1,035	18	5,75—7,20	31,5—43,5
20	1,5	1,5	4	5	170	1,245	22	7,00—8,80	38,5—53,0
25	2	1,5	6	5	170	1,960	35	11,20—14,00	61,0—84,3
18	1,5	1,5	4	6	190	1,035	13	5,60—7,62	27,4—39,5
20	1,5	1,5	4	6	190	1,245	16	7,00—9,85	34,2—48,7
25	2	1,5	6	6	190	1,960	25	10,70—14,60	52,5—76,2



Zahlentafel 10. Kehlnähte, geschweißt mit Manteldrähten.

Blech- stärke s mm	Naht- stärke a mm	Anzahl der Lagen	Elek- troden- ø mm	Stromstärke A	Naht- gewicht kg/m	Verbrauch je m Schweißnaht		
						Schweiß- drähte Stück	Strom kWh	Zeit (reine Schweißzeit) Min.
2	1,4	1	2	50—70	0,019	3	0,10—0,20	2,8—3,5
4	2,8	1	3,25	110—120	0,078	4	0,64—0,80	5,1—5,9
6	4,2	1	4	150—160	0,176	5	1,30—1,50	7,5—9,3
8	5,6	1	4	150—160	0,314	9	2,34—2,70	13,5—16,8
10	7,1	2	4	150—160	0,504	14	3,65—4,20	21,0—26,0
12	8,5	2	4	150—160	0,722	19	5,20—5,70	30,5—35,5
16	11,3	3	4	150—160	1,277	34	9,10—10,20	52,5—63,5
18	12,7	3	4	150—160	1,613	43	11,40—12,90	66,0—80,0

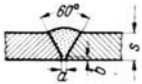
¹ Die Angaben gelten für Schweißdrähte von 450 mm Länge. In den Schweißzeiten sind die Verlustzeiten, wie Wechseln des Schweißdrahtes, Entfernen der Schlacke usw. nicht enthalten.

Zahlentafel 10 (Fortsetzung).

Blech- stärke s mm	Naht- stärke a mm	Anzahl der Lagen	Elek- troden- ∅ mm	Stromstärke A	Naht- gewicht kg/m	Verbrauch je m Schweißnaht		
						Schweiß- drähte Stück	Strom kWh	Zeit (reine Schweißzeit) Min.
20	14,1	4	4	150—160	1,960	52	13,80—15,60	80,0—97,5
25	17,5	6	4	150—160	3,063	81	21,50—24,30	124,0—152,0
8	5,6	1	5	170—180	0,314	6	2,30—2,35	11,2—12,8
10	7,1	1	5	170—180	0,504	9	3,55—3,86	18,7—20,4
12	8,5	2	5	170—180	0,722	13	5,12—5,40	26,0—28,5
16	11,3	3	5	170—180	1,277	22	8,65—9,65	46,5—51,0
18	12,7	3	5	170—180	1,613	28	11,00—12,00	58,0—63,0
20	14,1	3	5	170—180	1,960	34	13,40—14,70	71,0—77,0
25	17,5	6	5	170—180	3,063	52	20,40—22,70	110,0—120,1
12	8,5	1	6	190—200	0,722	9	5,20—5,88	21,0—24,0
16	11,3	1	6	190—200	1,277	15	9,20—11,15	37,3—43,5
18	12,7	2	6	190—200	1,613	19	11,60—14,10	46,5—55,0
20	14,1	3	6	190—200	1,960	23	14,10—17,00	58,2—65,5
25	17,5	5	6	190—200	3,063	36	22,00—26,40	88,5—103,5

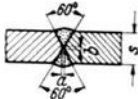
Zahlentafel 11. V- und X-Nähte, geschweißt mit Manteldrähten.

Blech- stärke s mm	Maß		Anzahl der Lagen	Elek- troden- ∅ mm	Strom- stärke A	Naht- gewicht kg/m	Verbrauch je m Schweißnaht		
	a mm	b mm					Schweiß- drähte Stück	Strom kWh	Zeit (reine Schweißzeit) Min.



V-Nähte, geschweißt mit Manteldrähten.

4	1	0	1	3,25	120	0,113	4	0,80—0,96	5,9—7,2
6	1,5	1	2	3,25	120	0,258	10	1,60—2,24	12,8—15,8
8	1,5	1	2	4	160	0,418	11	2,86—3,30	15,5—20,0
10	2	1	3	4	160	0,671	18	4,55—5,40	27,0—33,6
12	2	1,5	3	4	160	0,920	24	6,35—7,20	37,5—45,0
14	2	2	4	4	160	1,200	32	8,15—9,60	48,0—60,0
16	2	2	4	4	160	1,550	41	10,60—12,30	63,0—76,5
10	2	1	2	5	180	0,671	11	4,30—5,28	23,5—26,4
12	2	1,5	2	5	180	0,920	16	6,30—7,30	33,5—36,5
14	2	2	3	5	180	1,200	21	8,25—9,35	43,0—46,8
16	2	2	4	5	180	1,550	26	10,20—12,20	55,5—61,0



X-Nähte, geschweißt mit Manteldrähten

12	1,5	1	4	4	160	0,510	14	3,65—4,20	21,0—26,2
14	1,5	1	4	4	160	0,660	18	4,55—5,40	27,0—33,5
16	1,5	1	4	4	160	0,836	22	5,65—6,60	34,5—41,0
18	1,5	1	6	4	160	1,035	27	7,00—8,10	42,0—50,5
14	1,5	1	4	5	180	0,660	11	4,30—5,30	23,5—26,4
16	1,5	1	4	5	180	0,836	14	5,50—6,50	29,8—32,5
18	1,5	1	4	5	180	1,035	18	7,10—8,10	37,2—40,5
20	1,5	1,5	4	5	180	1,245	21	8,25—9,75	44,8—48,8
25	2	1,5	6	5	180	1,960	33	13,00—15,40	70,0—77,0
18	1,5	1,5	4	6	200	1,035	12	7,35—8,80	30,3—34,5
20	1,5	1,5	4	6	200	1,245	14	8,60—10,60	37,2—41,2
25	2	1,5	6	6	200	1,960	23	13,90—17,0	56,0—66,5

¹ Die Angaben gelten für Schweißdrähte von 450 mm Länge. In den Schweißzeiten sind die Verlustzeiten, wie Wechseln des Schweißdrahtes, Entfernen der Schlacke usw. nicht enthalten.

Schrumpfung und Spannung.

Von Professor Dr.-Ing. G. BIERETT, Berlin.

I. Allgemeines.

Maßgebende Wärmeeigenschaften, mechanische und metallurgische Eigenschaften.

Die Schrumpfwirkungen — Schrumpfungen und Schweißspannungen — sind das Ergebnis von Erhitzung und Abkühlung, thermischer Ausdehnung und Schwindung, plastischer und elastischer Verformung und metallurgischer Vorgänge. Die Erfassung der Schrumpfwirkungen beruht auf dem Kenntnis der physikalischen Wärmeeigenschaften der Werkstoffe, der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur und der metallurgischen Vorgänge bei der Abkühlung.

1. Wärmeeigenschaften.

Maßgebend sind folgende Größen:

Die *spezifische Wärme* c ist die Wärmemenge, die notwendig ist, um 1 g Masse eines homogenen Körpers um 1°C in der Temperatur zu erhöhen. Das Produkt aus spezifischer Wärme und Masse bezeichnet man als Wärmekapazität $C = m \cdot c$. Als Einheit der Wärmemenge wird die spezifische Wärme (bei konstantem Druck) c_p des Wassers bei 15°C verwendet.

Die *Wärmeleitfähigkeit* λ ist die in der Zeiteinheit durch eine Flächeneinheit zu einer anderen im Abstand der Längeneinheit übertretende Wärmemenge bei 1°C Temperaturunterschied der beiden Flächen.

Die *Wärmeausdehnungszahl* α ist die lineare Ausdehnungszahl, d. h. die Zunahme der Längeneinheit bei 1°C Temperaturerhöhung.

Die genannten Größen sind keine festen Werte, sondern stark temperaturabhängig. Abb. 1 zeigt ihren Verlauf für gewöhnlichen Kohlenstoffstahl. An den Gefügeumwandlungspunkten treten ausgesprochene Unstetigkeiten auf. Die Schrumpfgeschwindigkeit hängt von der spezifischen Wärme und von der Wärmeleitfähigkeit ab. Je größer die spezifische Wärme, um so langsamer geht die Abkühlung vor sich. Aus diesen wechselnden Verhältnissen heraus ergibt sich die starke Abhängigkeit der Schrumpfung und Spannung von der Größe der Wärmezufuhr und der Art von Wärmezufuhr und Wärmeableitung.

2. Mechanische Eigenschaften.

Von Bedeutung sind vor allem:

Die *Streckgrenze* (Elastizitätsgrenze) und, mit Rücksicht auf die Rißsicherheit, die *Verformungsfähigkeit* und die *Bruchfestigkeit*.

Auch diese Eigenschaften sind stark temperaturabhängig (Abb. 2). Die Verminderung der Verformungsfähigkeit zwischen 200 und 300°C bei ansteigender Festigkeit weist auf die in diesem Temperaturbereich (Blaubruchgebiet)

vorliegende Bruchgefahr hin; der geringe Wert der Streckgrenze zwischen 600 und 700° bei gleichzeitig hoher Verformungsfähigkeit läßt erkennen, daß die Ausbildung merklicher Spannungen erst hier beginnen kann.

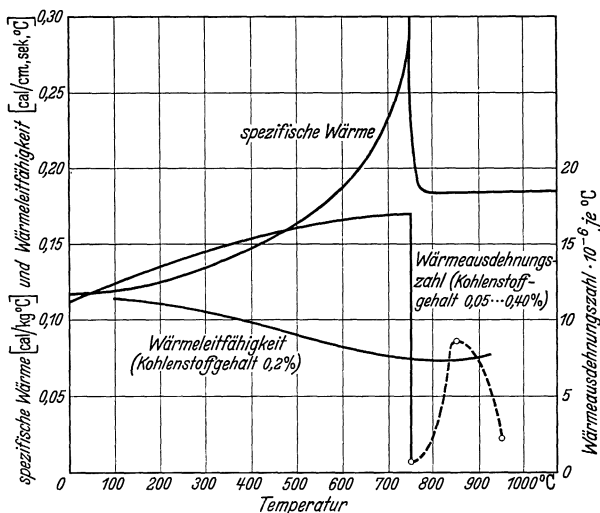


Abb. 1. Wärmeeigenschaften von Kohlenstoffstahl.

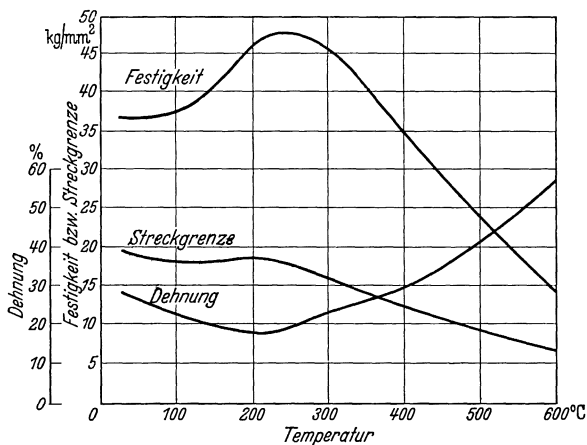


Abb. 2. Festigkeitseigenschaften von unlegiertem Stahl nach G. URBANCZYK.
C=0,14%, Mn=0,51%; P=0,016%; S=0,032%.

3. Metallurgische Vorgänge.

Von besonderem Einfluß sind die Vorgänge an den Gefügeumwandlungspunkten. Unter Umwandlung versteht man den Übergang von einem Gefügestand in einen anderen. Bei langsamer Abkühlung des niedergeschmolzenen Eisens findet eine vollkommene Umwandlung des zunächst vorhandenen austenitischen Gefügestandes über Zwischengefügestände in Perlit statt; bei schneller Abkühlung verbleiben in den Nahtzonen die Zwischengefügestände, ungünstigenfalls Martensit, sonst Troostit oder Sorbit.

Die Umwandlungen sind mit Volumenveränderungen verbunden und deshalb für die Schrumpfwirkungen von besonderem Einfluß. Bei langsamer Abkühlung treten jedoch die Umwandlungen bei so hohen Temperaturen auf, daß den Volumenveränderungen noch kein Formänderungswiderstand entgegengesetzt wird. Je höher der Kohlenstoffgehalt und je größer der Gehalt an Legierungselementen und je größer die Abkühlungsgeschwindigkeit ist, um so mehr verlagern sich die Umwandlungstemperaturen nach unten. Bei Abkühlungsgeschwindigkeiten, wie sie häufig den Verhältnissen bei der Lichtbogenschweißung entsprechen, finden diese Umwandlungen bei der Abkühlung erst in Temperaturbereichen statt, bei denen der Volumenveränderung bereits ein merklicher Formänderungswiderstand entgegengesetzt wird. Bei festeren Stählen wie dem Baustahl St 52 ist deshalb diesen metallurgischen Vorgängen für den Verlauf und die Aufnahme der Schrumpfwirkungen eine große Bedeutung beizumessen.

II. Schrumpfung.

A. Querschrumpfung von Stumpfnähten.

1. Parallelschrumpfung, Winkelschrumpfung, Gesamtschrumpfung.

Unmittelbar nach der Einschmelzung des Schweißgutes spielen sich zwei für die Schrumpfung wichtige Vorgänge gleichzeitig und gegenläufig ab. Die erwärmten Blechteile dehnen sich infolge der sich ausbreitenden Wärme aus, während das Schweißgut bereits schrumpft. Solange die Schweißnahtzone noch keine Widerstandsfähigkeit hat, d. h. schmelzflüssig oder teigig ist, bewirkt die Ausdehnung der verbundenen Teile eine Verengung der Schweißfuge. Diese Verengung ergibt den Hauptteil der späteren vollen Schrumpfung. Die Schrumpfung des Schweißgutes selbst wirkt sich nur innerhalb des Temperaturbereiches aus, in dem das Schweißgut bereits einen Formänderungswiderstand hat. Die Schrumpfung durch das Zusammenziehen der Schweiße ist gegenüber dem Einfluß der thermischen Dehnung nur gering. MALISIUS¹ nennt diesen Anteil bei der üblichen Fugenbreite mit 4—8%. Hieraus ergeben sich folgende Grundbeziehungen für die Größe der Querschrumpfung, wobei zunächst nur die Schrumpfung in der Ebene der Verbindung betrachtet wird:

1. Den wesentlichsten Einfluß hat die beim Schweißen entwickelte Wärmemenge, genauer: die durch den Stabquerschnitt je Quadratmillimeter abgeleitete Wärmemenge.

2. Die Parallelschrumpfung ist von der Blechdicke wenig abhängig; sie wird mit wachsender Blechdicke etwas größer, weil die mittlere Fugenbreite wächst.

3. Je größer die Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes ist, um so größere Wärmemengen müssen bis zur Erreichung des Schmelzpunktes entwickelt werden, um so größer ist die Erwärmung des ganzen Stückes und entsprechend die Schrumpfung.

Bei Behinderung der thermischen Ausdehnung durch Festlegungen und Einspannungen treten in dem Stadium, in dem die Schweiße bereits Formänderungswiderstand besitzt, in den hochoverhitzten Zonen warmplastische Stauchungen ein, die das Schrumpfmaß bei (gedachter) unbehinderter Zusammenziehungsmöglichkeit vergrößern. Dieser Vorgang äußert sich praktisch in erhöhten Spannungen oder Reckungen.

¹ MALISIUS, R.: Die Schrumpfung geschweißter Stumpfnähte. Sammlung: Aus Theorie und Praxis der Elektroschweißung, H. 2. Braunschweig: F. Vieweg & Sohn. Elektroschweiß G. Bd. 7 (1936) S. 1—9.

Infolge der über die Fugenhöhe ungleichen Nahtbreite und durch das lagenweise Schweißen dickerer Nähte tritt eine merkliche Winkelschrumpfung ein. Folgendes ist ohne weiteres zu übersehen:

4. Je gleichzeitiger die Schweiße über die Nahthöhe eingeschmolzen wird, um so geringer ist die Winkelschrumpfung. Die Winkelschrumpfung wächst also mit der Zahl der Lagen.

5. Je ungleicher die Fugenbreite über der Nahthöhe ist, um so stärker [ist die Winkelschrumpfung. V-Nähte sind ungünstiger als U- oder Tulpennähte. X-Nähte bzw. Doppel-U-Nähte sind am günstigsten, vor allem, wenn wechselseitig geschweißt wird.

Diese Winkelschrumpfung ergibt außer der Winkeldrehung eine Komponente zur Parallelschrumpfung gemäß Abb. 3, die einen beträchtlichen Anteil der Gesamtparallelschrumpfung, im allgemeinen kurz als Gesamtschrumpfung bezeichnet, ausmacht.

Die einzelnen Schweißfaktoren können sich auf die Größe der Parallelschrumpfung einerseits und auf die der Winkelschrumpfung andererseits gegenläufig auswirken, so daß eine Erfassung der relativen Größe der Gesamtschrumpfung ohne Versuche kaum möglich ist.

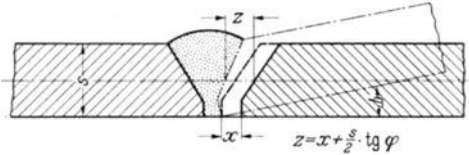


Abb. 3. x Parallelschrumpfung, \varnothing Winkelschrumpfung, z Gesamtschrumpfung. Zerlegung der Querschrumpfung.

2. Berechnung der Querschrumpfung.

Nach dem Vorhergehenden ergab sich die Parallelschrumpfung aus der Fugenerengung infolge der thermischen Dehnung der erwärmten Bleche und der Schwindung der Schweiße selbst unter 700°C . WÖRTMANN und MOHR¹ berechnen hieraus die Schrumpfung auf Grund der physikalischen Wärmewerte.

Beim Einschmelzen von g Gramm Eisen je Zentimeter Nahtlänge wird $Q = g \cdot k$ Wärme übertragen (k ist die je Gramm übertragene Wärmemenge). Dieser Wärmemenge entspricht die Wärmemenge der erwärmten Bleche von Gewicht G mit $Q = c \cdot \Delta t \cdot G$ (c ist die mittlere spezifische Wärme).

Daraus

$$\Delta t = \frac{g \cdot k}{c \cdot G}.$$

Andererseits ist

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{\alpha \cdot l}$$

(α ist die mittlere Wärmedehnungszahl für den Temperaturbereich von $700-20^{\circ}$) und daraus

$$\Delta l = \alpha \frac{g \cdot k \cdot l}{c \cdot G}.$$

Das Gewicht des erwärmten Stückes ist

$$G = s \cdot \gamma \cdot l \quad (\text{Streifenbreite } 1 \text{ cm})$$

und daraus

$$\Delta l = \frac{\alpha \cdot g \cdot k}{c \cdot s \cdot \gamma}.$$

Nach dieser Berechnung wird die Schrumpfung unabhängig von l , d. h. von der Länge des betrachteten Streifens.

¹ WÖRTMANN, F. u. W. MOHR: Wärmespannungen bei Schweißungen und der Einfluß auf die Sicherheit ausgeführter Konstruktionen. Schweiz. Bauztg. Bd. 100, S. 243—246.

Setzt man ein: k in kcal/g; g in g/cm; c in kcal/kg (1 kcal = 1 Cal = 1000 cal); s in Millimeter und γ in g/cm³, so ist

$$\Delta l = \frac{\alpha \cdot g \cdot k \cdot 10^5}{c \cdot s \cdot \gamma} \text{ (mm)}.$$

Die Naht selbst von der mittleren Breite b schwindet um

$$\Delta l_1 = \alpha \cdot t \cdot b.$$

Die Gesamtschrumpfung ergibt sich zu

$$S = \Delta l + \Delta l_1.$$

Für das Temperaturgebiet von 20° (Raumtemperatur) und 700° C ist einzusetzen:

$$\begin{aligned} \text{die mittlere Wärmedehnungszahl } \alpha &= 1,52 \cdot 10^5, \\ \text{die mittlere spezifische Wärme } c &= 0,159. \end{aligned}$$

Die je Gramm Schweiße übertragene Wärmemenge hängt von den Schweißbedingungen ab. Für Wechselstromschweißung geben WÖRTMANN und MOHR k zu 1,15 kcal/g an. Mittelbar läßt sich aus ihrer Veröffentlichung entnehmen:

$$\begin{aligned} \text{für Gleichstrom, Draht am } - \text{ Pol } k &= 1,79, \\ \text{für Gleichstrom, Draht am } + \text{ Pol } k &= 1,01. \end{aligned}$$

Nach der Berechnung wird die Schrumpfung besonders groß, wenn sehr viel Schweiße auf einmal eingeschmolzen wird. Das Schweißen in mehreren Lagen ist also für die Querschrumpfung günstiger. Nach den Angaben über die Wärmemenge stellen sich die Verhältnisse bei Gleichstromschweißung, Draht am Minuspol, am ungünstigsten.

Überlegungen dieser Art haben besonderen Wert für die Beurteilung der Größe der Reckung oder Reißgefahr bei behinderter Schrumpfung, also für die Schweißung unter Einspannung oder Verspannung. Nimmt man ungünstig an, daß die gesamte Schrumpfung von der Nahtzone allein als Reckung aufgenommen werden muß, so ergibt sich diese Reckung zu

$$\delta = \frac{\Delta l + \Delta l_1}{b} \cdot 100$$

(wobei b die jeweilige Lagenbreite ist).

Die Schweißbedingungen sind dann durch entsprechende Lagenzahl so zu wählen, daß der Reckgrad nicht zu groß gegenüber dem Formänderungsvermögen der Schweiße wird.

Auch der von MALISIUS eingeschlagene Rechnungsgang beruht auf der Berechnung der thermischen Dehnung der durch die Schweißung verbundenen Teile und der Schrumpfung der Schweiße selbst. MALISIUS legt seiner Betrachtung die in Abb. 4 dargestellten Temperaturverhältnisse¹ zugrunde. Die Abkühlung von der Schmelztemperatur bis auf 650° geht sehr rasch vor sich. Die geringe Ableitung der Wärme durch Strahlung wird vernachlässigt. Bei 650° Schweißnahttemperatur soll etwa die durch Kurve II veranschaulichte Temperaturverteilung über die Länge herrschen, der die durch Linie III gegebene mittlere Temperatur von 350° entspricht.

Die Wärmeausdehnung von Stahl kann nach der empirischen Formel $10^9 \cdot \lambda = a \cdot t + b \cdot t^2$ berechnet werden mit den Konstanten $a = 11475$ und $b = 5,3$. Die für die Fugenverengung maßgebende Wärmedehnung von Raumtemperatur (zu 15° angenommen) bis 350° λ_1 beträgt 4,4 mm/m, die Schwindung der Schweiße im Bereich der Temperaturen 650° und 15° λ_2 ist 9,3 mm/m.

¹ Auf Grund eines Schriftwechsels mit Herrn MALISIUS gegenüber der Originalarbeit geändert.

MALISIUS setzt auf Grund dieser Überlegungen zunächst für einen kurzen Nahtabschnitt nachstehende Gleichung an:

$$S = S_I + S_{II} = \lambda_1 \cdot k \cdot \frac{Q}{s} + \lambda_2 \cdot b.$$

S die Schrumpfung in Richtung der Stabachse in Millimeter,

λ_1 die lineare Wärmeausdehnung des Werkstoffes, die dieser bei Erhöhung seiner Temperatur t um $\frac{t' - t^\circ}{2}$ erfährt, wenn

t' die Temperaturgrenze des elastischen Bereiches und t die Raumtemperatur darstellen,

λ_2 die lineare Wärmeausdehnung der Schweiße, die diese bei Erhöhung der Temperatur von t auf t' erfährt,

Q der Querschnitt der Fuge einschließlich Raupenüberhöhung in Quadratmillimeter,

s die mittlere Dicke der zu verbindenden Stäbe in Millimeter,

b die mittlere Breite der Fuge in Millimeter,

k eine Verhältniszahl für die Wärmemenge, die die einzelnen Verfahren und Wärmeleitahlen zur Verschweißung einer bestimmten Fuge benötigen.

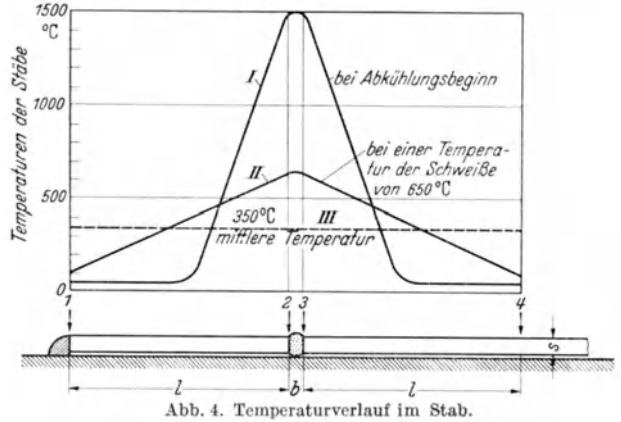


Abb. 4. Temperaturverlauf im Stab.

Für Flußeisen und eine Raumtemperatur von 15° gelten die Werte $\lambda_1 = 0,044$ und $\lambda_2 = 0,0093$.

Für längere Nähte, bei denen man nicht mehr gleichzeitige Einschmelzung annehmen kann, und bei denen die Wärme strahlenförmig nach allen Seiten abfließt, zieht MALISIUS den Schluß, daß für den Anteil S_I der Schrumpfung etwas mehr als die Hälfte der gesamten abgeführten Wärme zur Geltung kommt.

$$S_I = 0,6 \lambda_1 \cdot k \cdot \frac{Q}{s}.$$

Zur Berücksichtigung der Fugenverengung in dem noch nicht geschweißten Nahtabschnitt infolge der Schrumpfung der bereits geschweißten Nahtteile (indirekte Schrumpfung) wird unter der Voraussetzung nicht zu langer Nahtabschnitte außerdem ein Zuschlag von 30% zur Gesamtschrumpfung gemacht:

$$S = 1,3 \left(0,6 \lambda_1 \cdot k \cdot \frac{Q}{s} + \lambda_2 \cdot b \right).$$

Die Faktoren k werden nach Versuchen für verschiedene Schweißbedingungen angegeben (s. Abb. 6).

$k = 43$, Lichtbogenschweißung mit blanken Elektroden;

$k = 45-55$, Lichtbogenschweißung mit ummantelten Elektroden je nach Art und Stärke der Ummantelung;

$k = 62$, Arcatomschweißung;

$k = 75$, Gasschmelzschweißung.

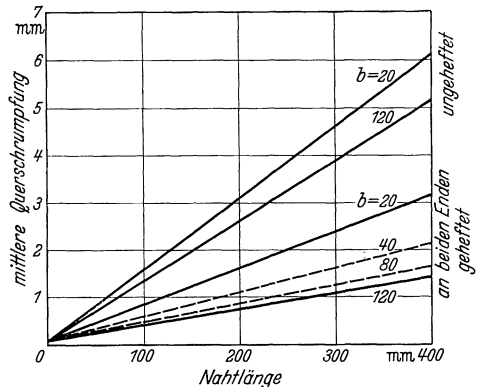


Abb. 5. Mittlere Querschrumpfung bei verschiedenen Nahtlängen. $s = 6$ mm, b = Blechbreite beiderseits der Naht, V-Naht, Wurzelabstand 3 mm, $\alpha = 60^\circ$, Manteldraht 4 mm \varnothing , Wechselstromschweißung $I = 120$ A.

3. Einige wichtige Versuchsergebnisse.

Eine sehr eingehende, analysierende Untersuchung über die einzelnen Einflüsse wurde von H. KOCH¹ durchgeführt. Für die Einlagenschweißung bei dünneren

Blechen machte er zunächst folgende Feststellungen:

Für den normalen Heftpunkt (umhüllter Draht 3,25 mm Ø, 105 A) beträgt die Querschrumpfung etwa 0,20mm. Bei 10–60mm² Fläche des Schweißpunktes nimmt die Schrumpfung von 0,13 bis 0,27 mm linear zu.

Bei ungehefteten Blechen nimmt die Schrumpfung an den einzelnen Nahtpunkten mit wachsendem Abstand vom Anfangspunkt linear zu. Für

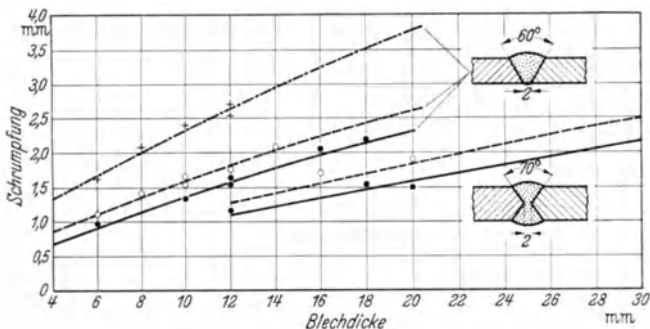


Abb. 6. Querschrumpfung gut vorgehefteter Nähte.

$$S = \left(0,6 \lambda_1 k \frac{Q}{s} + \lambda_2 b \right) \cdot 1,3;$$

S = Schrumpfung, $\lambda_1=0,0044$, $\lambda_2=0,0093$, $k=43$ für Lichtbogenschweißung mit blanker Elektrode, $k=50$ für Lichtbogenschweißung mit ummantelter Elektrode, $k=75$ für Gasschweißung, Q = Fugenquerschnitt einschließlich Schweißwulst, s = Blechedicke, b = mittlere Fugenbreite.

	Berechnet	Gemessen
Lichtbogenschweißung mit blanker Elektrode . . .	— — — —	•
Lichtbogenschweißung mit ummantelter Elektrode .	- - - -	o
Gasschweißung	- · - · -	+

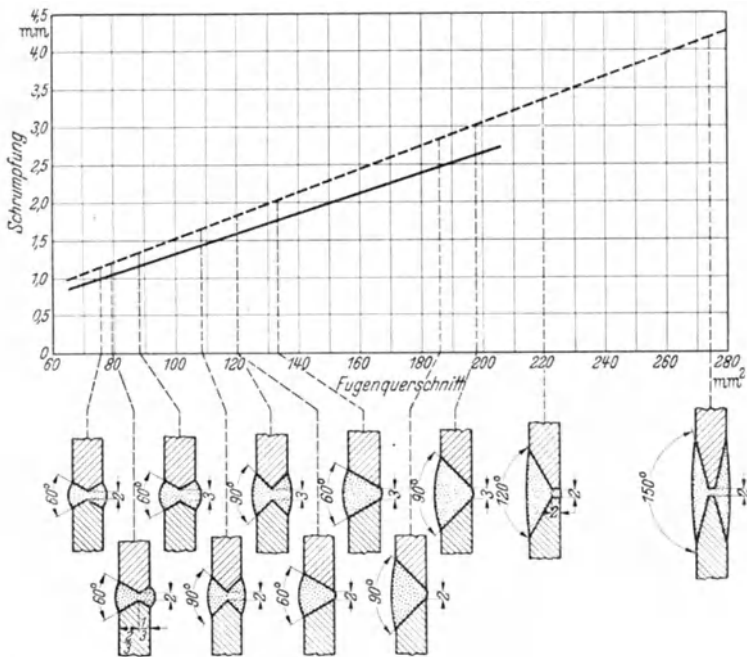


Abb. 7. Schrumpfung von Stumpfnähten verschiedener Fugenausbildung (Blechedicke 12 mm).
 Lichtbogenschweißung mit blanker Elektrode — — — —
 Lichtbogenschweißung mit ummantelter Elektrode - - - -

¹ KOCH, H.: Schrumpfungen und Schrumpfspannungen bei der Lichtbogenschweißung. Diss. T. H. Hannover 1935.

wechselstromschweißung, Blechdicke 6 mm, Blechbreite beiderseits der Naht 120 mm, Nahtlänge 180 mm, Einlagenschweißung V-Naht, $\alpha = 60^\circ$, Wurzelabstand 3 mm, umhüllter Draht 4 mm \varnothing , $Y = 120$ A, ermittelte KOCN am Anfangspunkt etwa $\frac{1}{10}$ mm, am Endpunkt 3,5–4,5 mm.

Der Mittelwert der Schrumpfung über die Nahtlänge, die nach dem Vorhergehenden linear verläuft, ist der Nahtlänge direkt proportional.

Heftstellen an den Nahtenden und nach Bedarf in Zwischenpunkten beeinflussen den Verlauf der Querschrumpfung über die Nahtlänge sehr stark. Die Querschrumpfung wird erheblich vermindert. Die mittlere Querschrumpfung über die Nahtlänge bei Heftung wächst ebenfalls mit der Nahtlänge.

Die Blechbreite beiderseits der Naht hat ohne Heftung nur geringen Einfluß auf die Größe der Querschrumpfung. Bei Heftungen ist die Schrumpfung bei geringen Breiten wesentlich größer als bei größeren Breiten; erst von einer gewissen Breite ab ändert sich auch bei Heftung die Größe der Querschrumpfung nicht mehr wesentlich (Abb. 5).

Bei gleicher Blechdicke wird die Größe der Querschrumpfung vor allem durch die Vergrößerung des Nahtquerschnittes beeinflusst. Für gut vorgeheftete Nähte

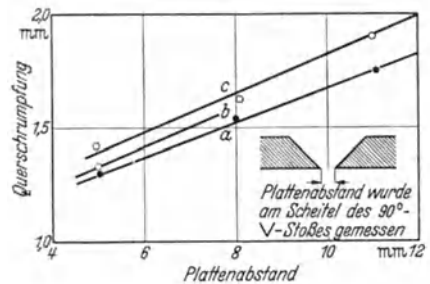


Abb. 8. Querschrumpfung stumpfer V-Stöße. Die 500 mm langen Nähte (90°-V-Stoß) der frei aufliegenden Platten wurden fortlaufend mit nackten Elektroden mit der Hand geschweißt.
 a 5 mm dicke Platte, 1 Lage.
 b 10 mm dicke Platte, 1 Lage.
 c 10 mm dicke Platte, 2 Lagen.

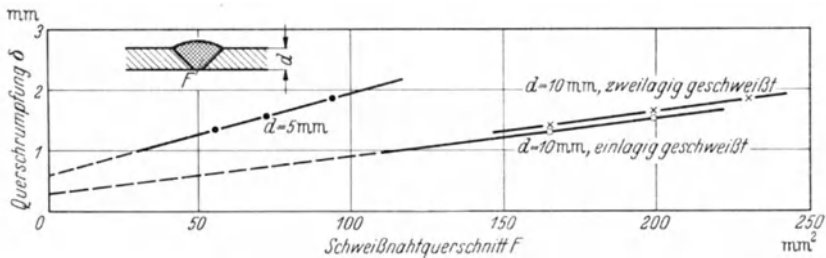


Abb. 9. Querschrumpfung stumpfer V-Stöße.

stellte MALISIUS¹ die in Abb. 6 dargestellte Abhängigkeit fest. Die zwischen den Versuchspunkten eingezeichneten Ausgleichslinien entsprechen den Berechnungen S. 133. Der Einfluß der Größe des Nahtquerschnittes geht auch aus dem für verschiedene Nahtformen aufgestellten Schrumpfungsbild in Abb. 7 hervor. Bei Betrachtung der Schaubilder darf nicht außer Acht gelassen werden, daß die absolute Größe der Schrumpfung von den jeweiligen Schweißbedingungen stark abhängig ist und daß die Schaubilder deshalb nur einen Anhalt für die einzelnen Einflüsse geben können.

Die Größe des Wurzelabstandes wirkt sich infolge des größeren Nahtquerschnittes ebenfalls stark aus² (Abb. 8). Nach der Abbildung ist die Schrumpfung bei der dickeren Platte viel geringer als bei der dünneren. Aus der Umzeichnung dieser Werte als Abhängige vom Nahtquerschnitt nach Abb. 9 leiten REINHOLD

¹ MALISIUS: Fußnote 1, S. 130.

² LOTTMANN: Schrupfspannungen und deren Beachtung beim Lichtbogenschweißen. Z. VDI Bd. 74, S. 1341.

und HELLER¹ den Satz ab, daß die Schrumpfung bei V-Nähten umgekehrt verhältnisgleich zur Plattendicke bei gleichen Schweißnahtquerschnitten ist. (Ob

diese Anschauung allgemeine Gültigkeit hat, scheint durch genügende Versuche nicht belegt.)

Der regelmäßig in mehreren Lagen erfolgende Aufbau dickerer Nähte macht eine Abschätzung der Schrumpfungsvorgänge besonders schwierig, so daß man hierfür ganz auf Versuche angewiesen ist.

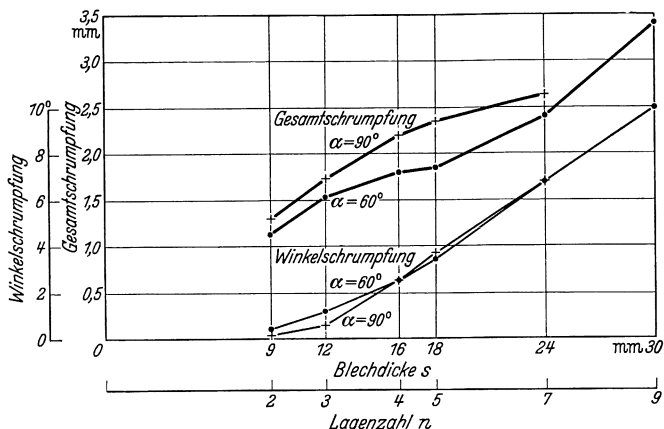


Abb. 10. Abhängigkeit der Querschrumpfung von Blechdicke, Lagenzahl und Nahtwinkel. Nahtlänge 180 mm, Blechbreite 120 mm (beiderseits Naht), V-Naht, Wurzelabstand 3 mm, Manteldrähte 4 und 5 mm Ø, Wechselstrom, normale Stromstärke, Bleche an beiden Enden gefeßt.

Die Winkelschrumpfung ist beim Einschmelzen der ersten Lagen gering, die Parallelschrumpfung gerade bei den ersten Lagen am stärksten; die sich aus beiden ergebende Gesamtschrumpfung steigt annähernd proportional mit dem Fortschreiten des Nahtaufbaues. Die Winkelschrumpfung wächst naturgemäß mit der Nahtdicke, die Gesamtschrumpfung entsprechend (Abb.10). Der Nahtwinkel α scheint sich bei weitem nicht so stark auszuwirken, wie zunächst zu erwarten wäre.

Bei konstanter Blechdicke wächst die Winkelschrumpfung und die Gesamtschrumpfung mit der Zahl der Schweißlagen. Für ein 12-mm- und ein 18-mm-Blech gehen die Verhältnisse aus Abb. 11 hervor. (Rücksichten auf Gefügeausbildung und Reißgefahr führen trotzdem dazu, nicht mit zu wenigen und zu dicken Lagen zu arbeiten.) Weitere Schrumpfungswerte enthält der Stahlbaukalender².

Mit den Verkrümmungserscheinungen bei V-, U- und X-Stumpfnähten dickerer Bleche, deren Beherrschung zur Vermeidung von Zusatz-Biegespannungen im Betrieb erforderlich ist, führten Vergleichsuntersuchungen von E. HÖHN³ zwischen den drei Nahtformen bei freier und fester Lagerung

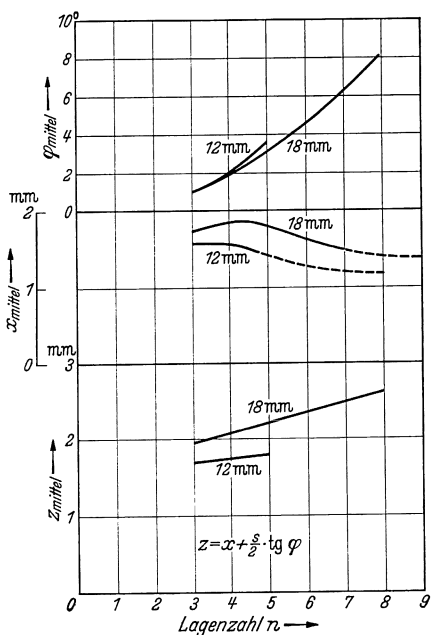


Abb. 11. Abhängigkeit der Schrumpfung von der Lagenzahl bei konstanter Blechdicke (12 und 18 mm). (Nach H. KOCH.) Abmessungen und Schweißbedingungen wie in Abb. 10.

¹ REINHOLD, F. u. F. HELLER: Die Schrumpferscheinungen an der elektrisch geschweißten Schlachthofbrücke in Dresden. Bautechn. Bd. 10 (1932) S. 613f.

² Stahlbaukalender 1938, S. 444. Berlin: Wilh. Ernst & Sohn.

³ HÖHN, E.: Schweißverbindungen im Kessel- und Behälterbau. Berlin: Julius Springer 1935.

der verschweißten Platten, verschiedenen Drahtdurchmessern und verschiedener Schweißfolge zu den Ergebnissen der Zahlentafel 1. (Unter freier Lagerung ist hierbei verstanden, daß eine Stabhälfte leicht festgespannt ist, die andere frei liegt. Bei der festen Lagerung sind beide Stabhälften auf der Unterlage festgespannt.)

Die nachträglich hergestellte Wurzellage erzeugt eine starke Rückkrümmung. Die Nachschweißung wird vor Fertigstellen der ganzen Naht empfohlen. X-Nähte, besonders die abwechselnd von beiden Seiten geschweißten, sind hinsichtlich der Verkrümmung naturgemäß am günstigsten, U-Nähte günstiger als V-Nähte.

Die Anwendung größerer Drahtdurchmesser bei abnehmender Lagenzahl vermindert die Verkrümmung. Untersuchungen von MALISIUS¹ lassen ebenfalls den besonders großen Einfluß der Lagenzahl auf die Verkrümmung erkennen.

Die Festspannung der Teile auf der Unterlage oder gegeneinander wirkt sich für die Verkrümmung sehr günstig aus. In gleicher Richtung wirkt bei frei gelagerten Teilen eine sorgfältige Heftung.

Zahlentafel 1. Verkrümmung von Stäben mit V-, U- und X-Nähten. Stabdicke 26 mm.

Naht	1 V	2 V	3 U	4 U	5 U	6 X	7 X	8 X	9 X
Öffnungsweite oben . mm	28	29	15	15	19	17	17	17	18
Schweißdraht- durchmesser . . . mm	3,2—5	3,2—7	3,2—4	3,2—6	3,2—7	3,2—6	3,2—6	3,2—6	3,2—7
Lagerung	frei	fest	frei	frei	frei	frei	frei	fest	fest
Zahl der Raupen	11	8	10	8	7	7	9	6	8
t_1 (max) nach	10° 30'	0	8° 0'	5° 10'	4° 50'	2° 50'	—1° 20'	0° 35'	1° 10'
der Raupe	10	7	9	7	6	3	4	3	7
t_2 (bleibend,)	9° 30'	0	7° 40'	4° 30'	3° 40'	—1° 45'	0	0	0° 50'
nach der letzten Raupe)	eine Stabhälfte frei	beide Hälften auf die Unterlage festgeschweißt	zunehmende Elektrodendicke			Raupen erst obere Seite, dann untere	jede Raupe abwechselnd auf Seite oben und unten	Raupen erst obere Seite, dann untere	

B. Querschrumpfung von Kehlnähten.

Bei Kehlnähten ist die Querschrumpfung und die Winkelschrumpfung von Bedeutung. Beide können wie bei den Stumpfnähten gering gehalten werden, wenn die Drähte keine übermäßige Wärmezufuhr zum Verschweißen benötigen und wenn die Nahtquerschnitte so klein als mit der Festigkeit vereinbar gehalten werden. Jedoch besteht bei Anwendung zu dünner Kehlnähte oder zu dünner Wurzellagen Rißgefahr.

Die Querschrumpfung bei Kehlnahtverbindungen ist kleiner als bei Stumpfnähten, da die Aufschmelzzone nur über einen gewissen Teil der Blechdicke wirkt. Eine Abhängigkeit der Querschrumpfung von der Blechdicke wie bei Stumpfnähten ist bei gleichbleibenden Nahtquerschnitten nicht zu erwarten, eher eine Verminderung bei dickeren Blechen. Die Schrumpfungsverhältnisse hängen in weitgehendem Maße von dem Schweißdraht, dem Drahtdurchmesser und der Art der Ausführung ab, so daß die Vornahme von Betriebsuntersuchungen an oft vorkommenden Regelverbindungen zu empfehlen ist.

Aus dem Vergleich über die Querschrumpfung bei verschiedenen Verbindungsarten in Abb. 12² geht vor allem hervor, daß die Querschrumpfung bei Kehlnahtverbindungen geringer ist als bei Stumpfnähten. Die im Bauwesen wenig, im

¹ MALISIUS, R.: Mitt. GHH. Bd. 4 (1936) H. 7.

² LOTTMANN: Schweißen im Schiffbau. Berlin: Deutsche Verlagswerke Strauß, Vetter & Co. — Elektroschweißg. Bd. 1 (1930) S. 133, 134.

Brückenbau gar nicht angewendete unterbrochene Schweißung gibt die geringsten Schrumpfungswerte, während sich die überlappten, durchlaufend geschweißten Verbindungen den Stumpfnähten mehr annähern.

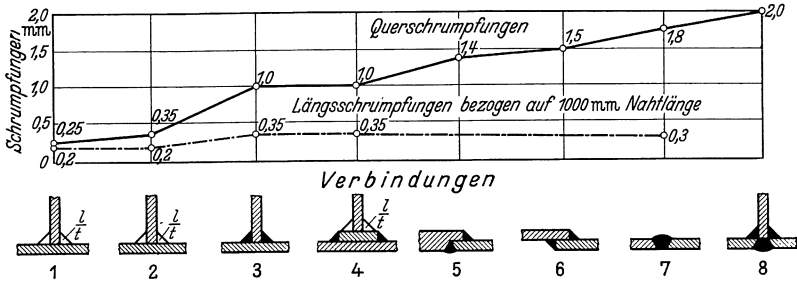


Abb. 12. Quer- und Längsschrumpfung von geschweißten Verbindungen nach LOTTMANN.

Die Winkelschrumpfungen bei Kehlnähten sind in großem Maße abhängig von der Dicke und der elastischen Nachgiebigkeit der durch die Nähte verbundenen Teile. Aus Untersuchungen über die Winkelverkrümmung bei \perp -förmigen Querschnitten mit beiderseitigen Kehlnähten leiten REINHOLD und

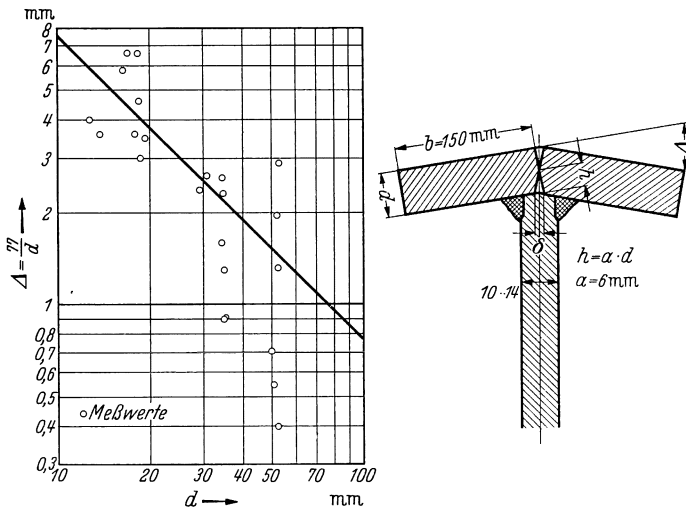


Abb. 13. Beziehung zwischen Lamellendicke d und Lamellenverkrümmung Δ .

HELLER¹ die Beziehung ab, daß die Verkrümmung bei gleicher Nahtdicke im umgekehrten Verhältnis zur Plattendicke steht (Abb. 13). Die Beziehung hat vielleicht allgemeinere Gültigkeit, nur der Faktor der in der Abbildung angegebenen Gleichung ist als Abhängige vom Drahtmaterial und von den Schweißbedingungen zu betrachten (der Wert 77 entspricht — soweit sich aus der Veröffentlichung entnehmen läßt — einem Seelendraht, mit dem Automaten verschweißt). Die im Stahlbaukalender angegebenen Winkelverkrümmungen² lassen diese Beziehung jedoch weniger erkennen. Im allgemeinen sind danach die Verkrümmungen ziemlich unabhängig von der Plattendicke.

¹ REINHOLD u. HELLER: Fußnote 1, S. 136.

² Stahlbaukalender 1938, S. 444.

C. Längsschrumpfung.

Bei der Einschmelzung des erhitzten flüssigen Schweißgutes dehnen sich die ebenfalls stark erwärmten Nachbarzonen der Schweißfuge aus, können diese Formänderung in Richtung der Naht jedoch nur im Zusammenhang mit den nach der Seite zu immer kälteren Teilen ausführen. Der bei allen Schweißverfahren verhältnismäßig schroffe Temperaturabfall und die in höheren Temperaturbereichen anwachsende thermische Dehnung führt zu plastischen Stauchungen in den hochoerhitzten Zonen, die die eigentliche Ursache für die zurückbleibenden Schrumpfungen und die Schrumpfspannungen in der Längsrichtung sind. Etwa im Temperaturgebiet von 600°C grenzen Zonen mit geringem Formänderungswiderstand an Zonen anwachsenden Formänderungswiderstandes, so daß hier das Maximum der plastischen Stauchung eintritt.

Bei der Lichtbogenschweißung, vor allem mit blanken Drähten, ist das über 600°C erwärmte Gebiet sehr schmal, so daß die größte Stauchung unmittelbar an der Naht eintritt. Bei breiteren Erhitzungszonen verlagern sich die Stellen größter Stauchung von der Naht fort (Abb. 14). Entsprechend dem allmählicheren Temperaturübergang bei breiten Erhitzungszonen

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

Die Schwindung des Schweißgutes von der für die Betrachtung maßgeblichen Temperatur, unterhalb der der Formänderungswiderstand merklich anwächst, beträgt etwa 10 mm auf 1000 mm Nahtlänge, von 650° auf 15° : 9,3 mm/m. Die Längsschrumpfungen sind jedoch viel geringer. Bei Blankdrahtschweißungen liegen sie in der Größenordnung von 0,3 mm/m (Abb. 12), bei Manteldrahtschweißungen unter Umständen in der Größe von $10/100$.

Der Unterschied zwischen der thermischen Schwindung und der tatsächlich beobachteten Schrumpfung beruht auf einer zum größten Teile plastischen, zum Teil aber auch elastischen Dehnung der Naht infolge der auftretenden hohen Längsspannungen. Unter vorläufiger Voraussetzung von Längsspannungen, gleich groß oder etwas größer als die Streckgrenze, ergibt sich hierfür bei Baustahl 37 und einer Spannung von 3000 kg/cm^2 eine elastische Dehnung von rund 1,5 mm/m und somit eine plastische Reckung der Naht von $9,3 - 0,3 - 1,5 = 7,5\text{ mm/m} = 0,75\%$. Diese Reckung kann als Mindestmaß der notwendigen Verformungsfähigkeit des Schweißgutes bzw. der sich bildenden Übergangszonen angesehen

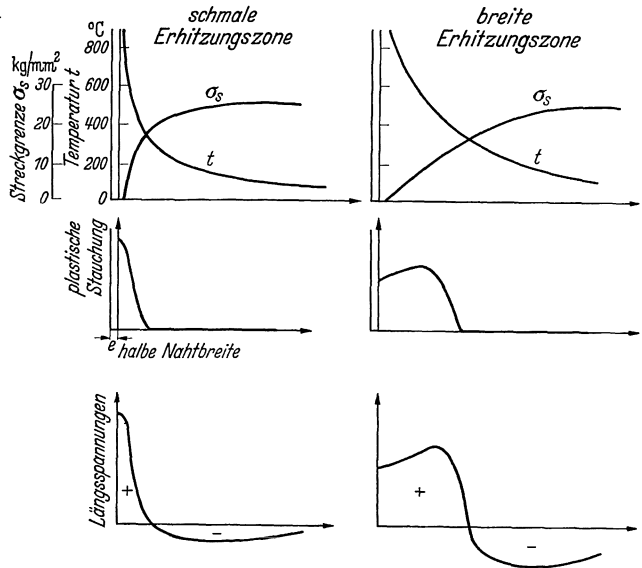


Abb. 14. Temperatur-Stauchungs- und Spannungsverhältnisse bei schmalen und breiten Erhitzungszonen.

werden, das zur Aufnahme der Längsschrumpfung notwendig ist. Hierbei besteht noch keine Sicherheit gegen Rißbildung beim Schweißen; man wird praktisch mindestens eine 3—4fache Verformungsfähigkeit der Nahtzonen fordern, wegen der Querschrumpfung tatsächlich noch mehr.

Besondere Bedeutung hat dies bei der Schweißung festerer Stähle, bei denen die Möglichkeit harter, spröder Übergangszonen vorliegt — im Bauwesen also besonders beim Baustahl St 52 —, und bei denen bei ungeeigneter Legierung oder ungeeigneten Schweißbedingungen die Bildung von Zonen mit sehr geringer Verformungsfähigkeit nicht ausgeschlossen ist.

Eine sehr störende Nebenerscheinung der Längsschrumpfung lang durchlaufender Nähte ist die eintretende Verkrümmung. Dieser kann entgegengewirkt werden durch zweckmäßige Querschnittswahl, symmetrische Nahtanordnung, symmetrische, d. h. gleichzeitige Schweißausführung von symmetrisch zur Achse liegenden Nähten, und durch mechanische oder thermische Maßnahmen.

Die Anordnung symmetrischer Querschnitte und Nähte ist oft nicht möglich. Auch wenn dies der Fall ist, bleiben bei einer Schweißfolge, bei der die Nähte durchlaufend *nacheinander* geschweißt werden, Verkrümmungen zurück; die später gezogene Naht ist nicht imstande, die von der zuerst gelegten Naht verursachte Krümmung wieder voll rückgängig zu machen. Als Abhilfe ist möglichst gleichzeitiges Schweißen mehrerer, entgegengesetzte Verkrümmungen verursachender Nähte zu empfehlen; schrittweise, absatzweise gut verteilte Schweißung ist in der Regel vorteilhafter als ununterbrochene Schweißung.

Bei stark unsymmetrischen Nahtanordnungen können zonenweise Anwärmungen der der Naht entgegengesetzten Kante des Teils bis zur Rotglut einen verkrümmungsfreien Endzustand bewirken, dies jedoch meist auf Kosten einer vermehrten Längsschrumpfung des ganzen Körpers. Zugaben beim Ablängen, gegebenenfalls auch Hämmern der Nähte, vor allem aber Beschränkung der Nahtquerschnitte und der Wärme auf das Notwendige vermindern diese Schwierigkeiten.

Eine Kaltreckung der Schweißkanten durch Hämmern, Pressen oder Walzen der Schweißkanten vor dem Schweißen empfiehlt JURCZYK¹ als besonders günstig zur Verminderung der Längsschrumpfung und ihrer Begleiterscheinungen.

III. Schweißspannungen.

A. Zusammenhänge und Erkenntnisse.

1. Allgemeines.

Mit dem Beginn der örtlichen Erhitzung und Aufschmelzung bilden sich über die ganze Ausdehnung der verschweißten Teile mit dem Fortgang des Schweißprozesses ständig wechselnde Spannungsfelder aus. Die theoretische und experimentelle Klärung der Spannungszustände während der Schweißung ist sehr schwierig und deshalb bisher nur sehr wenig fortgeschritten. Die nachfolgenden Abschnitte behandeln diese Spannungen nur mittelbar im Abschnitt „Rißgefahr“. Dagegen befassen sich zahlreiche vorliegende Untersuchungen mit den nach der Fertigstellung der Schweißung und Abkühlung verbleibenden „Restspannungen“. Diese Untersuchungen haben wesentlich zur Entwicklung günstiger Arbeitsverfahren beigetragen. Die Folgerungen hieraus sind in den nächsten Abschnitten gezogen. Die Ausführungen im Abschnitt „Rißgefahr“ geben dagegen auch Hinweise, daß in manchen Fällen die Vermeidung vorliegender Rißgefahr während

¹ JURCZYK, K.: Schweißen im Maschinenbau. Elektroschweißg. Bd. 8 (1937) S. 153—155.

der Schweißung Maßnahmen veranlassen kann, die, obwohl zu höheren Restspannungen führend, empfohlen werden müssen.

Jede örtliche Erhitzung bis zum Erweichen des Metalles bewirkt nach der Abkühlung zurückbleibende Spannungen. Die Verbindung zweier vollständig frei gelagerter Teile durch Einschmelzen von Metall an den Berührungsflächen führt immer zu Spannungen. Ein „spannungsfreies“ Schweißen ist etwas Unmögliches; günstigstenfalls bleibt ein Spannungszustand zurück, in dem die die Naht belastenden Spannungsfelder keine die Naht als äußere Kraft belastende Resultierende ergeben. Die nacheinander erfolgende Einschmelzung des Schweißgutes führt jedoch auch hierbei meistens zu inneren Verspannungen, deren Auswirkung für Rißgefahr und Restspannungen häufig denen einer äußeren Einspannung gleichkommt.

Die Bedingungen für das Zustandekommen der Spannungen beim „verspannungsfreien“ Schweißen haben auch bei vorliegenden Verspannungen immer noch einen ganz maßgeblichen Einfluß; das Studium ihrer Verhältnisse ergibt die Grundlage auch für die Verhältnisse beim Schweißen unter Einspannung und Verspannung.

2. Schrumpfspannungen beim „verspannungsfreien“ Schweißen.

Bei der Abkühlung haben die nur wenig erwärmten und nur elastisch verformten Teile das Bestreben, ihre ursprüngliche Länge wieder zu erreichen, während die durch Stauchung verkürzten Nahtzonen eine kleinere als die ursprüngliche Länge einnehmen wollen. Sie werden hieran aber wegen des bestehenden Zusammenhangs mit den nur elastisch verformten gehindert. Es bildet sich so ein Schweißspannungszustand in Nahrichtung aus mit großen Zugspannungen in den Nahtzonen und Druckspannungen (Reaktionsspannungen) in den nicht oder nur mäßig erwärmten Teilen.

Bei schmalen Erwärmungszonen bildet sich eine hohe, auf eine sehr schmale Nahtzone begrenzte Zugspannung aus, bei breiteren Erwärmungszonen sind die Zugspannungen kleiner, der größte Wert tritt oft außerhalb der Naht ein, das Zugebiet ist jedoch entsprechend breiter. Die Reaktionsdruckspannungen bei schmalen Erwärmungszonen sind gering, bei breiten Erwärmungszonen werden die Druckspannungen wesentlich vergrößert, die Verwerfungen nehmen zu (Abb. 14).

Gleichzeitig mit den Längsspannungen bilden sich Querspannungen aus, das Schweißgut wird an den Nahtenden gepreßt, in den mittleren Teilen auseinander-

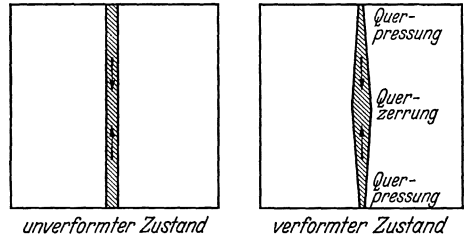


Abb. 15. Die Längsschrumpfung als Erzeugende der Querspannungen bei freier Schweißung.

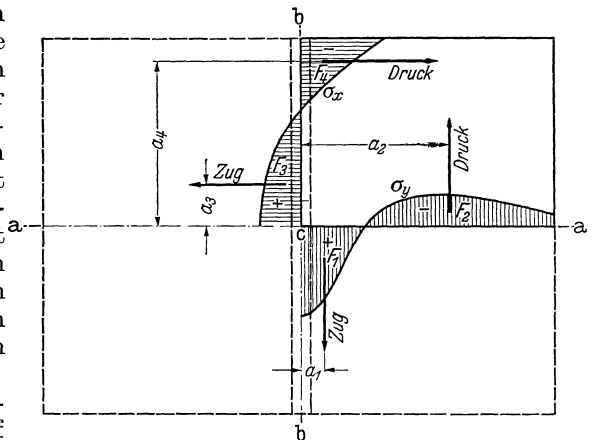


Abb. 16. Zusammenhang zwischen Längs- und Querspannungen auf Grund des inneren Gleichgewichts.

gezerzt (Abb. 15). (Der Ausdruck „verspannungsfrees“ Schweißen ist somit ein Widerspruch und kennzeichnet nur die äußeren Bedingungen.)

Die Längs- und Querspannungen müssen den Gleichgewichtsbedingungen genügen (Abb. 16). Der Spannungszustand wird am besten als der *natürliche Schweißspannungszustand* bezeichnet, weil er der Eigenart der Schmelzschweißung, die Verbindungen durch schmale eingeschmolzene Nähte herzustellen, entspricht.

Praktisch wird man zumindestens immer mit gewissen Verspannungen zu rechnen haben. Jedoch treten bei der Schweißung vieler und sehr wichtiger

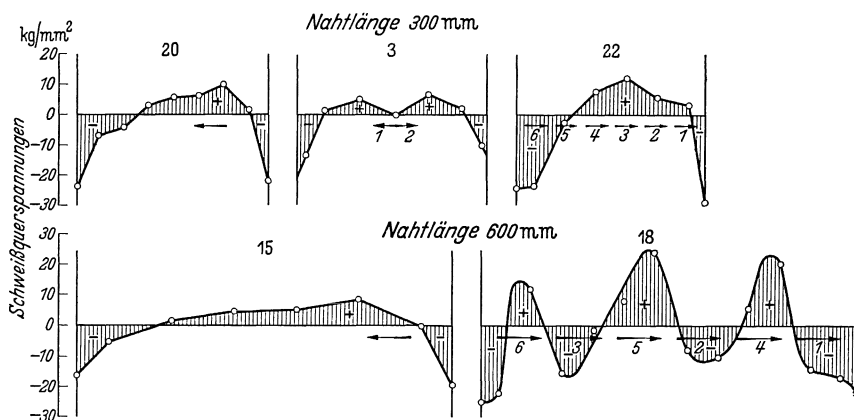


Abb. 17. Werkstoff: St 37. Plattendicke: 12 mm. Schweißverfahren: Lichtbogenschweißung. Schweißdrähte: Seelendrähte, Böhler-Elite. Zahl der Lagen: 3. Schweißquerspannungen für freie Schweißung bei verschiedenen Schweißwegen.

Stumpfnahverbindungen die Auswirkungen der Querverspannungen so stark zurück, daß die Verhältnisse des „verspannungslosen“ Schweißens im wesentlichen maßgebend sind. Die Querspannungen allein aus der Längsschrumpfung sind tatsächlich so groß, daß sie auch bei großen Verspannungen nicht unbeachtet bleiben dürfen.

Durch experimentelle Untersuchungen ist die dargestellte Anordnung der Längs- und Querspannungen in Stumpfnähten bestätigt worden (Abb. 17, Platte 20, 3 und 15). Selbst bei längeren Nähten und auch bei dickeren, in vielen Lagen hergestellten Nähten¹ ist dieser Spannungszustand annähernd vorhanden, so daß ihm eine besonders große praktische Bedeutung beizumessen ist. Das Wesentlichste ist das Auftreten von hohen Druckspannungen an den Nahtenden, die eine natürliche Sicherung der Enden bedeuten.

3. Längsschrumpfspannungen.

Die Nahtlängsspannungen sind am größten bei sehr schmalen Erhitzungszonen, bei sehr festem Schweißgut und bei Grundwerkstoff, der zu starker Härtung neigt. Bei ungünstigem Werkstoff und besonders bei massigen Teilen liegt die

¹ BIERETT, G.: Versuche zur Ermittlung der Schrumpfspannungen in geschweißten Stumpfnahverbindungen. Z. VDI Bd. 78 (1934) S. 709—715. — BIERETT, G. u. G. GRÜNING: Schrumpfspannungen in autogen geschweißten Teilen. Autogene Metallbearb. Bd. 27 (1934) S. 259—266. — GRÜNING, G.: Die Schrumpfspannungen beim Schweißen. Stahlbau Bd. 7 (1934) S. 110—112. Die drei genannten Arbeiten zusammengefaßt in Mitt. dtsh. Mat.-Prüf.-Anst., Sonderh. 25, S. 65—86. — BOLLENRATH, F.: Eigenspannungen bei Lichtbogen- und Gasschmelzschweißung. Abh. aerodyn. Inst. T. H. Aachen 1934, H. 14, S. 27—54. — BOLLENRATH, F.: Weitere Untersuchungen über Eigenspannungen in einfachen Schweißnähten. Arch. Eisenhüttenw. Bd. 9 (1935/36) H. 4, S. 203—207.

Gefahr vor, daß die Nähte Querrisse bekommen. Werkstoffe, Schweißbedingungen und Schweißdrähte, die hierzu Veranlassung geben, sind auszuschneiden.

Die Größe der Nahtlängsspannungen kann durch breitere Erhitzungszonen ermäßigt werden. Drähte mit größerer Wärmeentwicklung und entsprechende Schweißverfahren oder Schweißausführung sind in dieser Hinsicht günstig. Beim St 52 kann hierdurch die Aufhärtung herabgesetzt werden, wie auch mit einer Verminderung der Schweißspannungen zu rechnen ist. Es darf aber nicht außer acht gelassen werden, daß mit größerer Erhitzungszone die auf größerer Breite wirkende resultierende Schrumpfkraft steigt und damit auch die gegenwirkenden Druckspannungen, so daß auch Hilfsmittel dieser Art nicht übertrieben werden dürfen.

Über die Größe der Reaktionsdruckspannungen, die für die Konstruktion mit Rücksicht auf die Knickgefahr oder für die Werkstatt in ihrer Auswirkung als

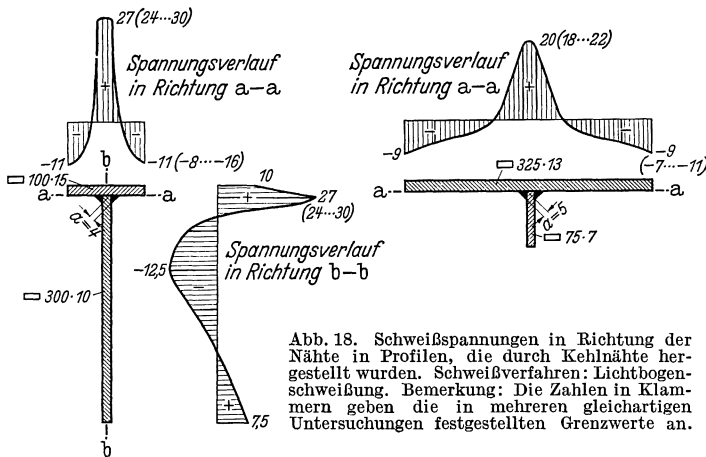


Abb. 18. Schweißspannungen in Richtung der Nähte in Profilen, die durch Kehlkehlnähte hergestellt wurden. Schweißverfahren: Lichtbogenschweißung. Bemerkung: Die Zahlen in Klammern geben die in mehreren gleichartigen Untersuchungen festgestellten Grenzwerte an.

Verwerfungen besonders bei dünnen Teilen, Bedeutung gewinnen können, sind nur wenige exakte Unterlagen vorhanden. Für geschweißte I-Träger wurden die Reaktionsdruckspannungen in Stehblechen von DOERNEN¹ ermittelt.

Man entnimmt dieser Untersuchung, daß der Konstrukteur die Nahtquerschnitte auf das wirklich notwendige Maß beschränken soll. Die Werkstatt muß andererseits in solchen Fällen bemüht sein, die Nahtzonenquerschnitte durch zweckmäßiges Vorgehen zu beschränken. Hierzu gehört Verwendung von Schweißdrähten ohne übermäßige Hitzeentwicklung und Einhaltung der angegebenen Nahtquerschnitte, wobei jedoch die oben angedeuteten Gesichtspunkte zur Ermäßigung der Härtungsgefahr beim St 52 und der Nahtlängsspannungen voranstellen müssen.

Abb. 18 zeigt das Ergebnis von Eigenspannungsmessungen an geschweißten Profilen, bei denen merkliche Kantendruckspannungen auftreten. Wenn auch anscheinend in derartigen Fällen selbst größere Eigendruckspannungen die Stabilität nicht stark beeinflussen (s. S. 167), so müssen doch alle möglichen Maßnahmen der genannten Art getroffen werden, um eine hochwertige Konstruktion zu schaffen.

¹ DOERNEN, J.: Schrumpfungen an geschweißten Stahlbauten. Stahlbau Bd. 6 (1933) S. 22—24.

4. Querverspannungen.

a) **Äußere und innere Querverspannungen.** In der Querrichtung kann eine Hemmung des Ausdehnungs- und Schrumpfungsvorganges vorliegen

1. durch äußere Verspannungen. Hierunter ist die bereits vor dem Beginn der Schweißung einer Naht konstruktiv bedingte Festlegung der zu verschweißenden Teile zu verstehen. Beispiele: Stehblechnähte zwischen durchlaufenden oder bereits verschweißten Gurtplatten und Gurtplatten und Nähte zur Verbindung sehr massiger Teile;

2. durch innere Verspannungen. Hierunter verstehen wir die Verspannung zunächst frei gegeneinander beweglicher Teile durch die bereits fertiggestellten Nahtabschnitte oder Lagen, die ein querverspannungsfreies Schweißen der Naht über die ganze Länge oder über die ganze Nahthöhe unmöglich machen;

3. einer äußeren Einspannwirkung ähnlich sind die Verspannungen bei der Herstellung von Kehlnähten;

4. Sonderfälle stellen die Einschweiß- oder Aufschweißaufgaben dar, also das Einschweißen von Flickern oder Aufschweißen von Platten in größeren Teilen mit Nähten über den ganzen Umfang. Auch bei gleichzeitiger Fertigstellung der ganzen Naht treten in diesen Fällen Querverspannungen auf. Die Verhältnisse gleichen also der äußeren Verspannung;

5. äußere Verspannung und innere Verspannung treten sehr häufig gleichzeitig auf.

b) **Die Abhängigkeit der Querspannungen von den Wärmebedingungen und den physikalischen Wärmeeigenschaften der Werkstoffe.** Die thermische Ausdehnung der erwärmten, den Nahtzonen anliegenden Teile bewirkt bei Verspannungen im Bereich höherer Temperaturen Stauchungen der Nahtzonen, die um so größer sind, je breiter die Erhitzungszonen sind. Die zusätzlichen Querschrumpfspannungen hängen im wesentlichen von der Menge des zugeführten Schweißgutes und dem spezifischen Wärmeverbrauch je Mengeneinheit des abgeschmolzenen Schweißgutes ab. Die in Abb. 7 dargestellten Querschrumpfungen stellen bereits einen Verhältnismaßstab für die Spannungsunterschiede bei verschiedenen großen Nahtquerschnitten dar, jedoch vergrößern sich die Unterschiede noch bei Einspannung infolge der Stauchwirkung in den erhitzten Zonen.

Beim Schweißen ist zunächst immer der Schrumpfungsvorgang in der Naht gegenläufig der Ausdehnung der verschweißten Teile unter der Auswirkung der abfließenden Wärme. Beim Schweißen unter Verspannung wirkt diese Ausdehnung drückend auf die Nahtzonen. Von Bedeutung für diese Vorgänge sind die physikalischen Eigenschaften des Werkstoffes: Ausdehnungskoeffizient, spezifische Wärme, Wärmeleitfähigkeit und Streckgrenze, die keine Festwerte, sondern temperaturabhängige Größen sind und deshalb eine Errechnung sehr schwierig gestalten. Es läßt sich bei der Abschätzung der Auswirkung der genannten Faktoren jedoch wohl übersehen, daß bei großer zugeführter Wärmemenge sich viel ungünstigere Verhältnisse einstellen müssen, als bei geringer, wie es Versuche und praktische Erfahrungen auch bewiesen haben.

Die Temperaturabhängigkeit der physikalischen Eigenschaften bewirkt, daß die *Größe der Restspannungen nicht nur von der Menge der zugeführten Wärme abhängig ist, sondern weitgehend von der Art, in der diese Wärmemenge zugeführt und abgeleitet wird.*

Besonders bei Schweißung unter Einspannung macht sich dieser Umstand bemerkbar. Ein schnelles Einschmelzen der Lagen durch Anwendung größerer Drahtdurchmesser wird in der Regel breitere Erhitzungszonen zur Folge haben, desgleichen eine Ausbreitung der Wärme in die der Naht benachbarten Zonen, d. h. bei behinderter thermischer Dehnung Stauchungen über ein ausgedehntes,

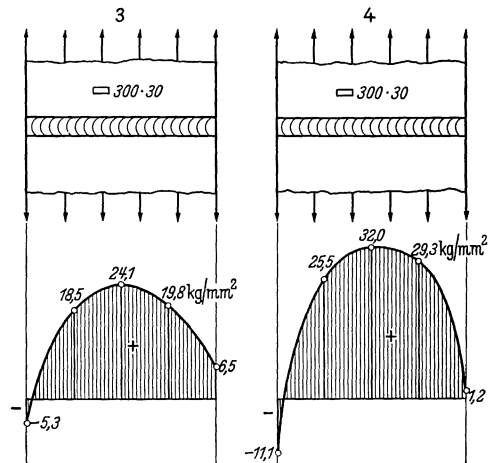
hocherhitztes Gebiet und dementsprechend hohe Verspannungen. Schweißbedingungen, die nur schmale Erhitzungszonen bewirken und bei denen überdies durch Abkühlungspausen zwischen den einzelnen Lagen eine größere Erwärmung der Nachbarschaft vermindert wird, werden im fertigen Konstruktionsteil geringere Querverspannungen zur Folge haben.

Ergebnisse von Untersuchungen über die Auswirkung der Art der Wärmezufuhr (und Wärmeableitung) auf den Verspannungsgrad zeigt Abb. 19. Die Beschränkung der Erhitzungszonen durch Abkühlungspausen zwischen den einzelnen Lagen erzeugt wesentlich geringere Restverspannungen als die eine Ausdehnung der Erhitzungszonen begünstigende pausenlose Schweißausführung der Platte 4.

Abb. 20 zeigt die Ergebnisse einer ähnlichen Untersuchung über die Formänderungen bei Stumpfschweißungen mit Einspannung¹, wobei einmal nach jeder Lage der Neunlagenschweißung eine Abkühlungspause eingelegt wurde, während beim zweiten Versuch die Schweißung in einer Wärme durchgeführt wurde. Im ersten Fall treten in den Nahtzonen höhere Formänderungswerte als im zweiten Fall auf; bei diesem sind jedoch die Formänderungen im größeren Abstand von der Naht wesentlich größer als im ersten Fall. Der Unterschied zwischen den Gesamt- und bleibenden Verformungen in den einzelnen Querschnitten ergibt ein Maß für die Restverspannung. Wie besonders aus dem Querschnitt im größten Abstand von der Naht deutlich wird, ist die Verspannung größer im zweiten Fall. Dies entspricht den Versuchen in Abb. 19.

Die Rißgefahr beim Schweißen ist jedoch eher aus der örtlichen Verformung

der Nahtzonen abzuleiten, so daß die Schweißbedingungen des ersten Falles hierfür gefährlicher erscheinen. Geringere Restverspannung ist somit nicht immer gleichbedeutend mit größerer Rißsicherheit beim Schweißen. Diese oft bestehende Gegenläufigkeit verbietet es vielfach, aus allgemeinen Überlegungen und Erkenntnissen über Restverspannungen allgemein gültige Regeln für zweckmäßige Schweißbedingungen aufzustellen. Für den oben näher erörterten Fall der Stumpfnahtschweißung unter Verspannung wird die Rißgefahr am besten dadurch umgangen, daß die ersten Lagen in einer Wärme durchgeführt werden, bis ein größerer Teil der Stumpfnahnt aufgebaut ist; bei den restlichen Teilen der Naht wird man dagegen durch entsprechende Schweißbedingungen und gegebenenfalls, wenn die Verkrümmungsgefahr nicht vorherrschend ist, auch durch Abkühlungspausen zu breite Erhitzungszonen zur Verminderung der Restverspannungen vermeiden.



Platte 3. Nach jeder Lage 20 Minuten Pause, Schweißzeit (einschließlich Pausen) Lage 1—14: 4 Stunden, Lage 15—24: 2 Stunden. Zwischen Lage 14 und 15: 20 Stunden Pause.

Platte 4. Nach den einzelnen Lagen keine Pause. Schweißzeit für 22 Lagen: 3 Stunden.

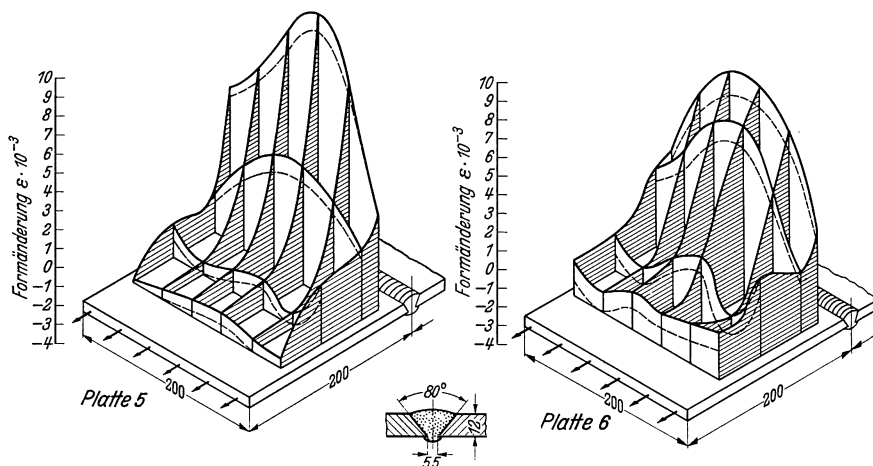
Abb. 19. Tulpennahtschweißung in St 52 unter Einspannung. Mittlere Spannungen in der Naht. Schweißbedingungen: Lichtbogenschweißung, Manteldrähte 4 und 5 mm \varnothing , 22—24 Lagen durchlaufend geschweißt, zum größten Teil lagenweise über die ganze Nahtbreite, teilweise raupenförmig mit 2 Seitenraupen und 1 Mittelraupe verschweißt, obere Weite der Tulpe 30 mm, 3 mm Wurzelabstand. Versuch des Staatlichen Materialprüfungsamtes Berlin-Dahlem für den Deutschen Ausschuss für Stahlbau.

¹ Nach J. QUADFLIEG: Arcos Hausmitt. Bd. 14 (1937) S. 1657—1668.

Bei den Abb. 19 und 20 ist noch auf die sehr starke Auswirkung des *natürlichen* Schweißspannungszustandes hinzuweisen, der sich auch bei Einspannschweißungen in wesentlich kleineren Spannungen, teilweise sogar Druckspannungen, an den Nahtenden gegenüber sehr hohen Zugspannungen in Nahtmitte äußert.

c) **Maßnahmen zur Herabsetzung der Verspannungswirkung.** Die Geringhaltung der Nahtquerschnitte und Vermeidung von Drähten, die unnötig großen spezifischen Wärmearaufwand erfordern, ist eine der wichtigsten Bedingungen zur Herabsetzung der Verspannungen äußerer und innerer Art und zur Erreichung von Nähten ohne übermäßig große Querspannungen.

Verspannungen äußerer oder einer äußeren Verspannung ähnlichen Art werden am sichersten durch elastische Formung der an die Schweißfugen angrenzenden Teile und durch zweckentsprechende Reihenfolge der einzelnen Nähte ermäßigt.



Platte 5.

Nach jeder Lage auf Handwärme abgekühlt.

Platte 6.

Alle Lagen in einem Zug durchgeschweißt.

Abb. 20. Einfluß verschiedener Schweißausführung auf die Verformungen quer zur Naht bei unter Einspannung geschweißten Stumpfnahverbindungen nach J. QUADFLIEG.

— Gesamt-Verformungen

- - - - - Bleibende Verformungen.

Schweißbedingungen: Umhüllte Drähte, 4 mm \varnothing ; 9 Lagen, jede Lage durchlaufend, bei Wechsel der Richtung von Lage zu Lage geschweißt.

Leichte Vorwölbung der Schweißkanten aus der Blechebene (bei unsymmetrischen Nahtquerschnitten nach der Seite der größeren Öffnung), bei Einschweißung von Platten mit zwei parallel zu führenden Nähten und beim Ein- und Aufschiessen von Teilen um ihren ganzen Umfang leichte Wölbung dieser Teile zur Erzielung elastischer Nachgiebigkeit erleichtern schwierige Aufgaben beträchtlich. Beim Stehblechstoß im Baustellenstoß eines Trägers erleichtert die Anwendung eines nicht zu kurzen und ganz leicht gewölbten Zwischenstückes und die Schaffung von Dehnlängen in den angrenzenden Stehblechteilen durch vorläufige Offenlassung der anschließenden Halsnähte auf eine gewisse Länge die Herstellung des Stoßes, auch wenn die Gurtstoße bereits geschlossen sind.

Im Bauwesen ist die Anwendungsmöglichkeit dieses sehr sicheren Hilfsmittels beschränkt. *Größere Bedeutung zur Herabsetzung des Verspannungsgrades hat die Anwendung gut durchdachter Schweißfolgen*¹. Für den wichtigen Fall des Baustellenstumpfstoßes hat sich besonders das Arbeitsverfahren bewährt, in dem Steg-

¹ SCHAPER, G.: Die Ausbildung und das Schweißen von Baustellenstößen geschweißter, vollwandiger Hauptträger von Brücken. Elektroschweißg. Bd. 8 (1937) S. 1—4.

und Gurtnähte eines Stoßes von 2—3 Schweißern gleichzeitig hergestellt werden¹, so daß die Erwärmung und Schrumpfung in Steg und Gurt etwa gleichzeitig beginnt und beendet wird. Bei sehr ungleichen Dicken von Gurtprofilen und Stegblech wird auch in Abweichung hiervon so vorgegangen, daß zuerst einige Lagen der Gurtnähte geschweißt werden und erst dann mit dem Schließen der Stegnaht begonnen wird. Hierdurch sollen die Schrumpfungsunterschiede zwischen Gurtnähten und Stegnaht ausgeglichen werden. Mit der Stegnaht ist zu beginnen, wenn die Gurtnähte bereits um einen gewissen, durch Erfahrung gewonnenen Wert geschrumpft sind, so daß die zu erwartende Restschrumpfung der Stegnahtschrumpfung entspricht. Dieses Verfahren hat sich beim Bau mehrerer Reichsautobahnbrücken bewährt².

Bei der Zusammenfügung mehrerer Scheiben eines Tragwerkes, z. B. bei der Zusammenfügung von Hauptträgern, Quer- und Längsträgern, ist die Schweißfolge ebenfalls von ausschlaggebender Bedeutung³ für die Größe der Verspannung der einzelnen Teile gegeneinander.

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

Die *Querverspannung über die Nahtlänge*, als Folge der nacheinander erfolgenden Einschmelzung und Abkühlung, wird um so kleiner, je gleichmäßiger das Temperaturfeld zwischen der Stelle, bis zu der die Naht jeweils fertiggestellt ist, und dem Nahtanfang ist. Das heißt größere Schweißgeschwindigkeiten dienen der Herabsetzung der Querverspannung über die Nahtlänge. Praktisch stark vermindern kann man diese Querverspannung durch Anwendung der schrittweisen Schweißung. Am besten ist die Pilgerschrittschweißung entweder von einem Nahtende aus oder von der Mitte symmetrisch nach beiden Seiten fortschreitend (Abb. 21). Besonders vorteilhaft ist diese Schweißfolge für die erste Lage, da einmal die Rißgefahr und die bei durchlaufender Schweißung leicht eintretende Überschiebung der noch nicht fertiggestellten Nahtenden infolge der voreilenden Wärme stark herabgesetzt wird, während die weiteren Lagen mit wechselnden Hauptrichtungen oft durchlaufend geschweißt werden. Die Schritte werden je nach der Nahtlänge und der Plattendicke zu 10—40 cm, aber bei sehr langen Nähten bisweilen auch noch länger gewählt. Eine gute und enge Heftung im Abstand der Schrittlängen ist meistens empfehlenswert.

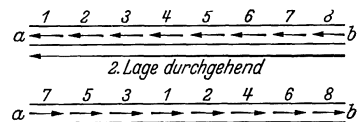


Abb. 21. Pilgerschrittschweißung.

Die Anwendung der Schrittschweißung hat vor allem im Schiffbau bei der Herstellung langer Nähte große Bedeutung gewonnen. Bei Einschweißungen von Platten ist ihre Anwendung kaum zu umgehen. Im Trägerbau kann sie für die Herstellung von längeren Stehblechnähten, vor allem für die Schweißung der Wurzellage, und auch für sonstige lang durchlaufende Nähte, von Wert sein. Ein absatzweises, gut verteiltes Schweißen mehrerer parallel verlaufender Längsnähte eines Konstruktionsteils setzt vor allem die Längsschrumpfung und Verkrümmungserscheinungen herab.

Die Anwendung der Schrittschweißung hat vor allem im Schiffbau bei der Herstellung langer Nähte große Bedeutung gewonnen. Bei Einschweißungen von Platten ist ihre Anwendung kaum zu umgehen. Im Trägerbau kann sie für die Herstellung von längeren Stehblechnähten, vor allem für die Schweißung der Wurzellage, und auch für sonstige lang durchlaufende Nähte, von Wert sein. Ein absatzweises, gut verteiltes Schweißen mehrerer parallel verlaufender Längsnähte eines Konstruktionsteils setzt vor allem die Längsschrumpfung und Verkrümmungserscheinungen herab.

¹ SCHMIDT, K.: Schweißen von Stumpfstößen in der Werkstatt und auf der Baustelle. Elektroschweißg. Bd. 7 (1936) S. 187—189. — MIESEL, K. u. W. RAJDT: Die Herstellung der Baustellenstöße der Reichsautobahnbrücke über den Bober. Elektroschweißg. Bd. 9 (1938) S. 141—144.

² BIERETT, G.: Über Schrumpfkkräfte und Schrumpfspannungen in elektrisch geschweißten Baustellenstumpfstößen. Elektroschweißg. Bd. 9 (1938) S. 225—232.

³ SCHAPER, G.: Die Schweißung im Ingenieurhochbau und Brückenbau. Elektroschweißg. Bd. 8 (1937) S. 121—125, 141—147, bes. S. 124.

Bei kleinen Längen bis zu 400 mm bietet die Schrittschweißung keine Vorteile. Bei den mittleren im Stahlbau so häufigen Stumpfnahtlängen von 500—800 mm oder etwas mehr ist ihre Anwendung vielleicht bei vorliegender äußerer Verspannung bei Herstellung der Wurzelnaht von Wert. In der Regel werden diese Nähte aber auch noch ohne Schwierigkeiten durchlaufend oder in zwei Abschnitten herzustellen sein.

Die *Verspannungen über die Nahthöhe* können durch die Art der Schweißausführung, vor allem der Fugenform und der Lagenzahl abgemindert werden. Bei einseitigen Nahtformen, die mit sehr vielen dünnen Lagen geschweißt werden, tritt eine sehr ungleichmäßige Spannungsverteilung über die Höhe auf und größere

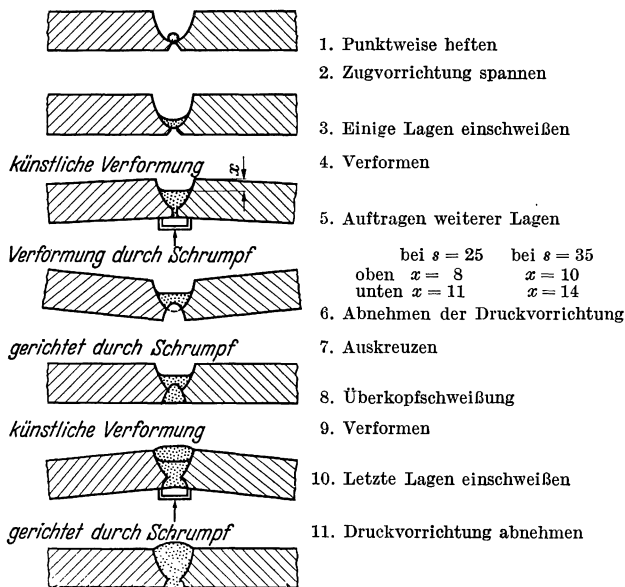


Abb. 22. Schweißen von Gurtnähten mit künstlicher Verformung.

Spannungsspitzen in den oberen Lagen. Symmetrische oder annähernd symmetrische Nahtquerschnitte, nach Möglichkeit wechselseitig geschweißt, werden allgemein bevorzugt¹. Hinsichtlich der Lagenzahl, Raupenanordnung und Drahtdurchmesser besteht in den verschiedenen Anwendungsgebieten der Schweißtechnik keine Einheitlichkeit. Der Behälterbau wendet bei der Dickblechschweißung im allgemeinen etwas dickere Drähte an. Die Lagendicke wird nicht übermäßig groß gewählt, nicht größer als 3—4 mm, aber auch nicht zu dünn. Die Schweißung erfolgt in breiten Lagen von einer

Seite des Nahtquerschnittes zur anderen. Im Stahlbau ist die Anwendung dickerer Drähte beschränkt. Geschweißt wird meistens nicht in breiten Lagen, sondern raupenförmig, wobei die in der Mitte liegenden Raupen zur Herabsetzung der Spannungen nach den seitlichen Raupen gelegt werden. Auf die die Verkrümmung steigernde Wirkung von Abkühlungspausen zwischen den einzelnen Lagen ist ganz besonders hinzuweisen. Ein besonderes Mittel zur Verminderung der Verspannung über die Höhe wird von TEBBE² vorgeschlagen. Hierbei wird durch eine Druckvorrichtung der Nahtteil nach Einschweißen einiger Lagen entgegengesetzt der späteren Schrumpferkrümmung aus der Ebene herausgekrümmt; durch zweckentsprechendes Vorgehen werden Verspannungen erteilt, die den Spannungen aus den Schrumpfvorgängen entgegenwirken. Die Arbeitsfolge für eine Tulpennaht geht aus Abb. 22 hervor. Im einzelnen wird auf den Bericht verwiesen.

In bezug auf die häufig sehr großen Verbiegungsspannungen in einseitigen Stumpfnähten ist das Verfahren nach ausgeführten Messungen an der Reichs-

¹ HÖHN, E.: a. a. O. Fußnote 3, S. 136.

² TEBBE, EL.: Schweißtechnische Erfahrungen beim Bau einer größeren Brücke. Elektroschweißg. Bd. 8 (1937) S. 185—190.

autobahnbrücke über den Dehmsee (Tulpennähte in Wulstprofilen von 25 und 35 mm Dicke) vorteilhaft. An anderer Stelle, z. B. Reichsautobahnbrücke über den Bober bei Groß-Gollnisch (Tulpennähte in Nasenprofilen von 38 mm Dicke), sind jedoch auch ohne dieses Verfahren sehr günstige Verhältnisse hinsichtlich der Verbiegungsspannungen erzielt worden. Für schräge Gurtstöße ist das Verfahren noch nicht erprobt. Eine allgemeinere Anwendung wird davon abhängen, ob die mechanischen Vorkrümmungsmaßnahmen angewendet werden können, wenn die zur Verminderung der Verspannung zwischen Steg und Gurt auf jeden Fall empfehlenswerte, gleichzeitige Schweißung aller Nähte eines Baustellenstoßes angewendet werden soll.

Für die *Herabsetzung der Verspannungen beim Baustellenstoß*, und zwar der Verspannung von Stegblech gegen Gurtung wie auch der Verkrümmungsspannungen in den Gurtnähten ergeben sich nach durchgeführten Untersuchungen¹ folgende Gesichtspunkte:

Die Verspannung zwischen Stegblech und Gurtung kann durch weitgehend gleichzeitig durchgeführte Schweißung von Steg- und Gurtnähten sehr gering gehalten werden. Die Geringhaltung sollte angestrebt werden einmal zur Vermeidung ungünstiger Stegblechbeanspruchungen, andererseits auch deshalb,

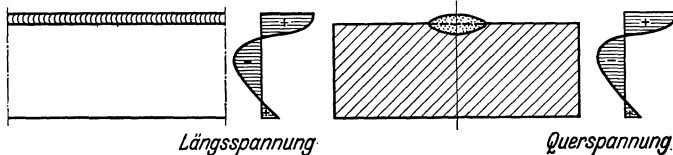


Abb. 23. Längs- und Querspannungsanordnung beim Aufschiessen einer Raupe.

weil größere Verspannungskräfte die Verkrümmungswirkung in den Gurtnähten wahrscheinlich ungünstig beeinflussen. Auch die hauptsächlich einseitig geschweißten U-Nähte der Gurtplatten lassen sich ohne allzu starke Verkrümmungen und Verbiegungsspannungen schweißen. Zunächst sind hierzu die allgemein vorliegenden Erkenntnisse — Vermeidung zu geringen Drahtdurchmessers und allzu zahlreicher Lagen, raupenweiser Aufbau der Naht von den Nahtflanken nach Nahtmitte zu, vor allem fortlaufendes Arbeiten an der Naht, günstige Wirkung des Stemmens — zu beachten. Von besonderer Bedeutung scheint aber auch die allgemeine Anordnung der Stoßnähte zu einander zu sein. Das Maß der freien Verkrümmungslänge der Gurtplatten, das durch die zunächst offene Halsnahtlänge gegeben ist, sollte weitgehend beschränkt werden. Deshalb soll der Abstand zwischen Steg- und Gurtnähten möglichst beschränkt werden und ebenso der Abstand der vor der Gurtnaht endenden Werkstatthalsnaht. Die zur Herabsetzung der Verspannung für notwendig erachtete Dehnlänge kann durch Offenlassen der vor dem Stegstoß endenden Werkstatthalsnaht auf genügende Länge erreicht werden. Ebenfalls ist darauf zu achten, daß die Verspannungsvorrichtung für die Gurtplatten die Gewähr gibt, daß ein Ausweichen der Gurtplatten unter der Wirkung von Druckkräften infolge der Stegnahtschrumpfung nicht eintreten kann.

d) Die Schrumpfspannungen bei Kehlnahtverbindungen. Die Kehlnähte werden nur auf der Oberfläche der zu verbindenden Teile mit geringer Tiefenwirkung eingeschmolzen. Ausdehnung und Schrumpfung des Schweißgutes erfolgen unter stärkster Behinderung in der Längsrichtung und in der Querrichtung durch das seitlich und unter der Raupe befindliche Material. Bei Herstellung

¹ BIERETT, G.: a. a. O. Fußnote 2, S. 147.

einer Raupe auf einer Blechoberfläche ergeben sich die in Abb. 23 dargestellten Spannungsverhältnisse in der Längs- und in der Querrichtung, wobei die größten Zugspannungen in beiden Richtungen mindestens der Werkstoffstreckgrenze entsprechen. Zu dieser zweiachsigen Beanspruchung mit großen Längs- und Querspannungen tritt eine etwa senkrecht gerichtete große Beanspruchung durch die Schrumpfverspannung der aneinandergefügteten Teile. Zum mindesten die Zonen in Nähe sämtlicher begrenzender Einbrandflächen, wahrscheinlich aber auch der größte Teil der Naht, unterliegen einem hochgradigen räumlichen Spannungszustand allseitigen Zuges (Abb. 24).

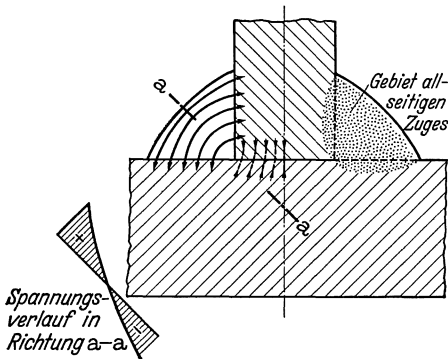


Abb. 24. Schrumpfwirkung bei Kehlnähten.

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

Die Kehlnahtverbindungen unterliegen im Verhältnis zu Stumpfnahntverbindungen infolge der viel ungünstigeren Eigenspannungsverhältnisse einer erhöhten Rißgefahr.

5. Die Rißgefahr.

Die Rißgefahr ist vor allem eine Frage der metallurgischen und physikalischen Eigenschaften des Schweißgutes und der Übergangszonen. Sie muß jedoch auch hier berührt werden, weil in jedem Fall, in dem Risse eintreten, Spannungen aufgetreten sein müssen, denen die Nahtzonen nicht gewachsen waren.

Soweit metallurgische und physikalische Erscheinungen die Hauptrolle spielen, ist zu unterscheiden:

a) Die *Schweißnahtrißempfindlichkeit*, die in erster Linie von den Eigenschaften des Schweißgutes abhängig ist.

b) Die *Schweißempfindlichkeit* höher gekohlter und legierter Stähle, im Bauwesen also vor allem des Baustahles St 52.

c) Die *Schweißrissigkeit* gewisser legierter Stähle.

d) Die *Rißgefahr infolge mechanischer Ursachen* (zu hohe Schweißspannungen und ungünstige Verteilung der Schweißspannungen) kann auch vielfach durch ungeeignete Schweißausführung, Naht- und Lagenanordnung vorliegen.

a) *Schweißnahtrißempfindlichkeit*. Die Risse treten in den Nähten selbst auf und werden vor allem bei Kehlnähten beobachtet¹. Sie können entstehen unmittelbar nach der Schweißung bei hohen Temperaturen und bei der Abkühlung im Temperaturbereich großen Formänderungswiderstandes und verringerter Formänderungsfähigkeit, also bei 200—300° (Blaubruchgebiet). Wahrscheinlich handelt es sich bei der Mehrzahl der Schadenfälle um Risse bei höheren Temperaturen. (Von Heftstellenrissen und Rissen leichter Nähte, die durch das Schweißen anderer Nahtabschnitte eintreten, wird hierbei abgesehen.) In vielen Fällen konnten Risse als ausgesprochene Warmrisse ($t > 600^\circ \text{C}$) erkannt werden.

¹ STEILER, C.: Ursachen der Schweißnahttrissigkeit. Stahl u. Eisen Bd. 58 (1938) S. 346—350.

Die bekannt gewordenen Erscheinungen über Schweißnahtrißempfindlichkeit weisen darauf hin, daß man bei der Entwicklung der Schweißdrähte den Festigkeits- und Formänderungseigenschaften der Naht bei hohen Temperaturen, den Vermischungsvorgängen zwischen Schweißgut und Grundwerkstoff, den strukturellen Verhältnissen des Gefüges wie Korngröße, Kristallausbildung und Kristallanordnung und den Erstarrungsvorgängen¹, große Aufmerksamkeit schenken muß. Die Betrachtung des im erkalteten Zustande verbleibenden Spannungszustandes kann leicht zu Fehlschlüssen führen; als feststehend kann auch gelten, daß die Formänderungsfähigkeit bei Raumtemperatur kein Maßstab für die Nahtrißempfindlichkeit ist.

Da es zur Zeit kaum möglich ist, sich über die bei der vorliegenden Beanspruchung maßgeblichen Bedingungen exakt Aufschluß zu verschaffen, ist man gezwungen, empirische Versuche über die Rißneigung vorzunehmen. Durch die seitens der Reichsbahn heute allgemein erfolgende Prüfung der Drähte auf Schweißnahtrißempfindlichkeit kann für alle zugelassenen Drähte diese Gefahr als stark herabgesetzt angesehen werden².

b) Schweißempfindlichkeit. Diese hat im Bauwesen Bedeutung für den unter Umständen zur Härtung neigenden Baustahl St 52 und für alle Kohlenstoffstähle über etwa 0,15 C. Durch die von der Deutschen Reichsbahn festgesetzte Höchstgrenze für den Kohlenstoffgehalt und die Legierungsbestandteile für St 52 ist, soweit die Rißgefahr durch den Werkstoff gegeben ist, schon ein großer Fortschritt erzielt. Jedoch ist auch bei dieser zur Erreichung der vorgeschriebenen Festigkeitseigenschaften notwendigen Zusammensetzung keineswegs die Härtungsgefahr bei ungeeigneten Schweißbedingungen ausgeschlossen. Auch beim Baustahl St 37 kann z. B. bei zu hohen Verunreinigungen an Phosphor und Schwefel, die bei bestimmten Herstellungsverfahren auftreten können, Schweißempfindlichkeit vorliegen.

Die Schweißempfindlichkeit festerer Stähle ist nach heutigen Erkenntnissen als Auswirkung zu harter Übergangszonen mit sehr geringem Formänderungsvermögen und besonders großen Schweißspannungen anzusehen^{3, 4}. Sie äußert sich in von den Härtungszonen ausgehenden Rissen, die bei besonders ungünstigen Verhältnissen bereits bei Beendigung der Schweißarbeiten eingetreten sind oder bei verhältnismäßig geringen Zusatzbelastungen eintreten. Das vereinzelt beobachtete Ausschälen der Nähte in den Übergangszonen ist eine andere Bruchform, die ebenfalls auf Schweißempfindlichkeit des Stahls bei den angewendeten Schweißbedingungen hinweist.

Genau genommen kann man von Schweißempfindlichkeit eines Stahles nur im Hinblick auf die angewendeten Schweißbedingungen sprechen. Stähle, die bei gewissen Schweißbedingungen gegenüber anderen Stählen schweißempfindlich sind, können bei Berücksichtigung ihrer Eigenart durch die Art der Schweißausführung zu hochwertigen Konstruktionen verarbeitet werden. Für den Stahlbau sind jedoch Stähle, die nur unter ganz besonderen Vorsichtsmaßnahmen mit Erfolg zu schweißen sind, nicht zu gebrauchen.

¹ SEXAUER, W.: Beobachtungen über die Warmrißempfindlichkeit von Schweißnähten. Elektroschweißg. Bd. 9 (1938) S. 21—26.

² STIELER, C.: Erfahrungen bei der Prüfung von Elektroden. Elektroschweißg. Bd. 8 (1937) S. 181—184, 212—214.

³ BIERETT, G.: Über die Abhängigkeit von Nahtbeschaffenheit und mechanischen Eigenschaften. Elektroschweißg. Bd. 8 (1937) S. 148—152. — KLÖPFEL, K.: Das Verhalten längsbeanspruchter Schweißnähte und die Frage der Zusammenwirkung von Betriebs- und Schrumpfsparnungen. Stahlbau Bd. 11 (1938) S. 105—110.

⁴ a. a. O.: Fußnote 1, S. 152.

Von besonderer Bedeutung ist hierbei die zugeführte Wärmemenge, d. h. die Breite der Erhitzungszone¹. Von dieser abhängig ist einmal die eintretende Härtung, dann aber auch die Größe der Nahtspannungen. Schmale Erhitzungszonen haben größere Härtung und größere Längsspannungen, breitere Wärmeebenen geringere Härtung und geringere Längsspannungen zur Folge (Abb. 14).

Da die Spannungsverhältnisse in den Nahtzonen festere Stähle nicht nur thermisch bedingt sind, sondern wahrscheinlich maßgeblich von den Gefügeumwandlungerscheinungen beeinflusst werden, lassen sich keine sicheren Aussagen über die Spannungsverhältnisse machen. Die Umwandlungen treten im übrigen bei der verhältnismäßig schnellen Abkühlung nicht im Bereich hoher Temperaturen und geringeren Formänderungswiderstandes ein, sondern verlagert nach niedrigeren Temperaturen, in denen der mit Volumenveränderungen verbundenen Umwandlung schon merklicher Formänderungswiderstand entgegengesetzt wird, was die Abschätzung der Spannungsverhältnisse besonders erschwert. Man wird jedoch nicht fehlgehen, wenn man aus Kenntnis der mechanischen Eigenschaften der Nahtzonen festerer Stähle annimmt, daß die härteren Übergangszonen Träger besonders hoher Längsspannungen und deshalb besonders gefährdet sind.

Die Schweißempfindlichkeit der Stähle wird neuerdings durch einfache technologische Versuche geprüft^{2, 3}. Ausgeführt werden Biegeversuche mit dickeren Breitflachstählen, auf denen in der Zugzone eine Längsraupe unter vorgeschriebenen Bedingungen niedergeschmolzen wird. Der Biegewinkel bzw. die Dehnung der Nahtzonen beim Anbruch soll ein Maßstab für die Empfindlichkeit des Stahles sein. Es ist zu erwarten, daß Vorprüfungen dieser Art dazu führen werden, daß Stähle, die bei den dem Stahlbau möglichen Schweißbedingungen zu empfindlich sind, ausgeschieden werden.

Obwohl Versuchen dieser Art nicht zu übersehende Mängel anhaften, haben sie wesentliche Erkenntnisse geliefert und werden vorerst bei der Stahlauswahl nicht zu entbehren sein. Die hierdurch gegebene Anregung zur Entwicklung verhältnismäßig schweißunempfindlicher Stähle auf metallurgischem Wege durch bestimmte Erschmelzungsbedingungen und Vergütungsmaßnahmen bei dem Walzprodukt scheinen ihre ersten Erfolge zu zeitigen⁴, so daß mit dem Verschwinden besonders schweißempfindlicher Stähle St 52 zu rechnen ist. Eine solche Entwicklung ist deshalb besonders zu fördern, weil eine Schadensvermeidung und gleichzeitig eine allgemeine Verbesserung mit Sicherheit nur durch den Stahl und gegebenenfalls durch nachträgliche Vergütungsmaßnahmen (Wärmebehandlung geschweißter Teile) erreicht werden kann, während ausführungstechnische und konstruktive Maßnahmen hierbei nur unterstützend wirken können.

c) Schweißbrissigkeit. Von der Behandlung der sog. Schweißbrissigkeit kann in diesem Rahmen abgesehen werden, weil sie nur bei sehr geringen Blechdicken und gewissen legierten Stählen auftritt, die zur Zeit für das Bauwesen nicht in

¹ BIERETT, G.: Zur Festigkeitsfrage bei der Schweißung festerer Baustähle. Elektroschweißg. Bd. 9 (1938) S. 121—126.

² KOMMERELL, O.: Die neuen Lieferbedingungen für St 52 als Folge neuerer Versuche und Erfahrungen. Stahlbau Bd. 11 (1938) S. 49—54.

³ BIERETT, G. und W. STEIN: Prüfung der Schweißempfindlichkeit des Baustahls St 52 an Biegeproben mit Längsraupen. Stahl u. Eisen Bd. 58 (1938) S. 427—431.

⁴ WERNER, O.: Über den Zusammenhang zwischen Stahleigenschaften und Schweißbarkeit von Stählen. Elektroschweißg. Bd. 10 (1939) S. 61, 145. — WASMUHT, R.: Neuere Erkenntnisse zum Schweißen von St 52. Bautechn. Bd. 17 (1939) S. 85—90. — Einfluß des Normalglühens auf Festigkeitseigenschaften und Schweißverhalten von Baustahl St 52. Stahl u. Eisen Bd. 59 (1939) S. 209—212.

Betracht kommen. Für den Flugzeugbau liegen zu dieser Frage eingehende Forschungsarbeiten und -berichte vor¹.

d) Rißgefahr infolge mechanischer Ursachen. Auch bei günstigen metallurgischen und physikalischen Voraussetzungen kann bei ungünstigen konstruktiven oder schweißtechnischen Verhältnissen eine Rißgefahr bestehen. Die Rißgefahr ist dann gegeben durch starre Einspannungen oder zu starke Verspannungen, die im Verlauf der Schweißausführung eintreten. Sie wird verschärft, wenn gleichzeitig Schweißnahtriebempfindlichkeit, Schweißempfindlichkeit oder -rissigkeit vorliegt. Wesentliche Hinweise zur Bekämpfung der Rißgefahr waren bereits in den vorhergehenden Absätzen gegeben worden. Abb. 25 enthält eine Zusammenstellung einiger wichtiger Gefahrenquellen.

Im Verhältnis zur Werkstückdicke zu dünne Raupen, vor allem bei den Wurzellagen, führen leicht zu Rissen. Bei Stumpfnähten reißt eine zu dünne Wurzellage bei dickeren Platten bei den meistens vorliegenden Verspannungen, weil der Kraftfluß an sich schon sehr ungünstig ist (Abb. 25). Die meisten Risse nehmen ihren Ausgang von der Wurzel; es empfiehlt sich deshalb, die Wurzellage mit samt dem darunter befindlichen dünnen Steg des Grundwerkstoffes rückwärtig auszukreuzen.

Zur Vermeidung von Rissen bei der Herstellung dicker Nähte sollen die Schweißarbeiten nicht unterbrochen werden, bis ein größerer Teil der Nahthöhe ausgefüllt ist. Bei wechselseitigem Schweißen unter Drehen der Teile soll zunächst auf der einen Seite eine gewisse Höhe fertiggestellt werden. Bei Einschweißung von Platten² um den ganzen Umfang, Werkstoff St 52, konnten Rißbildungen dadurch vermieden werden, daß jeder Abschnitt der schrittweise hergestellten Naht über die ganze Dicke (in mehreren Lagen) fertiggestellt wurde, ehe die weiteren Abschnitte in Angriff genommen wurden.

Bei Kehlnähten führt eine im Verhältnis zur Werkstückdicke zu dünne Wurzellage fast immer zu Rissen. Die Raupendicke muß in einem angemessenen, nicht übermäßig kleinen Verhältnis zur Materialdicke stehen. (Zu beachten auch bei sog. Dichtungsnähten auf dicken Teilen.)

Für die Rißgefahr bei Kehlnähten spricht wahrscheinlich auch die Formfrage mit Rücksicht auf den Verlauf der Schrumpfspannungen ein größere Rolle. Bei den Kehlnähten ist nach Abb. 24 bei etwa geradliniger Begrenzung des

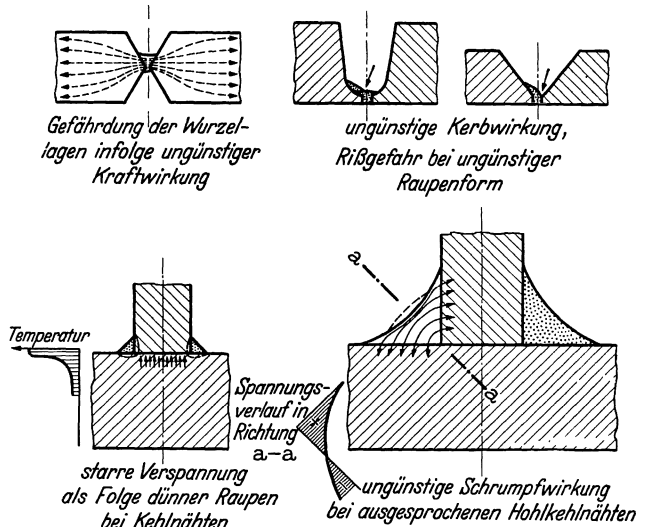


Abb. 25. Mechanische Ursachen für die Rißgefahr.

¹ MÜLLER, J.: Luftf.-Forsch. Bd. 11 (1934) S. 93—103. — ZEYEN, K. L.: Techn. Mitt. Krupp Bd. 3 (1935) S. 176—188. — BOLLENRATH, F. u. H. CORNELIUS: Arch. Eisenhüttenwes. Bd. 10 (1937) S. 563—573.

² BÜHLER, H. u. W. LOHMANN: Beitrag zur Frage der Schweißspannungen. 3. Folge. Eigen- spannungen bei der Flickenschweißung. Elektroschweißg. Bd. 5 (1936) 221—229.

Nahtdreiecks ein ungestörter Verlauf der Hauptspannungslinien infolge der Schrumpfkkräfte zu erwarten; bei ausgesprochenen Hohnähten muß eine Störung des Kraftlinienverlaufs nahe der Oberfläche mit entsprechenden Spannungsspitzen eintreten (Abb. 25). Ausgesprochene Hohnähte reißen deshalb erfahrungsgemäß leichter als Nähte mit annäherndem Dreiecksquerschnitt. Der häufig beobachtete Rißansatz an hohlen Kraterenden dürfte nicht zuletzt auf diesen Umstand zurückzuführen sein. Die Schweißdrahtindustrie hat ihrerseits bereits Abhilfe geschaffen dadurch, daß Drähte, die übertrieben hohle Nahtformen ergeben, nicht mehr hergestellt werden.

6. Besondere Maßnahmen zur Vermeidung der Rißgefahr und zur Spannungsverbesserung.

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

1. Vorwärmungen sind bei massigen Teilen und besonders bei festeren Stählen vor Legen der ersten Lage zu empfehlen. Bei Schwierigkeiten, die auf Härtungen hinweisen, wird man zweckmäßig von der Vorwärmung der Schweißkanten bzw. der Einbrandflächen Gebrauch machen. Hinsichtlich sonstiger Anwendung von Vorwärmungen wird auf den Abschnitt „Längsschrumpfung“ verwiesen.

2. Wärmungen der bereits fertiggestellten Nahtabschnitte während der Schweißarbeiten beim Schweißen der weiteren können die Verspannungen bei langen Nähten und bei dicken Nähten und damit die Rißgefahr herabsetzen¹.

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

Die genannten Wärmemaßnahmen dienen der Vermeidung der Rißgefahr während der Schweißarbeiten. Es ist doch nicht zu erwarten, daß die verbleibenden durchschnittlichen Querspannungen kleiner sind als ohne Anwendung von zusätzlicher Wärme, eher das Gegenteil tritt ein. Zur Gegenwirkung können jedoch mechanische Maßnahmen, vor allem das Hämmern, angewendet werden.

3. Die Nachwärmungen können angewendet werden, um stark ungleichmäßige Spannungsverhältnisse innerhalb der Nahtlänge und über die Nahtdicke auszugleichen oder um die Längsspannungen der Nähte stark zu ermäßigen. Bei vorliegender äußerer Verspannung oder ähnlichen Verhältnissen (Einschweißaufgaben, z. B. Flicken) ist jedoch mit einer Ermäßigung der durchschnittlichen Querspannungen nicht zu rechnen. Ein recht günstiger Ausgleich stark ungleichmäßiger Spannungen ist durch Erwärmung bis zur beginnenden Dunkelrotglut zu erreichen². Streifenweises Nachwärmen der Nahtzonen kann bei entsprechenden Temperaturen (550—600° C) die Nahtlängsspannungen sehr stark ermäßigen³.

¹ BIERETT, G.: Welche Wege weisen die Erkenntnisse über Schrumpfwirkungen den Arbeitsverfahren für die Herstellung von Stumpfnähten im Großstahlbau. Stahlbau Bd. 9 (1936) S. 69—71.

² BIERETT, G. u. G. GRÜNING: Schrumpfspannungen in autogen geschweißten Teilen. Autogene Metallbearb. Bd. 27 (1934) S. 259—266. — Mitt. dtsch. Mat.-Prüf.-Anst., Sonderh. 25. Berlin: Julius Springer 1934.

³ EBEL u. REINHARDT: Spannungsmessungen an geschweißten Rundnähten. Autogene Metallbearb. Bd. 27 (1934) S. 305—310. — SCHMIDT, R.: Einige Bemerkungen zur Frage der Wärmnachbehandlung großer geschweißter Werkstücke. Elektroschweißg. Bd. 6 (1935) S. 231, 232.

Die vollständige Glühbehandlung geschweißter Teile, die z. B. im Hochdruckbehälterbau allgemein angewendet wird, ist bis jetzt im Stahlbau nicht gebräuchlich. Es ist zu erwarten und zu hoffen, daß sich der Stahlbau in Zukunft auch mit dieser Frage befassen wird.

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

b) Hämmern. Im Bauwesen wird vom Mittel des Hämmerns zur Verringerung der Schrumpfung und Spannungen m. W. nicht allzu häufig Gebrauch gemacht. Es muß erwähnt werden, weil in schwierigeren Fällen, z. B. bei der Herstellung dicker Gurtnähte, seine Anwendung zum Gelingen der Schweißarbeiten beitragen kann.

Das Hämmern kann entweder im rotwarmen oder im kalten Zustand vorgenommen werden. Durch das *Hämmern im kalten Zustand* werden Schrumpfungen und Spannungen — diese besonders beim Schweißen unter Verspannungen —

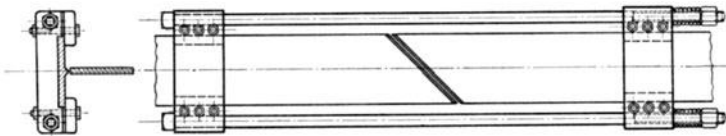


Abb. 26. Spannvorrichtung für Gurtnahtschweißung zur Unterstützung der Schrumpfung.

stark ermäßigt. Bei dicken Nähten können sich Zwischenhämmierungen einzelner Lagen zur Vermeidung von Überspannungen und Verkrümmungen empfehlen. Bei der Herstellung dicker Gurtnähte ist das Hämmern oder Stemmen mit Erfolg angewandt worden. Hierzu werden bisweilen Fugen in Nahtbreite über die ganze Länge eingestemmt. Einlagenschweißungen und auch die Decklagen von Mehrlagenschweißungen sollen wegen der Zähigkeitsverminderung nicht gehämmert werden.

Im allgemeinen besteht die Ansicht, daß das *Rotwarmhämmern* Schrumpfungen und Schrumpfspannungen nicht beeinflußt, sondern wie eine Schmiedebehandlung nur zur Verbesserung der technologischen Eigenschaften dient. Nach Angaben im Schrifttum¹ soll bei Mehrlagenschweißungen das Warmhämmern jeder Lage ein ausgezeichnetes Mittel zur Vermeidung von Schweißrissen sein. Bei starken Verspannungen soll auch ein Rotwarmhämmern der Zonen neben der Naht ein rißfreies Schweißen erleichtern.

Es muß mit großer Vorsicht gehämmert werden; zur Vermeidung von Zerstörungen sollen die untersten Lagen nicht gehämmert werden. Besonders geeignete Werkzeuge sind erforderlich.

Nicht jedes Schweißgut kann gehämmert werden. So wirkungsvoll dieses Mittel also auch sein kann, so stellt es doch besondere Anforderungen an den Werkstoff und an die Handfertigkeit des Ausführenden.

c) Sonstige Maßnahmen. Es gibt eine ganze Reihe von Möglichkeiten zur Erzielung einer möglichst unbehinderten Querschrumpfung, von denen nachstehend zwei im Trägerbau sehr häufig angewendete Hilfsmittel genannt werden.

¹ MAC CUTCHEON, E. M. u. D. M. KINGSLEY: Hämmern und seine Wirkung auf Lichtbogen-schweißungen. J. Amer. Weld. Soc. Bd. 16 (1937, Juli), Suppl. Weld. Res. Com. S. 22—28.

Bei der Herstellung dicker Gurtplattenstumpfnähte auf der Baustelle wird vielfach der Schrumpfvorgang durch Spannvorrichtungen, die die beiderseitigen Plattenenden gegeneinanderziehen, unterstützt (Abb. 26). Die zu verschweißenden Träger werden auf Rollen gelagert. Die Spannvorrichtung muß, wenn sie ihren Zweck erfüllen soll, spätestens unmittelbar nach dem Einschmelzen der Wurzellagen in Wirkung gesetzt werden. Andrückvorrichtungen erfüllen den gleichen Zweck.

Das Aufkeilen der Schweißfugen bei starken Verspannungen ist ein weiteres Mittel zum rißfreien Schweißen. Die Schweißfuge wird um das voraussichtliche Schrumpfmaß aufgekeilt. Die Keile werden nach dem Heften entfernt. Diese Maßnahme wird z. B. zur Verminderung der Verspannung beim Einschweißen von Querträgern in die Hauptträger angewandt¹.

B. Bestimmung der Schweißspannungen.

1. Zweck der Schweißspannungsbestimmung.

Durch die Schweißspannungsbestimmung soll der Einfluß der mannigfaltigen Veränderlichen auf die Spannungen bestimmt werden. Andererseits soll für wichtige Konstruktionsfälle das Schema der Schweißspannungszustände festgelegt werden. Die Kenntnisse des Einflusses der Arbeitsbedingungen ermöglicht eine zielbewußte Entwicklung günstiger Arbeitsverfahren, die Kenntnis der charakteristischen Eigenspannungsfelder eine Abschätzung der Gefahrenquellen und häufig gleichzeitig ihre Beseitigung.

Nach heutigen Erkenntnissen ist nicht mehr die Ermittlung der absoluten Größe der Spannungen als besonders wichtige Aufgabe anzusehen, sondern von wesentlich größerer Bedeutung ist die qualitative Veränderung der Spannungsfelder mit der Abänderung der Schweißbedingungen. Schweißspannungsuntersuchungen rechnerischer oder meßtechnischer Art müssen deshalb immer systematisch betrieben werden an möglichst gleichartigen Gebilden und unter gleichzeitiger Abänderung von möglichst wenigen Einflußgrößen.

Die bisher durchgeführten Untersuchungen hatten fast immer die Ermittlung der im kalten Zustand verbleibenden Restspannungen zum Ziel. Über die Ausbildung der Spannungen während des Schweißens sind nur sehr wenige Ergebnisse vorhanden². Für schwierige Schweißbedingungen werkstofflicher oder konstruktiver Art müßte der Ausbildung der Spannungen größere Beachtung gewidmet werden. Die zurückbleibenden Querverspannungen brauchen hier nicht mehr das Wesentliche für die Vermeidung der Rißgefahr erkennen zu lassen. Bei festeren Stählen weist sogar manches darauf hin, daß Arbeitsbedingungen, mit denen die Rißgefahr leichter zu umgehen ist, unter Umständen größere Querverspannungen liefern als Arbeitsbedingungen mit geringeren Verspannungen (S. 154).

2. Meßverfahren.

a) **Mechanische Meßverfahren.** Zur grundsätzlichen Klärung der Eigenspannungsverhältnisse in Schweißverbindungen sind bisher nur die mechanischen Meßverfahren verwendet worden. Sie beruhen darauf, daß durch Auslösung oder Störung des Eigenspannungszustandes durch mechanische Eingriffe Formänderungen eintreten, deren meßtechnische Erfassung eine Berechnung der Eigenspannungen auf Grund bekannter elastizitätstheoretischer Zusammenhänge oder auf Grund von Eichversuchen mit Hilfe bekannter Spannungszustände gestattet. Die Verfahren lassen sich in drei Hauptverfahren gliedern.

¹ Fußnote 2, S. 148. ² Fußnote 1, S. 161.

Das Netzlinienverfahren. Es ist das einfachste Verfahren für praktische Untersuchungen. Es kann als zerstörungsfreies und nicht zerstörungsfreies Verfahren angewendet werden.

Bei dem nicht zerstörungsfreien Verfahren werden auf die geschweißte Platte Meßstrecken in den Nahtzonen und außerhalb dieser aufgebracht, die mit geeigneten Geräten genau ausgemessen werden. In der Regel ordnet man die Meßstrecken parallel und senkrecht zur Nahtichtung an, und zwar so, daß zwei zusammengehörige Meßstrecken ein Achsenkreuz mit gemeinsamem Mittelpunkt bilden. Will man die genaue Richtung der Schweißhauptspannungen ermitteln, muß außerdem in einer dritten Richtung gemessen werden, zur Kontrolle besser in zwei weiteren Richtungen. In den Nahtzonen wird man in der Regel voraussetzen können, daß die Hauptspannungsrichtungen nicht allzu stark von der Nahtichtung bzw. deren Senkrechten abweichen, so daß man meistens mit Messungen in zwei Richtungen auskommen wird.

Die geschweißte Platte wird durch Schnitte senkrecht zur Oberfläche vollständig zerlegt. Die Spannungen σ_1 und σ_2 ergeben sich aus den ermittelten Rückfederungen ε_1 und ε_2 mit Hilfe des Elastizitätsmoduls E und der Querdehnungszahl $\mu = 1/m = 3/10$

$$\text{zu } \sigma_1 = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_1 + \mu \cdot \varepsilon_2)$$

$$\text{und } \sigma_2 = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_2 + \mu \cdot \varepsilon_1)$$

(Achtung auf Vorzeichen).

Je nach der Stetigkeit des Spannungszustandes sind die Längen der Meßstrecken zu wählen. Die kleinsten Längen sind gegeben durch die vorhandenen Meßgeräte. Sehr zweckmäßig für solche Messungen ist der von SIEBEL und PFENDER entwickelte Setzdehnungsmesser¹, dessen kleinste Meßlänge 20 mm beträgt und bei dem Formänderungen von 0,0002 mm noch geschätzt werden können (Abb. 27). Die Meßgenauigkeit kann man je nach den gegebenen Verhältnissen mit 3—10 (20) mal 0,0002 mm annehmen.

Die Ausmessung mit Mikroskopen ist viel zeitraubender. Für noch kürzere Meßstrecken als 20 mm wird man jedoch notgedrungen zu feinen Mikroskopen greifen müssen.

Für viele Aufgaben kann das Verfahren als zerstörungsfreies angewendet werden, und zwar in all den Fällen, bei denen es sich um eine Feststellung des Verspannungsgrades zwischen den Teilen einer Konstruktion handelt. Hierbei werden zwar nicht die Nahtspannungen ermittelt, jedoch ist häufig durch Feststellung der Verspannungen außerhalb der Nahtzonen schon das Wesentliche zur Beurteilung verschiedener Arbeitsverfahren zu gewinnen. Es genügt in diesem Fall meistens, die Messungen in einer Richtung anzuordnen, z. B. bei der Feststellung der Verspannungen infolge einer unter Einspannung zu schweißenden Stumpfnah: Anordnung der Meßstrecke senkrecht zur Naht in Zonen außerhalb der Schweißhitze oder bei Feststellung der Spannungen in den Stehblechen von Trägern infolge der Halsnähte: Anordnung der Meßstrecken parallel zu den Nähten. Hierbei empfiehlt es sich meistens, mit größeren Meßlängen zu arbeiten, häufig werden Meßlängen von 5 und 10 cm angewendet, unter Umständen sogar noch größere.

Das Anbohrverfahren. Das Netzlinienverfahren, angewendet für die Ermittlung der Nahtspannungen, setzt voraus, daß die Spannungsverteilung über die

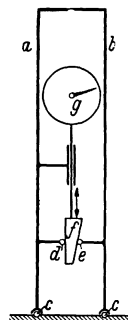


Abb. 27. Setzdehnungsmesser nach SIEBEL und PFENDER.

¹ DRP. hergestellt von der Firma Carl Mahr, Eßlingen.

Nahtdicke linear oder annähernd linear verläuft. Diese Voraussetzung wird um so weniger zutreffen, je dicker die Naht ist. Die Spannungen nach dem Netzlinienverfahren werden also eher zu klein als zu groß ausfallen.

Bessere Möglichkeiten in dieser Hinsicht bietet das Anbohrverfahren, das von J. MATHAR¹ angegeben und von F. BOLLENRATH weiterentwickelt wurde. Der letztere führt über das Verfahren folgendes aus²:

„Die um ein an der Meßstelle ausgeführtes Bohrloch infolge der Spannungsauslösung erfolgte Verformung wird mit geeigneten Geräten ausgemessen. Man ermittelt während der Bohrung in Abhängigkeit von der Bohrtiefe mit besonders ausgebildeten, auf dem Prinzip des Martens-Spiegelapparates aufgebauten Dehnungsmessern die Änderung des Durchmessers eines konzentrisch zur Bohrung angeordneten Kreises. Nach MATHAR² dient dazu ein Meßgerät, dessen Festpunkt in radialer Richtung außerhalb des gestörten Bereiches liegt.

Aus dem Wesen des Bohrverfahrens ergibt sich, daß es vor allem geeignet ist für Körper mit geringen Querabmessungen. Jedoch kann auch an dickwandigen Versuchsstücken die örtliche Spannung bestimmt werden, wenn die Spannungen mit der Tiefe sich nicht stark ändern und die Spannungen in Bohrrichtung sehr gering sind. Überhaupt können nur ebene Spannungszustände zuverlässig erfaßt werden.

Bei ebenen Spannungszuständen erfolgt die Spannungsbestimmung zweckmäßig nach den Lehren der Elastizitätstheorie für Spannungszustände in gelochten Stäben³ oder nach Eichversuchen an Zugstäben. Zweiachsige Spannungszustände mit bekannten Hauptspannungsrichtungen werden durch einfache Überlagerung zweier einachsiger Zustände erhalten. Für den einfachsten Fall geschieht dann z. B. die Errechnung der Spannungen aus der Bohrlochverformung wie folgt:

$$\xi = \left[\frac{m-1}{m} \cdot \frac{a^2}{r} + \frac{(r^2 - a^2) a^2}{4 r^3} \right] \sigma_I - \left[\frac{m-2}{2m} \cdot \frac{a^2}{r} + \frac{(r^2 - a^2) a^2}{4 r^3} \right] \sigma_{II}$$

$$\eta = \left[\frac{m-1}{m} \cdot \frac{a^2}{r} + \frac{(r^2 - a^2) a^2}{4 r^3} \right] \sigma_{II} - \left[\frac{m-2}{2m} \cdot \frac{a^2}{r} + \frac{(r^2 - a^2) a^2}{4 r^3} \right] \sigma_I$$

Hierin bedeuten: G (Schubmodul = $E \cdot \frac{1}{2(1+\mu)}$), E = Elastizitätsmodul, a = Bohrlochhalbmesser, r = Durchmesser des Kreises der Meßpunkte, ξ = Verschiebung des Meßpunktes in der X -Richtung, η = Verschiebung des Meßpunktes in der Y -Richtung, m = Querszahl, $\mu = 1/m$, σ_I = Spannung in X -Richtung, σ_{II} = Spannung in Y -Richtung. Für Stahl wird unter Annahme von $m = 10/3$, $a = 6$ mm und $r = 8$ mm:

$$\sigma_I = E \frac{1}{2(1+\mu)} (0,3215 \xi + 0,123 \eta),$$

$$\sigma_{II} = E \frac{1}{2(1+\mu)} (0,3215 \eta + 0,123 \xi).$$

Auch für den Fall, daß sich über die Tiefe die Spannungen ändern, kann mit Erfolg das Bohrlochverfahren benutzt werden.“

Gemessen wird die radiale Verschiebung von Meßpunkten auf einem Kreis von Radius $r = 8$ mm um den Bohrmittelpunkt, die 2 mm vom Bohrloch entfernt liegen, mit einem Zeigergerät von 3200facher Vergrößerung gegen zwei außerhalb

¹ MATHAR, J.: Arch. Eisenhüttenw. Bd. 6 (1932/33) S. 277—281.

² BOLLENRATH, F.: Das Verhalten von Schweißspannungen in Behältern bei innerem Überdruck. Stahl u. Eisen Bd. 57 (1937) S. 389—398, 419, 420.

³ KIRSCH, B.: Z. VDI Bd. 42 (1898) S. 797—807. — LEON, A. u. F. WILLHEIM: Z. Math. u. Physik Bd. 64 (1916) S. 233. — LEON, A. u. F. WILLHEIM: Mitt. staatl. techn. Versuchsanst., Wien Bd. 3 (1914) S. 33—50, 37—52. — TIMOSHENKO S. u. W. DIETZ: Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs. Bd. 47 (1925) S. 199—237.

des Störgebietes der Bohrung liegende Spitzen im Abstand von 15,7 cm von den Meßpunkten.

Gegen das Anbohrverfahren ist eingewendet worden, daß der unmittelbare mechanische Eingriff in die hochgespannten Nahtzonen Fließerscheinungen auslösen müsse, die die Messungen beeinträchtigen und zu hohe Spannungen ergeben¹. BOLLENRATH versucht dagegen den Beweis zu führen², daß bei diesem Verfahren nicht mit allzu wesentlichen Fehlern zu rechnen sei. Tatsächlich sind bei seiner Anwendung im allgemeinen größere Spannungen gefunden worden als mit anderen mechanischen Meßverfahren. Nach den anfänglichen Ausführungen ist nach heutigen Erkenntnissen jedoch nicht so sehr die absolute Größe der Schweißspannungen von Interesse, sondern eher die qualitativen Verhältnisse, die sich bei verschiedenen Arbeitsverfahren ergeben. Diese wird man meistens mit dem einen oder anderen Verfahren gleich gut erfassen und vergleichen können. Ein Vorteil des Anbohrverfahrens ist zweifellos die Möglichkeit der besseren Erfassung etwaiger stark wechselnder Spannungsverhältnisse in der Tiefe.

Das Ausbohrverfahren. Für die systematische, laboratoriumsmäßige Untersuchung des Einflusses bestimmter Arbeitsverfahren kommt außerdem noch das Ausbohrverfahren in Betracht. Es ist jedoch nur anwendbar für kreisrund geführte Nähte und hat deshalb besondere Bedeutung für die Flickenschweißung. Es wird hier erwähnt, weil die hiermit bisher ermittelten Ergebnisse³ allgemeine Folgerungen für die Schweißung unter Einspannung zuließen. Für die Bekämpfung der Rißgefahr durch zweckmäßigen Lagenaufbau bei schwierigen Einschweißaufgaben für St 52 und für die Auswirkungen thermischer Nachbehandlung haben derartige Untersuchungen gute Aufschlüsse ergeben.

b) Röntgenographisches Verfahren. Die Möglichkeit, elastische Spannungen auf röntgenographischem Wege zu bestimmen, ist durch die Tatsache gegeben, daß sich die bei elastischer Beanspruchung einstellenden Längenänderungen, diese bereits mikroskopisch, d. h. in diesem Falle bereits innerhalb der kleinsten elementaren Gitterbereiche nachweisen lassen. Die Meßlänge im unverspannten Zustande, d. h. in diesem Falle der Gitterabstand, ist meist mit großer Genauigkeit bekannt oder kann doch ohne wesentlichen zerstörenden Eingriff in das Werkstück bestimmt werden. Infolge der großen Empfindlichkeit der röntgenographischen Feinstrukturmeßverfahren sind Längenänderungen ebenfalls mit großer Genauigkeit meßbar. Die Größenordnung der noch nachweisbaren Längenänderungen beträgt 10^{-12} cm, d. h. es können auf diesem Wege noch Spannungen von etwa 2 kg/mm^2 (in günstigen Fällen) nachgewiesen werden.

Die Formänderungen werden mit dem Röntgenrückstrahlverfahren bestimmt. In seiner einfachsten Anwendung (nach F. WEVER) liefert das Verfahren die Summe der Hauptspannungen σ_1 und σ_2 an der Oberfläche des Werkstückes. Die Einzelwerte der Hauptspannungen sowie ihre Lage können auf diesem Wege nicht ermittelt werden.

Diese Mängel wurden durch die von R. GLOCKER und E. OSSWALD ausgearbeiteten Verbesserungen überwunden. Hiernach kann die Größe der einzelnen Hauptspannungen sowie ihre Lage ermittelt werden, bei gegebener Richtung können beliebige Spannungskomponenten gemessen werden, die nicht Haupt-

¹ BIERETT, G.: Ermittlung der Schweißspannungen. Stahl u. Eisen Bd. 55 (1935) S. 960. MESMER, G.: Fließerscheinungen beim Spannungsmeßverfahren nach J. MATHAR. Arch. Eisenhüttenw. Bd. 10 (1936/37) S. 59—63. — Elektroschweißg. Bd. 7 (1936) S. 218—220.

² BOLLENRATH, F.: Behinderte Formänderung in Schweißnähten. Stahl u. Eisen Bd. 54 (1934) S. 630—634. — Weitere Untersuchungen über Eigenspannungen in einfachen Schweißnähten. Arch. Eisenhüttenw. Bd. 9 (1935/36) S. 203—207.

³ BÜHLER, H. u. W. LOHMANN: Beitrag zur Frage der Schweißspannungen. Elektroschweißg. Bd. 5 (1934) S. 141—145, 165—170, 221—229.

spannungen zu sein brauchen; die bisher notwendige Bestimmung der Gitterkonstante im spannungsfreien Zustande kann fortfallen.

Der Vorteil des Untersuchungsverfahrens besteht darin, daß es ein zerstörungsfreies Untersuchungsverfahren ist, und daß die Spannungsverteilung in mikroskopisch kleinen Bereichen, z. B. in Kerben, untersucht werden kann. Der Nachteil des Verfahrens besteht in der geringen Eindringtiefe der Röntgenstrahlung, so daß nur die Spannungsverteilung auf der Oberfläche bestimmt werden kann.

Über die Ausführung der röntgenographischen Verfahren muß auf das einschlägige Schrifttum verwiesen werden¹. Für die systematische Verfolgung der Spannungsverhältnisse der Schweißkonstruktionen kommen diese Verfahren jedoch zur Zeit wohl noch nicht in Betracht.

3. Berechnung der Schweißspannungen.

Die Entstehung der Schweißspannungen ist an die plastischen Verformungen im Bereich hoher Temperaturen gebunden. Eine exakte Berechnung hat deshalb die Einbeziehung der unelastischen Vorgänge zur Voraussetzung. Wenn trotzdem die meisten theoretischen Arbeiten auf diesem Gebiet hauptsächlich von Voraussetzungen ausgehen, die elastischen Vorgängen entsprechen und die unelastischen nur qualitativ berücksichtigen, so hat das seine Ursache in den schwierigen, kaum erfaßbaren Vorgängen, die sich im Bereich hoher Temperaturen abspielen, und in den zeitlichen Verschiedenheiten des Erwärmungs- und Abkühlungsprozesses.

Die theoretischen Arbeiten haben deshalb nicht die Erkenntnisse liefern können, die das Experiment auf diesem Gebiet geliefert hat. Sie sind überdies wegen der mathematischen Schwierigkeiten an einfache Gebilde gebunden. Wir beschränken uns deshalb auf kurze Hinweise.

Auf elastische Voraussetzungen gründen sich die Berechnungen von MIES², NIES³, SCHRÖDER⁴, GRÜNING⁵ u. a. zur Berechnung der Schweißspannungen und der Verspannungen in einfachen Gebilden. Besonders erwähnenswert ist hierbei die Arbeit von GRÜNING, der den Einfluß der Breite der Erhitzungszone auf die verbleibenden Längs- und Querspannungen in stumpfgeschweißten Platten untersucht. Trotz der zunächst zur Erleichterung der Rechnung gemachten wenig begründeten Annahme, daß nur die Vorgänge bei der Abkühlung die Restspannungen beeinflussen und daß bei der Abkühlung in keinem Zeitpunkt die jeweilige Streckgrenze überschritten wird, führte diese Berechnung zu Ergebnissen, die durch das Experiment gut bestätigt wurden⁶.

Berechnungen der Wärmespannungen infolge örtlich erhöhter Temperaturen wurden von DEN HARTOG⁷ und GOODIER⁸ durchgeführt. Berechnungen dieser Art können für die Abschätzung und Vermeidung der Rißgefahr von Wert sein

¹ GLOCKER, R. u. E. OSSWALD: Z. techn. Phys. Bd. 16 (1935) S. 238. — GISEN, F., R. GLOCKER u. E. OSSWALD: Z. techn. Phys. Bd. 17 (1936) S. 145—155. — WEVER, F. u. H. MÖLLER: Arch. Eisenhüttenw. Bd. 5 (1931/32) S. 215—218. — Naturwiss. Bd. 22 (1934) S. 401. — WEVER, F. u. A. ROSE: Mitt. K.-Wilh.-Inst. Eisenforsch. Bd. 17 (1935) S. 33. — MÖLLER, H.: Arch. Eisenhüttenw. Bd. 8 (1934/35) S. 213—217. — MÖLLER, H. u. J. BARBERS: Mitt. K.-Wilh.-Inst. Eisenforsch. Bd. 16 (1934) S. 21; Bd. 17 (1935) S. 157. — Vgl. Stahl u. Eisen Bd. 55 (1935) S. 1117, 1118.

² MIES, O.: Schmelzschweißg. Bd. 8 (1929) S. 219—223.

³ NIES, H. W.: Schmelzschweißg. Bd. 9 (1930) S. 85—87.

⁴ SCHRÖDER: Bauingenieur 1932, S. 268.

⁵ GRÜNING, G.: Stahlbau Bd. 7 (1934) S. 110—112. — Mitt. dtsh. Mat.-Prüf.-Anst., Sonderh. 25. Berlin: Julius Springer 1934.

⁶ BIERETT, G. u. G. GRÜNING: Autogene Metallbearb. Bd. 27 (1934) S. 259—266. — Mitt. dtsh. Mat.-Prüf.-Anst., Sonderh. 25. Berlin: Julius Springer 1934.

⁷ DEN HARTOG, I. P.: J. Franklin Inst. Bd. 222 (1936) S. 149—181.

⁸ GOODIER, I. N.: Physics Bd. 7 (1936) S. 156—159.

und zur Vertiefung der Erkenntnisse über die Entwicklung der Schweißspannungen dienen. Die einzige dem Verfasser bekannt gewordene Theorie, in der auch die sehr wesentlichen, unelastischen Vorgänge berücksichtigt werden, stammt von BOULTON und LANCE MARTIN¹. In dieser werden die plastischen Vorgänge, die der Verfasser bei früheren allgemeinen Darstellungen über die wesentlichen Zusammenhänge der Schweißspannungen qualitativ in Rechnung stellte, für eine Platte mit einer Schweißung längs eines Randes, in die Berechnung einbezogen. Wenn auch die so ermittelten Ergebnisse gegenüber experimentellen Erkenntnissen nichts Neues ergaben, so ist doch in dieser Berechnung eine Grundlage für eine den wirklichen Vorgängen entsprechende theoretische Behandlung des Schweißspannungsproblems zu sehen.

4. Einige wichtige Versuchsergebnisse und Spannungsschema.

Soweit die für das Bauwesen besonders wichtigen Fälle noch nicht berührt worden sind, sollen im folgenden einige Schweißspannungsbilder und einige Untersuchungen an größeren Bauteilen erörtert werden.

Die Schema von Schweißspannungsbildern infolge von Längsnähten in verschiedener Anordnung zeigt Abb. 28. Der Fall a hat z. B. Bedeutung für die Auswirkung von Halsnähten in Gurtplatten, der Fall b für den Steg eines geschweißten T-Profiles, der Fall c für das Stegblech eines geschweißten Trägers. Die frühere Abb. 18 bestätigt durch das Ergebnis einer Untersuchung die Spannungsbilder Abbildung 28a und b.

In Abb. 29 ist versucht worden, das Schema für die praktisch häufigen Fälle sich kreuzender Nähte wiederzugeben. Diese Fälle sind bisher versuchsmäßig kaum erforscht und überlegungsmäßig schwer zu erfassen, weil man nicht etwa die Spannungszustände der einzelnen Nähte einfach superponieren kann. Fall a hat Bedeutung für Gurtplattenstöße in Trägern nach Legen der Halsnaht, Fall c für den Stegstoß des Trägers. Die Gedanken, die zu diesem Schema führten, sind an anderer Stelle entwickelt².

Von Wichtigkeit erscheinen die Verhältnisse an den Kreuzungsstellen der Nähte selbst. An den Stumpfnähten können normalerweise bei zweckentsprechender Ausführung immer hohe Druckspannungen vorausgesetzt werden. Das spätere Legen der Halsnaht wandelt jedoch diese Druckspannungen in Zugspannungen um. Das Ergebnis einer für einen geschweißten T-Querschnitt mit Stoß im Steg (Abb. 30) weist darauf hin, daß diese anfänglichen Druckspannungen sich auch nach Legen der Halsnaht noch in einer gegenüber dem Üblichen stark verminderten Zugspannung auswirken.

¹ BOULTON, N. S. u. LANCE MARTIN: Proc. Inst. mech. Engrs., Lond. Bd. 133 (1936) S. 295—339.

² BIERETT, G.: Über das Verhalten geschweißter Träger bei Dauerbeanspruchung unter besonderer Berücksichtigung der Schweißspannungen. Ber. dtsh. Aussch. Stahlbau, Ausg. B, H. 7. Berlin: Julius Springer 1937.

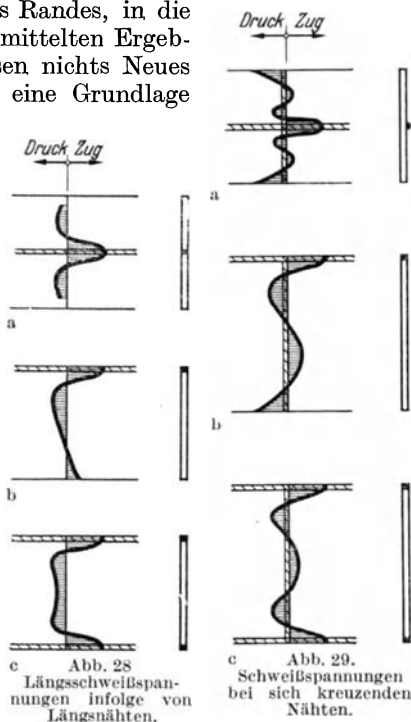


Abb. 31 zeigt die Schweißspannungen in einem 1,50 m langen, aus Wulstprofilen 600·60 und einem 30 mm dicken Steg mit Manteldrähten geschweißten Säulenstück.

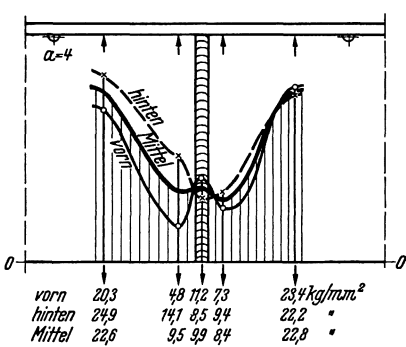


Abb. 30. Verlauf der Längsspannung in Halsnähten an der Kreuzung mit Stegblechstumpfnähten.

Das Spannungsbild für die Vorbeanspruchung der Gurte ist typisch; im Steg können je nach den Abmessungen in Länge, Steghöhe und Dicke demgegenüber Abweichungen auftreten. Bei größeren Steghöhen wird man im allgemeinen — wenn man zunächst von der Wirkung nachträglich eingeschweißter Versteifungen absieht — mit überwiegenden Druckspannungen außerhalb der Halsnastionen zu rechnen haben.

Die Spannungsverhältnisse in Nasenprofilträgern wurden eingehender von E. GEROLD und H. MÜLLER-STOCK¹ untersucht, woraus Abb. 32 entnommen ist. Das Bild entspricht etwa dem Vorhergehenden. Ein Teil

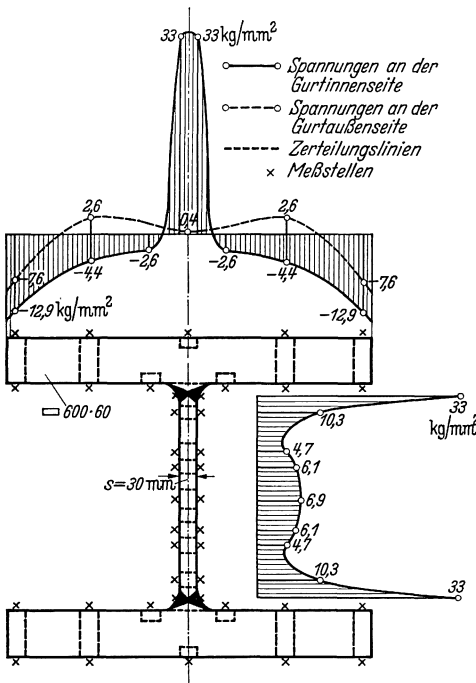


Abb. 31. Eigenspannungen (Längsspannungen) in einem geschweißten Ständer. Länge des Trägers 1,50 m, Werkstoff St 37. Manteldrahtschweißung. Messung der Spannungen durch Zerlegung. Die Meßwerte entsprechender Querschnittspunkte wurden gemittelt.

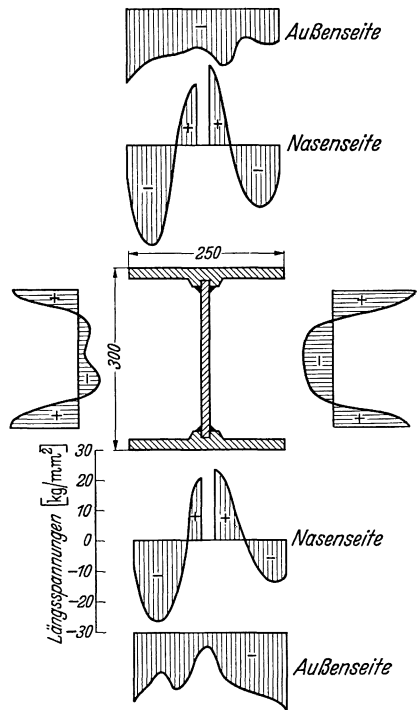


Abb. 32. Längsspannungen in einem elektrisch geschweißten Träger aus Baustahl St 52 nach E. GEROLD und H. MÜLLER-STOCK.

der Reaktionsdruckkraft wird hier von dem Stegblech übernommen, was als der normale Fall anzusehen ist. Zu beachten sind die sehr hohen Druck-

¹ GEROLD, E.: u. H. MÜLLER-STOCK: Eigenspannungen in geschweißten T-Trägern. Arch. Eisenhüttenwes. Bd. 10 (1937) S. 33—38.

darauf zu achten, daß die Querschrumpfung der Halsnähte nicht durch die Steifen behindert wird.

Bei besonders starken oder sehr eng gesetzten Aussteifungen, wie z. B. in Rahmenecken zur Aufnahme der Radialkräfte, verdient die Verfolgung der Schweißspannungen in dem betriebsmäßig von hohen Druckkräften belasteten Stegblechteil wegen der Beulgefahr besondere Aufmerksamkeit. Das Ergebnis einer solchen zerstörungsfrei durchgeführten Untersuchung zeigt Abb. 34. Die Radialspannungen aus dem Schweißprozeß in der inneren Ecke sind ungefährlich, weil sie den Betriebsbeanspruchungen entgegengerichtet sind. Den Betriebsbeanspruchungen gleichgerichtet und sehr hoch sind die tangentialen Stegblechspannungen in der inneren Ecke. Das ermittelte Spannungsbild für den Schnitt $D-C-F-H$ scheint, wie sich nach Messungen an einem weiteren, anders garteten Rahmenteil schließen läßt, typisch zu sein: hohe tangentiale Druck-Schweißspannungen und Stauchungen an dem gekrümmten Teil, dagegen kleinere Zugspannungen und -zerrungen am geraden Teil.

Die Aufstellung weiterer typischer Spannungsbilder durch Versuch, Rechnung und Überlegung erscheint mir für das Verständnis und zielbewußte Arbeiten bei der Anfertigung von Schweißplänen sehr wertvoll.

C. Schweißspannungen und Festigkeit.

1. Allgemeines.

Die Beurteilung der Schweißspannungen in Hinblick auf den Festigkeitseinfluß ist nicht einheitlich. Ob den Spannungen eine Bedeutung beizulegen ist, läßt sich nicht mit „Ja“ oder „Nein“ beantworten. Grundwerkstoff, Schweißdraht und Beanspruchungsart gestalten die Verhältnisse zu verschieden, als daß eine einheitliche Beurteilung möglich wäre.

Die folgenden, kurzen Hinweise können wegen der wenigen zur Zeit vorliegenden Versuche bei weitem keine erschöpfende Auskunft geben; sie sollen nur aufzeigen, nach welchen Gesichtspunkten die Frage zu beantworten ist, und damit gleichzeitig den Weg weisen, in welchen Fällen der Spannungsfrage besondere Aufmerksamkeit zu widmen ist.

2. Schweißspannungen und statische Festigkeit.

Ein summarisches Zusammenwirken von Schweißspannungen und Betriebsspannungen müßte schon bei geringen Betriebsbeanspruchungen vielfach zum Bruch führen. Es wäre unmöglich, Schweißkonstruktionen ohne vorherige Beseitigung der Schweißspannungen zu verwenden. Tatsächlich wirken Eigen- und Betriebsspannungen jedoch so zusammen, daß bei den normalerweise gegebenen werkstofflichen Verhältnissen der Nahtzonen die Bedingungen für den Eintritt plastischer Verformungen schon bei geringen Zusatzbelastungen vorliegen¹. Diese plastischen Verformungen bewirken eine Ermäßigung der Schweißspannungen und bei genügender Größe der Verformungen unter Umständen eine fast vollständige Beseitigung.

Die Bedingungen für das Zustandekommen der notwendigen Plastizität sind in den verschiedenen Konstruktionsformen recht verschieden. In den Nahtzonen liegt in der Regel mindestens ein zweiachsiger, in den inneren Teilen meistens

¹ BOLLENRATH, F.: Das Verhalten von Schweißspannungen in Behältern bei innerem Überdruck. Stahl u. Eisen Bd. 57 (1937) S. 389—398, 419—422.

sogar ein dreiachsiger Spannungszustand vor¹. Der Fließeintritt in diesen Teilen ist im wesentlichen gegeben durch die Spannungsdifferenz der größten und kleinsten Hauptspannung, nicht also durch die größte Hauptspannung. Wirken die Betriebsspannungen im wesentlichen so, daß die größte Hauptspannung aus dem Schweißprozeß vergrößert wird, so wird viel eher ein Fließeintritt erreicht, als wenn die Betriebsspannung die kleinste Hauptspannung im Richtungssinn der größten Hauptspannung vergrößert. In diesem Fall kann unter Umständen der Fließeintritt vollständig verhindert werden, d. h. ein verformungsloser Trennbruch ist die Folge.

Wir machen uns diese verschiedenen Bedingungen am besten an einem praktischen Beispiel klar: Die Kehlnähte eines Trägers werden im Betrieb am stärksten durch hohe Normallängsspannungen belastet, die die besonders großen Schweißlängsspannungen vergrößern und — gute werkstoffliche Eigenschaften vorausgesetzt — zu plastischen Verformungen und damit zum Spannungsabbau führen. Eine Auswirkung der Schweißspannungen auf die statische Festigkeit ist nicht zu erwarten. Bei einer querbeanspruchten Stumpfnahat dagegen, die ebenfalls hohe Nahtlängsspannungen hat, verringert eine Betriebszugspannung die Hauptspannungsdifferenz und hemmt damit den zum Spannungsabbau notwendigen Fließeintritt. Das bisweilen beobachtete spröde Aufreißen von Stumpfnähten ist so zu erklären. Den früher gegebenen Gesichtspunkten zur Verminderung der Querspannungen ist also besondere Bedeutung beizumessen.

Obwohl also eine Beurteilung der Schweißspannungen hinsichtlich des Festigkeitseinflusses nicht unabhängig von dem Konstruktionsfall erfolgen kann, kann man heute auf Grund der Erfahrungen schließen, daß die Schweißspannungen bei guten werkstofflichen Verhältnissen im allgemeinen die statische Festigkeit nicht beeinflussen. Vorausgesetzt muß aber hierbei werden, daß die Nahtzonen nicht hart und spröde sind und den notwendigen Fließeintritt nicht verhindern. Von diesem Gesichtspunkt aus müssen Drähte empfohlen werden, deren Schweißgut in der Streckgrenze nicht allzu wesentlich von der des Grundwerkstoffes abweicht.

Eine wesentlich größere Bedeutung muß dieser Frage bei festeren Stählen beigemessen werden. Hier können die Schweißspannungen stark festigkeitsmindernd wirken, wenn die mechanischen Eigenschaften der Nahtzonen den Spannungsabbau verhindern^{2,3}. Auf die Ausführungen im Abschnitt „Schweißempfindlichkeit“ wird verwiesen. Die Voraussetzungen für einen Spannungsabbau sind bei festeren Stählen und mehr oder weniger harten Übergangszonen weit weniger gegeben als bei weicheren Stählen. Maßnahmen zur Spannungsverminderung oder zur vollständigen Beseitigung durch Spannungsfreiglühung verdienen große Beachtung.

3. Schweißspannungen und Dauerfestigkeit.

Die heute vorliegenden Erkenntnisse sprechen dafür, daß für weiche Konstruktionsstähle eine größere Abminderung der Dauerfestigkeit durch die Schweißspannungen nicht eintritt. Eine Erklärung hierfür ist in der Tatsache zu erblicken, daß die Dauerfestigkeit mit anwachsender Vorspannung — und als solche sind Schweißspannungen anzusehen — stark steigt, d. h., daß die ertragene Schwingungsweite mit wachsender Vorspannung zunächst nur wenig kleiner wird. Erhöhte Festigkeitseigenschaften einerseits an örtlich besonders hoch beanspruchten Stellen und ein mehr oder weniger großer Abbau der Eigenspannungen

¹ BOLLENRATH, F.: Behinderte Formänderung in Schweißnähten. Stahl u. Eisen Bd. 54 (1934) S. 630—634.

² Fußnote 3, S. 151.

³ Fußnote 1, S. 152.

durch größere und häufige Belastungen bewirken, daß selbst sehr große Eigenspannungen praktisch bei weitem nicht so schädlich sind, wie von vornherein zu erwarten wäre.

Bei weichen Stählen und den durch die praktische Konstruktionsformen gegebenen Kerbwirkungen überwiegt meistens der Formeinfluß so stark, daß die Auswirkung der Eigenspannungen zurücktritt. Verbesserungen sind hier viel wirksamer durch bessere Konstruktionsformen, Schweißausführung und Bearbeitung der Kerbstellen zu erreichen als durch Beseitigung der Schweißspannungen. Immerhin muß auf vorliegende Feststellungen¹ hingewiesen werden, nach denen bei Flachstäben aus St 37 mit einseitiger Längsraupe eine Verbesserung der Schweißzugfestigkeit von 16,5 auf 18,2 kg/mm², bei doppelseitiger Auflage von 15,7 auf 17,5 kg/mm² (Unterspannung 1 kg/mm²) durch Beseitigung der Spannungen mittels Spannungsfreiglühens erreicht wurde. Je geringer jedoch die Kerbwirkung ist, um so geringer muß auch der Einfluß der Schweißspannungen eingesetzt werden und die Möglichkeit, durch ihre Beseitigung eine Verbesserung zu erreichen.

*Schweißspannungen werden sich also — wenn überhaupt — besonders an Stellen auswirken, die durch Kerbwirkung gefährdet sind*², weil hier die zum Spannungsabbau notwendige plastische Verformung nicht oder nur unvollkommen eintreten

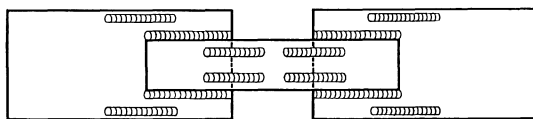


Abb. 35.

kann. *Dies gilt besonders für festere Stähle*, in denen mit härteren und deshalb besonders kerbempfindlichen Übergangszonen zu rechnen ist. Es fehlen zwar noch Untersuchungen über den Schweißspannungseinfluß für diese Stähle. Es ist aber vorauszusehen, daß den *Eigenspannungen bzw. ihrer Verminderung oder Beseitigung für St 52 eine weit größere Bedeutung beizumessen ist als für St 37*.

Ein günstiger Einfluß kann angenommen werden, wenn die Eigenspannungen den Betriebsspannungen entgegengerichtet sind. Besonders Kerbstellen, bei denen die Schweißspannungen oder auch künstlich aufgetragene Eigenspannungen² den Betriebsspannungen entgegenwirken, haben eine größere Dauerfestigkeit als bei ungünstig angeordneten oder fehlenden Eigenspannungen. Für Flankenkehlnahtanschlüsse, die bekanntlich eine mangelhafte Dauerfestigkeit aufweisen, konnte durch Veränderung des Schweißspannungsfeldes an den gefährdeten Nahtenden-Querschnitten durch Aufschweißen von zusätzlichen Raupe gemäß Abb. 35 eine sehr starke Erhöhung der Dauerfestigkeit erreicht werden³.

Besonders günstig sind die Schweißspannungsfelder, bei denen von vornherein an den betrieblich am ungünstigsten beanspruchten Stellen hohe Eigenspannungen entgegengesetzt zu den Betriebsspannungen auftreten. Ordnen diese sich so an, daß durch die entgegengesetzte Richtung von Schweißspannungen und Betriebsbeanspruchungen ein Abbau der Spannungen nicht eintreten kann, so ist das

¹ THUM, A., F. KAUFMANN u. K. SCHÖNROCK: Zugschwellfestigkeitsuntersuchungen an Proben mit aufgelegten Schweißraupen und angeschweißten Laschenverbindungen. Arch. Eisenhüttenw. Bd. 10 (1937) S. 469—476.

² THUM, A. u. A. ERKER: Einfluß von Wärmespannungen auf die Dauerfestigkeit. Z. VDI Bd. 81 (1937) S. 276—278. — Dauerbiegefestigkeit von Kehl- mit Stumpfnahverbindungen. Z. VDI. Bd. 82 (1938) S. 1101—1106.

³ Fußnote 1, DRP. 648791.

Schweißspannungsfeld mehr oder weniger stabil für die Lebenszeit des Bauteils. Die Festigkeitserhöhende und sichernde Wirkung von hohen Druckvorspannungen aus dem Schweißprozeß, z. B. an den Nahtenden von Stumpfnähten bei Zugbeanspruchung aus Biegung oder zusätzlichen Nebenspannungswirkungen ist durch Versuche mit geschweißten T-Profilen mit Stegstumpfstoß erwiesen¹. Eine bewußte Ausnutzung der Möglichkeiten durch den Konstrukteur kann also durchaus als wirksames Mittel zur Verbesserung geschweißter Konstruktionen angesehen werden.

4. Schweißspannungen und Knickfestigkeit.


Zu beachten sind hierbei im allgemeinen nicht die Nahtspannungen, sondern vorwiegend die Reaktionsdruckspannungen zu den Nahtzugspannungen. Die Anzahl vorliegender Versuche ist gering, die Beurteilungsmöglichkeit entsprechend nur beschränkt.


Besonders hohe Druckspannungen, die jedoch örtlich nur auf beschränktem Raum wirken, treten nach den früheren Darlegungen an den Stumpfnahenden senkrecht zur Naht auf. Bei Stumpfstößen von Profilen muß auch praktisch mit dem Auftreten hoher Druckspannungen an diesen Stellen gerechnet werden.

Knickversuche mit I P 20 von 3 m Länge, $\lambda = 59$, $\lambda_K = 66$ (zwischen den Schneiden der Druckpresse gerechnet), von denen ein Teil ungestoßen und ein Teil mit Universalstumpfstoß in Stabmitte geprüft wurden, führten zu folgendem Ergebnis²: „Die Tragfähigkeit von durch Schweißung stumpfgestopfenen Stäben, bei denen an den Nahtenden in den Flanschen große Schrumpfdruckspannungen von der Größe der Quetschgrenze auftreten, wird durch diese bei zentrischer und exzentrischer Belastung gegenüber der Tragfähigkeit des ungestoßenen, gewalzten Profils nicht merklich herabgesetzt.“

Möglicherweise war die Knickfestigkeit des ungestoßenen Walzprofils bei zentrischem Druck bereits durch die vorhandenen Walzspannungen um 300 bis 400 kg/cm² herabgesetzt; die viel größeren aber nur auf kleinerem Raum wirkenden Nahtspannungen haben jedoch keine weitere Abminderung gebracht.

Praktisch größere Bedeutung hat die Frage nach dem Einfluß größerer Reaktionsdruckspannungen an den Kanten geschweißter T- oder ähnlicher Profile, die im Gegensatz zu dem vorstehenden Fall über die ganze Stablänge wirken.

Mit geschweißten I-Stäben der verstärkten Elbebrücke bei Dömitz wurden für die Deutsche Reichsbahn Knickversuche durchgeführt. Das Stegblech war ausgespart³. Im ausgesparten Teil hatte die Gurtung der Diagonalen  förmigen Querschnitt. Die Schweißspannungsverhältnisse gehen aus Abb. 18, rechter Querschnitt hervor. Über die ganze Stablänge wirkten demnach längs der Kanten Schweißdruckspannungen in der Größenordnung von 1000 kg/cm². Obwohl die dem Bauwerk entnommenen Stäbe an den Enden nicht so ausgebildet waren, daß eine gute zentrische Kraftverteilung im Versuch erreicht werden konnte, wurden Knickfestigkeiten von 85—90% der Fließgrenze erreicht.

Über Vergleichsversuche mit großen genieteteten und teilweise durch Schweißung verstärkten Stützen von H-Querschnitt, zusammengesetzt aus -Profilen mit Steg, berichten WILSON und BROWN⁴. Die Verstärkung wurde durch Aufschweißen von Breitflachstählen vorgenommen. Mit dem Auftreten von Schweiß-

¹ Fußnote 2, S. 161.

² BIERETT, G. u. G. GRÜNING: Einfluß von Schrumpfdruckspannungen auf die Knickfestigkeit. Ber. dtsh. Aussch. Stahlbau, Ausg. B, H. 6. Berlin: Julius Springer 1936.

³ Elektroschweißg. Bd. 8 (1937) S. 143, Abb. 14.

⁴ WILSON, W. M. u. R. L. BROWN: Univ. Illinois Engg. Exc. Stat. Bull. 280, Vol. 33 (1935) Nr. 13.

druckspannungen über die ganze Länge, teilweise auch in ungünstiger Anordnung im Querschnitt muß gerechnet werden. Die genieteten wie auch die verstärkten Stützen erreichten Knickspannungen von 95—101% der Fließgrenze.

Nach den vorliegenden Ergebnissen steht wohl fest, daß *Druckspannungen aus dem Schweißprozeß in Druckstäben zumindestens keinen größeren Einfluß auf die Knickfestigkeit haben als Walzspannungen*, mit denen ohnehin immer zu rechnen ist.

Nicht geklärt ist der Einfluß von Schweißspannungen auf die Beulfestigkeit von dünnen Platten. Schon beim Schweißen können in Auswirkung der Spannungen Ausbeulungen eintreten, so daß nicht von der Hand zu weisen ist, daß — wenn dies noch nicht beim Schweißen eintritt — diese zusätzlichen Beanspruchungen zu einem vorzeitigen Knicken führen. Untersuchungen hierüber wären von Wert. Etwaige Gefahrenmomente ließen sich durch eine zweckmäßige Schweißfolge, auf die für einen solchen Fall in Abb. 33 eingegangen wurde, wahrscheinlich leicht umgehen.

Für dicke Bleche geben auch hohe und ungünstig angeordnete Schweißdruckspannungen anscheinend keinen Grund zu Bedenken. Ein Druckversuch mit einer großen Rahmenecke, für die die Schweißspannungen in Abb. 34 dargestellt sind, führte trotz ungünstiger Spannungsanordnung zu einem sehr günstigen Ergebnis¹.

Im ganzen gesehen ist aus den bis jetzt vorliegenden Untersuchungen nicht zu entnehmen, daß die Stabilität der Bauteile durch Schweißspannungen merklich abgemindert wird; auch sind dem Verfasser keine ungünstigen Erscheinungen dieser Art aus der Praxis bekannt geworden.

¹ Fußnote 3, S. 147.

Die Prüfung von Schweißverbindungen.

Prof. Dr.-Ing. habil. A. MATTING, Hannover.

Die Sicherheit geschweißter Bauwerke ist in besonders hohem Maße von der Geschicklichkeit und Zuverlässigkeit der Ausführenden abhängig. In dieser Beziehung unterscheidet sich die Schweißtechnik von vielen anderen Fertigungsverfahren. Neben dem handwerklichen Können des Schweißers spielt auch die Auswahl des Schweißverfahrens und die Wahl des Zusatzstoffes eine ausschlaggebende Rolle. Die gleiche Schweißnaht kann in Abhängigkeit von der Ausführung sehr unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, auch sind die Leistungen desselben Schweißers keineswegs gleichbleibend.

Hieraus geht hervor, daß neben sorgfältiger Überwachung der Schweißarbeiten der Prüfung der Schweißnähte besondere Bedeutung zukommt. Die stürmische Entwicklung der Schweißtechnik im letzten Jahrzehnt war nur möglich, weil gleichlaufend eine ständige Verbesserung der verschiedenen Prüfverfahren gelang.

Der Zweck¹ jeder Prüfung ist, festzustellen, wie sich die Schweißverbindung bei der beabsichtigten betriebsmäßigen Verwendung voraussichtlich verhalten wird, ob sie den Beanspruchungen der Praxis, die an sie gestellt werden sollen, entsprechen wird. Der Grund² der Prüfung kann ein sehr verschiedener sein:

1. Überwachung der Leistung der Schweißer (Arbeitsprüfung).
2. Nachweis vorgeschriebener oder gewährleisteter Eigenschaften der Schweißverbindung (Abnahmeprüfung).
3. Prüfung des Schweißverfahrens auf seine Eignung und zwecks Weiterentwicklung (Verfahrensprüfung).
4. Prüfung der Werkstoffe und Zusatzstoffe auf ihre Eignung (Werkstoff- und Schweißdrahtprüfung).

Die gebräuchlichen Prüfverfahren können in 2 große Gruppen eingeteilt werden:

A. Mittelbare Prüfverfahren mit Zerstörung der Schweißnaht.

Die Probestücke werden zerstörend geprüft, aus ihrem Verhalten wird auf die unter gleichen Verhältnissen hergestellten Schweißnähte geschlossen.

B. Unmittelbare Prüfverfahren ohne Zerstörung der Schweißnaht.

Die Naht wird zerstörungsfrei geprüft, bevor sie dem Betriebe übergeben wird.

Zwischen beide Gruppen schieben sich noch einige Übergangsverfahren mit einer teilweisen Zerstörung oder Schwächung der Naht, die jedoch wieder beseitigt werden kann.

Ganz allgemein und im besonderen bei den zerstörenden Prüfverfahren müssen grundsätzlich zwei verschiedene Fälle unterschieden werden:

I. Die Schweißverbindung wird geprüft. Schweißnaht, Übergang und Grundwerkstoff werden den gleichen Prüfbedingungen unterworfen, um ein Urteil über

¹ DAEVES, K.: Elektroschweißg. Bd. 6 (1935) H. 9, S. 172.,

² FIEK, G.: Elektroschweißg. Bd. 5 (1934) H. 4, S. 67.

ihr Verhalten als Verbindungselement zu gewinnen. Hierzu gehören Abnahmeprüfung, Verfahrensprüfung und meistens auch die Arbeitsprüfung.

II. Die Schweißnaht wird geprüft, d. h. derjenige Teil der Schweißverbindung, der beim Schweißen aus verflüssigtem Zusatzstoff entstand. Hierzu gehört eindeutig die Schweißdrahtprüfung.

I. Mittelbare Prüfverfahren mit Zerstörung der Schweißnaht.

A. Der Zugversuch.

Der für den homogenen Baustoff nach DIN 1605 genormte Zugversuch wird verwickelt, wenn es sich um die Prüfung von Schweißverbindungen mit ihrem verschiedenartigen Aufbau aus Schweiße, Übergang und Grundwerkstoff handelt. Hierbei tritt der Unterschied zwischen

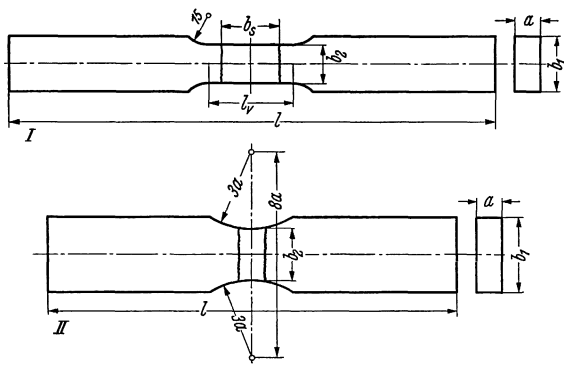


Abb. 1.

I Zerreistab zur Prüfung der Schweißverbindung.
II Zerreistab zur Prüfung der Schweißnaht.

der Prüfung der Schweißverbindung und des Schweißgutes besonders augenfällig in Erscheinung. Für beide Prüfarten sind die Bedingungen in der DIN-Vornorm-DVM-Prüfverfahren A 120 festgelegt. Zur Ermittlung der Zugfestigkeit dienen die beiden in Abb. 1 wiedergegebenen Probeabformen. Die Schweißwulst wird bei Stab I abgearbeitet, alle Zonen werden gleichmäßig beansprucht. Der Stab bricht an der geringstwertigen Stelle und ergibt die Zugfestigkeit der Verbindung.

Eine Dehnungsmessung ist nicht vorgesehen. Durch Anbringen und Ausmessen einer Teilung kann aber der Dehnungsverlauf über die Meßlänge ermittelt werden. Die Angabe eines einzigen Zahlenwertes als Bruchdehnung der Verbindung empfiehlt sich nicht. Bedingt durch stets veränderliche Verhältnisse (Breite der Schweiße, Lage des Bruches, Verformungsfähigkeit der Schweiße gegenüber dem Baustoff usw.) treten starke Streuungen auf, die einen Vergleich erschweren oder unmöglich machen. Ebenfalls unsicher ist die Bestimmung der Streckgrenze. Da Streckgrenze und Verfestigungsfähigkeit von Schweiße und Baustoff meistens verschieden sind und sich wechselseitig beeinflussen, ergibt sich im allgemeinen kein eindeutiger Wert. Die besonderen Verhältnisse in den Übergängen erschweren die Bestimmung weiterhin.

Beim Stab II tritt — abgesehen von Ausnahmen — der Bruch in der Schweißnaht ein und läßt so ihre Festigkeit erkennen. Ein Nachteil ist die scheinbare Erhöhung der Festigkeit infolge der Kerbwirkung der Aushalsung gegenüber dem Stab mit gleichbleibendem Querschnitt¹. Diese Erhöhung kann bis zu 20% betragen und ist nicht gesetzmäßig zu erfassen, da sie vom Baustoff, Zusatzstoff, Schweißverfahren und den einzelnen Schweißbedingungen abhängig ist². Der Nachteil wird bewußt in Kauf genommen. An dieser Stabform kann nur die Zugfestigkeit festgestellt werden.

¹ GRNING, G. u. W. HOFFMANN: Elektroschweißg. Bd. 7 (1936) H. 2, S. 26.

² MATTING, A. u. H. KOCH: Elektroschweißg Bd. 5 (1934) H. 7, S. 127.

Zur Prüfung der reinen Schweiße (Zugfestigkeit, Streckgrenze, Bruchdehnung und Einschnürung) wird aus dem Schweißgut ein Rundstab nach DIN 1605 herausgearbeitet und wie ein Baustoffstab geprüft.

Zur Bestimmung der Zugfestigkeit der Schweißverbindung gibt es noch andere Probefestabformen. Zum Beispiel nach DIN 4100, § 6, sind für die Prüfung der Schweißer Kreuz- und Stumpfpfropfen vorgeschrieben worden¹ (s. S. 101).

Aus den praktischen Bedürfnissen heraus sind Sonderprobefestabformen entstanden, wie Flankennahtschweißungen, Lochschweißungen, Schrägnahtproben usw. Es sind reine technologische ZerreiBversuche, die dem jeweiligen Zwecke angepaßt sind.

Der normale Zugversuch nach DIN-Vornorm A 120 kann auch als WarmzerreiBversuch bei höheren Temperaturen durchgeführt werden. Besondere Formen sind für die Nichteisenmetalle entwickelt worden, bzw. in Aussicht genommen².

B. Die Verformungsprüfung.

Noch schwieriger als bei der Ermittlung der ZerreiBfestigkeit liegen die Verhältnisse bei der Prüfung der Verformungsfähigkeit von Schweißverbindungen.

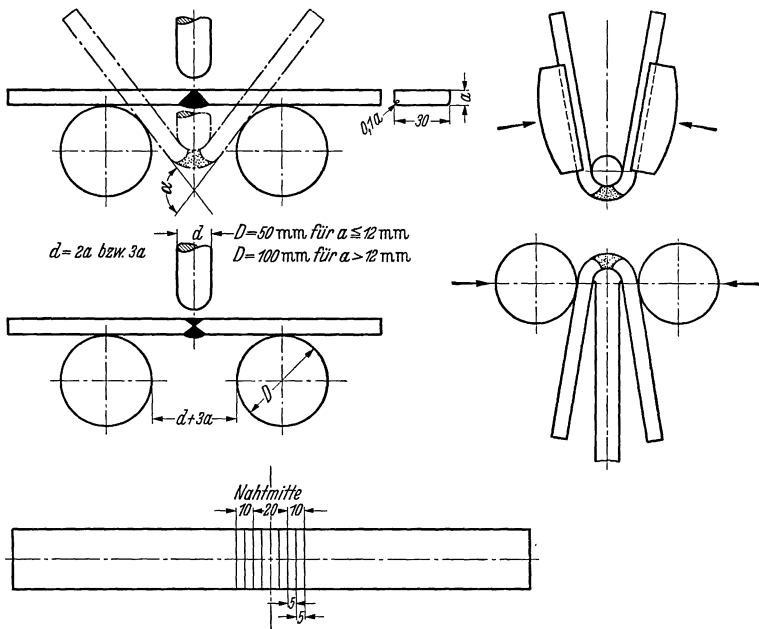


Abb. 2. Anordnung zum Faltversuch nach DVM-Prüfverfahren A 121.

Da die Bestimmung von Bruchdehnung und Einschnürung unsicher ist, war es nötig, eine besondere Versuchsanordnung, den Faltversuch, zur Verformungsmessung zu entwickeln. Die Einzelheiten sind in DIN-Vornorm DVM-Prüfverfahren A 121 festgelegt worden.

Der Faltversuch wird mit einer Biegevorrichtung nach Abb. 2 ausgeführt. Die Abmessungen müssen genau eingehalten werden, da ihre Abänderung das Ergebnis beeinflusst³. Als Maß der Verformungsfähigkeit wird der bis zum ersten

¹ KOCH, H.: Elektroschweißg. Bd. 8 (1937) H. 6, S. 111.

² MATTING, A. u. H. KLEIN: Autogene Metallbearbeitung Bd. 31 (1938) H. 13, S. 205.

³ FIEK, G. u. A. MATTING: Autogene Metallbearb. Bd. 27 (1934) H. 8, S. 115. — Mitt. dtsh. Mat.-Prüf-Anst. 1934, H. 25, S. 39.

Anriß bei ausgespannter Probe erreichte Biegewinkel α angesehen. Die Wurzel der V-Naht liegt im Regelfalle auf der Druckseite der Probe. Die Probe wird hier geebnet, damit der Dorn gut aufsitzen kann. Mit belassener Schweißwulst dient die Probe zur Arbeitsprüfung, mit abgearbeiteter zur Werkstoffprüfung. Die Probenherstellung ist einfach und billig; der Versuch gibt einen angenäherten und werkstattmäßig genügend genauen Aufschluß über die Verformungsfähigkeit stumpfgeschweißter Verbindungen.

Der Faltversuch ist als Muster einer Prüfung anzusehen, die einen ausgezeichneten technologischen Befund ergibt, — Bindefehler, Schlackeneinschlüsse, Poren usw. sind im Bruch sehr gut nachzuweisen —, deren wissenschaftlicher Wert dagegen wegen der Unsicherheit der zahlenmäßigen Auswertung auf Grund des Streucharacters gering ist. Für hochwertige Schweißungen hat er sich außerdem als nicht genügend aufschlußreich erwiesen¹.

In Sonderfällen kann die Biegedehnung der äußersten Zugfaser bestimmt werden. Die Genauigkeit des Ausmessens ist geringer. Es kann die Biegedehnung der Schweißung wie auch die Gesamtdehnung von Schweißnaht und Übergangszone zum Grundwerkstoff gemessen werden².

Der Faltversuch kann ferner als Warmbiegeversuch und Abschreckbiegeversuch durchgeführt werden. Auch läßt sich die Lage der Probe in der Prüfvorrichtung beliebig ändern.

Die untere Grenze der Blechdicke beträgt 5 mm für den genormten Faltversuch; für dünnere Bleche ist eine andere Prüfverordnung in Aussicht genommen.

Um den grundsätzlichen Nachteil des Faltversuches nach A 121, das veränderliche Biegemoment über die Prüflänge, zu vermeiden, sind Freibiegevorrichtungen entwickelt worden, die den Probekörper durch ein über die Prüflänge konstantes Moment beanspruchen sollen³. Eine endgültige Bewertung dieser Vorrichtungen ist noch nicht möglich⁴.

In den Vorschriften anderer Länder ist der Faltversuch starken Abwandlungen unterworfen worden^{5, 6}.

Sehr beachtenswert ist der Vorschlag, einen Zerreißstab (Reckstab) in Längsrichtung der Schweißnaht herauszuarbeiten, so daß die einzelnen Zonen (Schweißung, Übergang, Baustoff) nicht hintereinander, sondern nebeneinander angeordnet sind. Schweißung und Baustoff werden hierbei zu gleichen Längenänderungen gezwungen. Ausgemessen wird, bei wieviel Prozent Dehnung des Werkstoffes das Dehnungsvermögen der Schweißung erschöpft ist^{7, 8}. Gegen den Reckversuch spricht die im Verhältnis zum Faltversuch wesentlich kostspieligere Probenherstellung.

Ein neuerer Vorschlag⁹ geht dahin, die Verformung von Schweißungen an der Kreuzstabprobe zu ermitteln. Gemessen wird die bis zum Bruch eintretende Entfernungszunahme zwischen Längs- und Querstab, die als Maß der Verformungsfähigkeit der Schweißverbindung anzusehen ist. Es wird keine Dehnung in Prozent, sondern eine Verlängerung in Millimeter angegeben. Die Eignung dieses Verfahrens muß erst durch Versuche nachgewiesen werden.

¹ MATTING, A. u. H. OTTE: Autogene Metallbearb. Bd. 29 (1936) H. 19, S. 289.

² RÖTSCHER u. QUADFLIEG: Arcos Bd. 11 (1934) H. 63, S. 1113.

³ BLOCK u. ELLINGHAUS: Elektroschweißg. Bd. 4 (1933) H. 7, S. 126.

⁴ MAILÄNDER, R. u. W. RUTTMANN: Techn. Mitt. Krupp. Bd. 4 (1936) H. 6, S. 155. — Elektroschweißg Bd. 8 (1937) H. 2, S. 36.

⁵ RAUSCH: Stahlbau Bd. 7 (1934) H. 3, S. 20.

⁶ KLÖPPEL: Stahlbau Bd. 8 (1935) H. 1, S. 6.

⁷ MATTING, A.: Elektroschweißg. Bd. 7 (1936) H. 3, S. 53.

⁸ ZEYEN, K. L.: Elektroschweißg. Bd. 10 (1939) H. 2, S. 21 u. H. 4, S. 67.

⁹ BLOMBERG: Elektroschweißg. Bd. 6 (1935) H. 4, S. 61.

C. Der Kerbschlagversuch.

Der Kerbschlagversuch (Abb. 3) wird im Stahlbau nur zur Elektrodenprüfung nach DIN 1913 dann herangezogen, wenn es sich um die Herstellung hochbeanspruchbarer Schweißverbindungen handelt. Diese Untersuchung ist als Abnahmeprüfung der betriebsmäßigen Verwendung der Zusatzstoffe vorgeschaltet.

Die Kerbschlagzähigkeit kennzeichnet den Gefügebau. Sie stellt die auf den Querschnitt am Kerbgrund bezogene Schlagarbeit dar und wird in mkg/cm^2 ausgedrückt. Von großem Einfluß auf das Versuchsergebnis sind die äußeren Versuchsbedingungen¹. Besonders die Form der Kerbe und der Kerbradius wirken sich hierbei stark aus.

Die Probeformen und die Versuchsausführung sind in DIN - Vornorm DVM-Prüfverfahren A 122 festgelegt. In der Regel wird die DVM-Normprobe verwendet, die quer zur Schweißnaht entnommen wird (Abb. 3 a).

Bei dickeren Werkstücken kann auch die VGB-Probe (Abmessungen: $15 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$, Kerb von 15 mm Tiefe und 4 mm Durchmesser am Kerbgrund) herangezogen werden (Abb. 4). Die Probe kann bis hinunter zu 25 mm Probendicke angewandt werden, wenn die Kerbtiefe entsprechend verringert wird. Zur Prüfung des Überganges wird

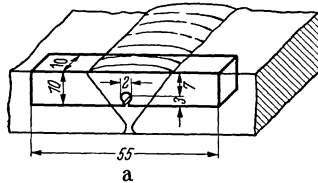


Abb. 3. Kerbschlagprobe DVM-Normprobe.

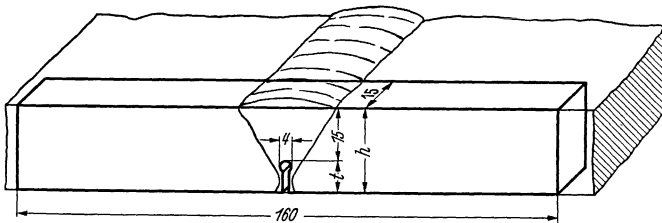
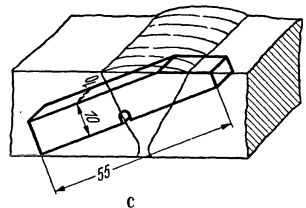
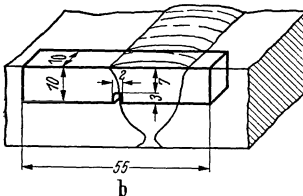


Abb. 4. Kerbschlagprobe — VGB-Probe.

der Kerb nach Anätzung in die Bindefläche hineingeschnitten, wobei die Probe schräg in den Blechquerschnitt gelegt werden kann (Abb. 3 c).

Die Proben sind allseitig zu bearbeiten. Enthält die Bruchfläche größere Fehlstellen, so ist die Probe auszuschneiden. Der Versuch soll bei einer Temperatur von 20° ausgeführt werden. Er wird mit einem normalen Pendelschlagwerk von genügender Schlagleistung vorgenommen.

Eine Beziehung zwischen der so gewonnenen Kerbschlagzähigkeit und der Kerbempfindlichkeit bei Dauerfestigkeitsprüfungen besteht nach den bisherigen Versuchen nicht². Auch die verschiedenen Probeformen ergeben ausgeprägte Unterschiede. Proben verschiedener Abmessungen können nicht miteinander verglichen werden. Mit zunehmendem Kerbradius nimmt die Schlagarbeit zu, da dem Bruch eine größere Verformung vorausgeht. Bei relativ großer Verformung

¹ BARDKE, P. u. A. MATTING: Autogene Metallbearb. Bd. 26 (1933) H. 18, S. 279; H. 19, S. 290.

² Stahl u. Eisen Bd. 55 (1935) H. 36, S. 953.

tritt ein Verformungsbruch ein, im umgekehrten Falle ein Trennungsbruch. Beide Arten unterscheiden sich deutlich im Bruchaussehen. Ein typischer Trennungsbruch zeigt ein kristallin glänzendes Gefüge. Das Gefüge eines Verformungsbruches sieht matter und sehniger aus.

Eine Abart des Kerbschlagversuches ist der Schlagzerreiversuch¹.

D. Die Dauerprüfung.

Dauerversuche sind solche Versuche, bei denen die Belastung des Probe­stückes dauernd zwischen zwei Belastungsgrenzen schwingt. Festgestellt soll die obere Belastungsgrenze werden, deren Wirkung von der Probe auch bei mehrmillionenfacher Wiederholung ausgehalten wird. Durch die Versuche werden die im praktischen Betriebe auftretenden Beanspruchungen im Gegensatz zu den statischen Versuchen besser nachgeahmt. Der Prüfung der Dauerfestigkeit wurde in den letzten Jahren erhöhte Aufmerksamkeit zugewendet². Die Ergebnisse befriedigten zumeist. Gerade hierdurch ist das Vertrauen zur Schweißtechnik erheblich gefördert worden.

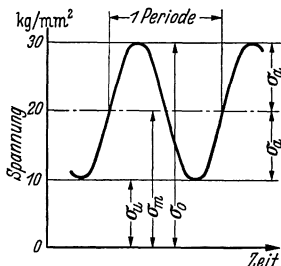


Abb. 5. Grundbegriffe für die Dauerfestigkeitsprfung.

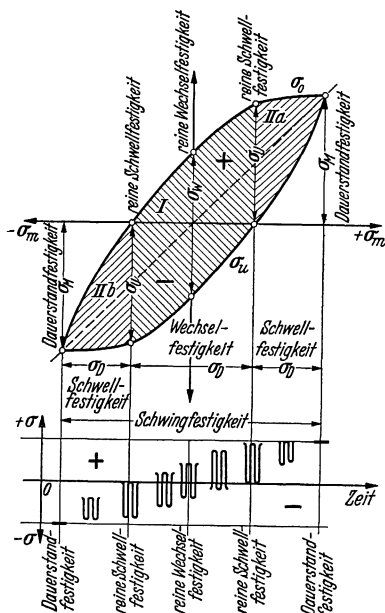


Abb. 6. Darstellung der Schwingbeanspruchungen.

Die Grundbegriffe für die Dauerfestigkeitsprfung sind in DIN-Vornorm DVM-Prüfverfahren 4001 festgelegt worden, an die sich die folgenden Ausführungen anlehnen:

Nach Abb. 5 werden unterschieden:

Oberspannung σ_o

Unterspannung σ_u

$$\text{Mittelspannung } \sigma_m = \frac{\sigma_o + \sigma_u}{2}$$

$$\text{Der Spannungsaus­schlag ist } \sigma_a = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{2}.$$

Je nach der Lage der Belastungsgrenzen zu Null unterscheidet man, wie Abb. 6 verdeutlicht:

a) **Wechselbeanspruchungen**, bei denen dauernd ein Kraftrichtungswechsel eintritt (Fläche I der Abbildung), bei denen also σ_o positiv und σ_u negativ ist. —

¹ KRBER u. SACK: Mitt. K.-Wilh.-Inst. Eisenforschg. Bd. 4 (1922) S. 11.

² Vorläufige Vorschriften für geschweißte, vollwandige Eisenbahnbrücken der Deutschen Reichsbahn.

Wenn σ_o und σ_u symmetrisch zu Null liegen ($\sigma_o = -\sigma_u$), so liegt der Sonderfall der *reinen Wechselbeanspruchung* σ_w vor.

b) Schwellbeanspruchungen, bei denen nur ein dauerndes An- und Abswellen der Spannung, entweder im positiven (Fläche IIa) oder im negativen Kraftbereich (Fläche IIb), aber kein Krafttrichtungswechsel von + nach — stattfindet. — Die *reine Schwellbeanspruchung* σ_u ist der Sonderfall, bei dem die eine Spannungsgrenze σ_u oder σ_o gleich Null ist. Die Schwingung vollzieht sich zwischen Null und einem positiven oder negativen Höchstwert (Ordinaten zwischen Fläche I und IIa oder IIb). Die reine Schwellfestigkeit entspricht der früheren Ursprungsfestigkeit.

Sämtliche Beanspruchungen werden als Schwingungsbeanspruchung (Schwingungsfestigkeit) bezeichnet. Die beiden Grenzwerte rechts und links bezeichnen die Dauerstandfestigkeit ($\sigma_o = \sigma_u$; $\sigma_a = 0$). Sie ist die Grenzzugbelastung (bzw. Druckbelastung), unter der ein anfängliches Dehnen des Werkstoffes im Laufe der Zeit noch zum Stillstand kommt, bei deren Überschreitung aber mit einem dauernden Dehnen bis zum Bruch zu rechnen ist.

Die Dauerfestigkeitsprüfungen sollen an mehreren gleichartigen Proben angestellt werden, von denen jede einer gleichbleibenden Dauerbelastung unterworfen wird. Stufenweises Steigern der Belastung an der gleichen Probe ergibt abweichende Werte. Die kleinste Ordinate der Beanspruchung—Lebensdauerlinie (Wöhlerlinie) stellt die Schwingfestigkeit dar. Sie wird bei Stahl im allgemeinen auf $2 \cdot 10^6$ Lastperioden bezogen, weil darüber ein weiteres Absinken in der Regel nicht festzustellen ist.

Den verschiedenen Zeichen für Spannung und Festigkeit werden folgende Zeiger zur Kennzeichnung der Beanspruchungsart angehängt:

z für Zug/Druck, b für Biegung.

Für Schubbeanspruchungen (z. B. Verdrehen) wird σ durch τ ersetzt.

Alle Einzelheiten der Versuchsanordnung und Durchführung, z. B. Stabform, Prüfmaschine, Belastungsanordnung, Spannungsermittlung, Periodenzahl, Oberflächenbeschaffenheit, Korrosion usw. sind im Versuchsbericht genau anzugeben.

Die Probestabformen sind nicht endgültig festgelegt, sondern werden dem jeweiligen Zweck entsprechend ausgebildet. Das Ergebnis wird hierdurch oft entscheidend beeinflußt.

Gute Dauerfestigkeitswerte sind ein Kennzeichen fehlerfreier Schweißnähte, wobei sich ein allmählicher Übergang zwischen Werkstoff und Zusatzstoff besonders günstig auswirkt¹. Durch schweißgerechte Ausführung² und sorgfältige Arbeitsweise werden heute vorzeitige Dauerbrüche vermieden. Auch Unterschiede in den Eigenschaften der Schweißnähte können durch geeignete konstruktive Formgebung ausgeglichen werden. Die Zahl der Untersuchungen über Dauerfestigkeit geschweißter Verbindungen ist in den letzten Jahren stark angewachsen^{3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10}. „Neuartig ist die Einführung des Begriffes „Zeitfestigkeit“ oder „Belastungsgrenze“ zur Prüfung von Schweißverbindungen^{11, 12}.

¹ MATTING, A. u. G. OLDENBURG: Elektroschweißg Bd. 7 (1936) H. 6, S. 108.

² KOMMERELL, O.: Erläuterungen zu den Vorschriften für geschweißte Stahlbauten. Teil II: Vollwandige Eisenbahnbrücken. Berlin: Wilh. Ernst & Sohn 1936.

³ GRAF, O.: Stahlbau Bd. 9 (1936) H. 9, S. 71.

⁴ GRAF, O.: Autogene Metallbearb. Bd. 29 (1936) H. 4, S. 49.

⁵ HILPERT, A. u. O. BONDY: Techn. Zbl. prakt. Metallbearb. Bd. 46 (1936) H. 21/22, S. 796.

⁶ GEHLER: Geschw. Träger Bd. 1 (1934) H. 2, S. 3.

⁷ GRAF, O.: Stahlbau Bd. 8 (1935) H. 21, S. 164.

⁸ BIERETT, G.: Über das Verhalten geschweißter Träger bei Dauerbeanspruchung unter besonderer Berücksichtigung der Schweißspannungen, H. 7 der Berichte des Deutschen Ausschusses für Stahlbau. Berlin: Julius Springer 1937.

Hierbei wird unter „Zeit“ eine begrenzte Zahl von Lastspielen verstanden und die entsprechende Belastungsprobe eingeführt.

E. Technologische Prüfungen.

Die technologischen Prüfarten ergeben im Gegensatz zu den bisher besprochenen im allgemeinen keinen exakten Zahlenwert als Gütemaßstab, sondern geben lediglich darüber Aufschluß, wie sich die Schweißverbindung in bestimmten Fällen verhält.

Sehr beliebt zur Überwachung der Schweißer auf der Baustelle sind Stichproben nach Art der Keil- und Winkelprobe, wie sie in DIN 4100, § 9, empfohlen werden. Die Bruchfläche der Schweißnähte muß ein einwandfreies Gefüge und einen guten Einbrand zeigen.

Die Prüfung der *Kletterfähigkeit* eines Schweißdrahtes wird nach DIN 1913 vorgenommen, desgleichen die *Schmiedbarkeit*. Der ausgeschmiedete Teil der Probe muß sich bei Schmiedetemperatur um 360° verdrehen lassen, ohne Anrisse zu zeigen.

In einer neueren Arbeit¹ wird versucht, die Schmiedbarkeit von Schweißverbindungen durch Zahlenwerte (Gütegrade) festzulegen. Das ganze Gebiet wird in 12 Gütegrade eingeteilt. Eine höhere Ziffer drückt jeweils eine schwierigere Probe aus und bedingt, daß die Verbindung allen darunter liegenden Gütegraden genügt. Der Schmiedeversuch dient zum Nachweis, ob die Schweiße durch irgendwelche Bestandteile rotbrüchig geworden oder in ihrer Warmbildsamkeit herabgesetzt ist.

Die Prüfung der *Härte* von Schweißungen wird in gleicher Weise wie beim ungeschweißten Werkstoff mit den Geräten nach BRINELL, ROCKWELL, VICKERS, SHORE usw. vorgenommen. Zwischen Festigkeit, Dehnung und Härte bestehen zwar die bei Kohlenstoffstählen bekannten Beziehungen: Je größer die Dehnung und je geringer die Härte sind, desto geringer ist die Festigkeit. Die Umrechnungszahl, d. h. der Quotient Bruchfestigkeit zur Härtezah, beträgt bei Schweißen nicht 0,36, sondern 0,29 bis 0,32².

F. Sonstige zerstörende Prüfverfahren.

In Sonderfällen gibt die Untersuchung des *spezifischen Gewichtes* Aufschluß über die Porigkeit der Schweiße.

Zur eingehenden Untersuchung der Schweiße ist die *chemische Analyse* unerläßlich. Ermittelt wird der Anteil der im Stahl vorhandenen Grundstoffe. Für die Verschweißbarkeit ist die chemische Zusammensetzung ausschlaggebend.

Der Gefügebau von Schweißverbindungen, die Art der Warmbehandlung, Einschlüsse, Risse und sonstige Fehlstellen können mit Hilfe des *metallographischen Schliffbildes* nachgewiesen werden. Die Stücke werden durch Schleifen, Polieren und Ätzen entsprechend vorbereitet. Zum Nachweis von Fehlstellen genügt

⁹ Dauerfestigkeitsversuche mit Schweißverbindungen. Bericht des Kuratoriums für Dauerfestigkeitsversuche im Fachausschuß für Schweißtechnik im VDI, durchgeführt 1930 bis 1934. Berlin: VDI-Verlag G. m. b. H. 1935.

¹⁰ KOMMERELL, O.: Einfluß häufig wechselnder Belastungen auf geschweißte Bauwerke, u. M. ROŠ: Ermüdungsfestigkeit und Sicherheit geschweißter Konstruktionen. Vorbericht zum zweiten Kongreß der Internationalen Vereinigung für Brückenbau und Hochbau. Berlin: Wilh. Ernst & Sohn 1936.

¹¹ THUM u. BAUTZ: Z. VDI Bd. 81 (1937) Nr. 49, S. 1407.

¹² VOLK, C.: Elektroschweißg. Bd. 10 (1939), H. 3, S. 54.

¹ BECKER: Autogene Metallbearb. Bd. 28 (1935) H. 13, S. 193.

² MATTING, A. u. H. KOCH: Elektroschweißg. Bd. 5 (1934) H. 7, S. 127.

meist die *Großgefügeuntersuchung* bei natürlicher Größe oder geringer Vergrößerung. Darüber hinaus gestattet die *mikroskopische Untersuchung* eine genaue Prüfung des Feingefüges.

Die einzelnen Gefügebestandteile, wie Ferrit, Perlit usw., werden sichtbar gemacht. Photographische Aufnahmen der Gefügebilder erlauben ein Festhalten des Befundes.

Besondere Aufmerksamkeit wird heute dem Verhalten von Schweißverbindungen gegenüber Korrosionseinflüssen zugewendet. Die Probestücke werden in einem Gefäß dem entsprechenden Angriffsmittel ausgesetzt, wobei für eine Umwälzung gesorgt werden kann, auch kann die Einwirkung des Korrosionsmittels durch Herausheben der Probestreifen von Zeit zu Zeit oder periodisch unterbrochen werden. — Der Widerstand gegen Sprühkorrosion wird festgestellt, indem die Probestreifen dem Angriffsmittel in Form von Dämpfen und Nebeln ausgesetzt werden. Gleichzeitig kann der Probekörper belastet werden, um den Einfluß von Spannungen unter gleichzeitiger Korrosionsbeanspruchung zu ermitteln. Entsprechende Sonderprüfvorrichtungen wurden entwickelt¹. Schließlich kann auch die Temperatur als Prüffaktor eingeführt werden.

II. Unmittelbare Prüfverfahren ohne Zerstörung der Schweißnaht.

Bei der Prüfung des fertigen Arbeitsstückes sind die zerstörungsfreien, unmittelbaren Prüfverfahren den zerstörenden vorzuziehen. Sie haben, besonders in der Röntgentechnik, einen sehr hohen Stand erreicht².

A. Die Röntgenprüfung.

1. Das Wesen der Röntgenstrahlen.

Röntgenstrahlen³ sind kurzwellige Strahlen von im Mittel 10000mal kleinerer Wellenlänge als die der sichtbaren Lichtstrahlen. Infolgedessen ist ihr Durchdringungsvermögen wesentlich größer. Besonders die kurzwelligen, „harten“ Röntgenstrahlen besitzen starkes Durchdringungsvermögen, das größer ist als das der langwelligen, „weichen“ Strahlen. Im übrigen folgen die Röntgenstrahlen den gleichen optischen Gesetzen der Brechung, Reflektion, Interferenz und Absorption wie die Lichtstrahlen.

Die Entdeckung der elektromagnetischen Natur der Röntgenstrahlen durch LAUE, FRIEDRICH und KNIPPING im Jahre 1912 wurde von weitragender Bedeutung für die Erforschung der Kristallstruktur und Begründung der Röntgenspektroskopie.

Die Großstrukturuntersuchung mit Röntgenstrahlen (auch Absorptionsmethode oder Röntgendiaskopie genannt) beruht auf der Verschiedenheit der Absorption der Strahlen in inhomogenem Werkstoff. Sie dient zum Nachweis von Fehlstellen und Einschlüssen. Erforderlich sind Strahlen von möglichst starkem Durchdringungsvermögen. Gegenüber dieser Methode tritt die Feinstrukturuntersuchung (Interferenzmethode) im Stahlbau stark zurück. Sie beruht auf der Beugung der Strahlen beim Durchgang durch kristalline Körper und dient zur Erforschung der Feinstruktur eines Werkstoffes.

¹ DIEPSCHLAG, E.: Autogene Metallbearb. Bd. 29 (1936) H. 8, S. 113.

² BERTHOLD, R.: Stand und Entwicklung der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Z. VDI Bd. 79 (1935) H. 16, S. 477.

³ GLOCKER, R.: Materialprüfung mit Röntgenstrahlen, 2. Aufl. Berlin: Julius Springer 1936.

Beim Durchdringen eines Körpers werden die Röntgenstrahlen durch Absorption geschwächt. Die Schwächung ist abhängig von der Dicke, der Dichte und dem spezifischen Gewicht des zu durchdringenden Stoffes. Ungleichmäßigkeiten im Innern werden so als Kontrast erkannt. Die absorbierten Strahlen werden in Wärme und chemische Energie umgewandelt. Eine weitere Schwächung der Strahlen tritt durch Streuung ein, das ist eine Richtungsänderung eines Teiles der Strahlen infolge Mitschwingens der von der Strahlung getroffenen Atome, ähnlich der diffusen Zerstreuung des Lichtes in trüben Medien. Ein Teil der aufgenommenen Energie wird wieder in eine Eigenstrahlung der Atome, die Sekundärstrahlung, umgewandelt. Dadurch wird die Fehlererkennbarkeit, besonders bei dickeren Stücken, herabgesetzt. Mit zunehmender Härte der Strahlen nimmt auch die Streustrahlung zu.

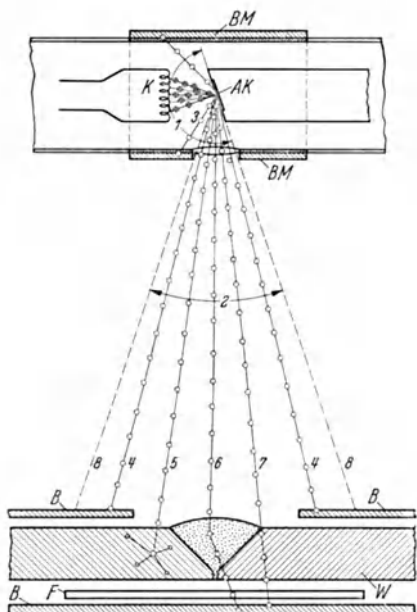


Abb. 7. Schematische Darstellung der Entstehung von Röntgenstrahlen. *K* Kathode, *AK* Antikathode, *BM* Bleimantel, *W* Werkstück, *F* Film, *B* Bleiblehde.

Der weitaus größte Teil der Energie, etwa 999/1000, wird jedoch in Wärme umgewandelt. Die Wärme muß durch Kühlung von der Antikathode abgeführt werden.

Da die Röntgenstrahlen auf organisches Gewebe schädlich einwirken, werden neuzeitliche Röntgenröhren unter dem Gesichtspunkt der Sicherheit für das Bedienungspersonal gebaut. Abb. 8 a u. b zeigt eine „Strahlenschutzröhre“, bei der nur ein eng begrenztes Strahlenbündel, das „Nutzstrahlenbündel“, austreten kann. Alle übrigen Strahlen werden durch dickwandige Metallteile abgeschirmt.

Um Isolationslänge und Gewicht zu sparen, werden die Röhren möglichst kurz ausgebildet. Zur wirtschaftlichen Untersuchung von Rundschweißungen an Rohren und Behältern dient heute die „Hohlanodenröhre“ (Abb. 9 a u. b).

¹ BERTHOLD, R.: Prüfung der Schweißnähte. Vorbericht zum 2. Kongreß der Internationalen Vereinigung für Brückenbau und Hochbau. Berlin: Wilh. Ernst & Sohn 1936.

² MATTING, A.: Röntgenprüfung im Werkstoff-Prüfwesen der Reichsbahn. Leipzig: Akadem. Verlagsgesellschaft m. b. H. 1935.

Die Röntgenstrahlen wirken auf den photographischen Film in ähnlicher Weise wie die Lichtstrahlen ein, jedoch wegen der hohen Durchdringungsfähigkeit wesentlich schwächer.

2. Die Erzeugung der Röntgenstrahlen. — Die Röntgenröhre^{1, 2}.

Die technischen Röntgenröhren sind hochevakuierte Elektronenröhren (auch Glühkathodenröhren oder Coolidge-Röhren genannt). Die Kathode *K* (Abb. 7) besteht aus einem dünnen Wolframdraht in Form einer Spirale, der elektrisch geheizt wird. Beim Glühen des Drahtes treten Elektronen aus. Durch die außen angelegte Spannung (Anode—Kathode) werden die Elektronen gegen die meist aus Wolfram bestehende Anode — auch Antikathode genannt — *AK* geschleudert. Beim Auftreffen entstehen Röntgenstrahlen, die bei Schrägstellung der Antikathode unter einem bestimmten Winkel durch das Fenster der Röhre austreten.

Die „Feinfokusröhre“ besitzt einen fast punktförmigen Brennfleck und gibt scharfe Bilder auch bei größerem Abstand zwischen Werkstück und Film. Mit ihr sind Vergrößerungen nach den Gesetzen der Zentralprojektion möglich.

Wanddickenmessungen sind mit dem „Röntgenstrahlen-Zählrohr“ möglich¹. Die Strahlenschwächung durch die Wand ist ein Maß für ihre Dicke.

In neuzeitlichen Anlagen werden ausschließlich Hochspannungstransformatoren zum Betrieb der Röntgenröhren verwendet. Primärseitig wird der zugeführte Wechselstrom unmittelbar dem Kraftnetz entnommen; sekundärseitig ergibt sich ein hochgespannter Wechselstrom, dessen Spannungskurve praktisch sinusförmig verläuft. Die Gleichrichtung geschieht durch Glühventilröhren. Diese bestehen ebenfalls aus hochevakuierten Glasgefäßen mit Anode und Kathode. Die Elektronen bewegen sich von dem elektrisch geheizten Glühfaden der Kathode zur Anode. Nur in dieser Richtung erfolgt Stromdurchgang. Von einer angelegten Wechselspannung kann deshalb stets nur eine Halbwelle hindurchtreten. Zur Ausnutzung beider Halbwellen sind verschiedene Schaltungen von GRAETZ, GREINACHER, VILLARD, WITKA-ZIMMERMANN usw. entwickelt worden.

Die Greinacherschaltung ergibt eine geringe Welligkeit. Sie erfordert Röhren mit gutem Vakuum. Die Villardschaltung gibt eine pulsierende Röhrenspannung. Gutes Röhrenvakuum ist bei dieser Schaltung nicht so wesentlich. Sie ist besonders geeignet zur Erzielung extrem harter Strahlung. Die Witka-Zimmermannschaltung ergibt eine Steigerung der Röhrenspannung auf den dreifachen Wert der Transformatorspannung.

Neuzeitliche Röntgenanlagen zeichnen sich durch ihre Kleinheit, durch Hochspannungssicherheit und durch gute Beweglichkeit aus. Zur Verwendung auf Baustellen werden sie fahrbar gemacht. Die Anlagen werden durch Netzstrom

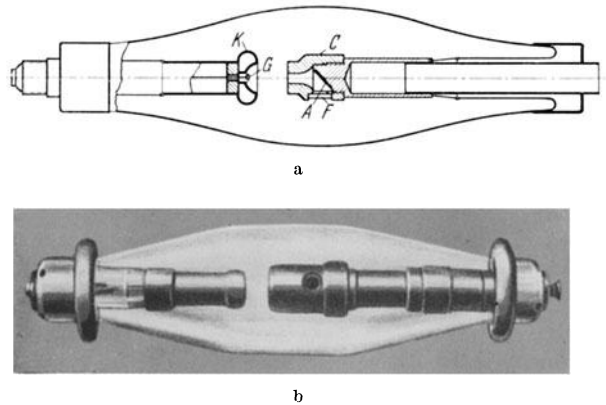


Abb. 8. Schnittzeichnung (a) und Ansicht (b) einer Strahlenröntgenröhre für 200 kW-Betriebsspannung unter Öl. A Anodenplatte aus Wolfram. F Strahlenaustrittsfenster aus Beryllium. C Kupfer-Wolframklotz. G Glühdraht. K Kathodenbecher.

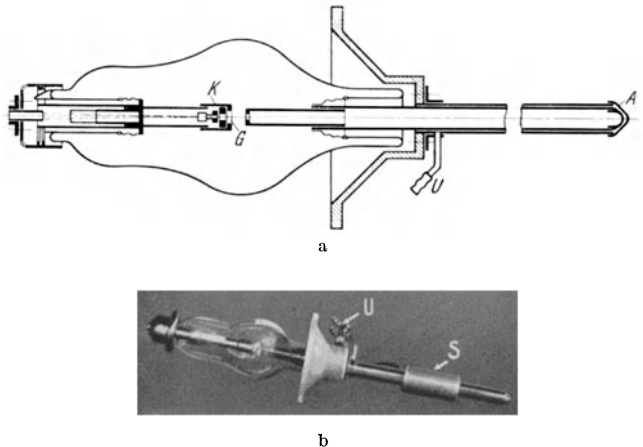


Abb. 9. Schnittzeichnung und Ansicht einer Hohlkathodenröhre für die Werkstoffprüfung der Fa. Siemens & Halske A.-G. A Anode aus platinisiertem Kupfer. G Glühdraht. K Kathodentopf. S Sammelspule.

¹ Troser, A.: Stahl u. Eisen Bd. 58 (1938) H. 25, S. 668.

betrieben oder besitzen eigene Kraftmaschinen. Zur Sicherheit sollen Röntgenapparate geerdet sein. Genügender Abstand von der Strahlenquelle oder Schutz des Personals durch Bleiwände sind immer erforderlich.

3. Die Anordnung von Röntgenröhre, Werkstück und Film^{1, 2, 3, 4}.

Die grundsätzliche Anordnung zeigte bereits Abb. 7. Sind Werkstoffdicken unter 10 mm zu durchstrahlen, so kann auch der Leuchtschirm an die Stelle des Filmes treten. Je nach der Intensität der auffallenden Strahlen leuchtet die Leuchtmasse, z. B. aus Zinksulfid, durch Fluoreszenz auf. Das Leuchtschirmbild erscheint dort am hellsten, wo es von den Strahlen am stärksten getroffen wird. Die Fehlererkennbarkeit ist geringer als beim Film. Die Bildschärfe reicht nicht aus, um kleine Helligkeitsunterschiede zu erkennen. Mit dem Leuchtschirm können daher nur grobe Fehler festgestellt werden. Poren müssen bei 10 mm Stahlblechdicke mindestens 0,6 mm Durchmesser haben, um eben noch erkennbar zu sein. Feine Risse und Bindefehler können nicht einwandfrei nachgewiesen werden. Von Vorteil ist, daß die räumliche Lage von groben Fehlern durch Drehen des Werkstückes bestimmt werden kann. Auch ist im Falle der Eignung eine sehr viel schnellere Überprüfung möglich als mit Hilfe des Röntgenfilms. Für Abnahmeprüfungen ist der Leuchtschirm jedoch nicht geeignet.

Die photographische Aufnahme hat den Vorteil, daß sie ein bleibendes Dokument darstellt. Bevorzugt wird der doppelt begossene Röntgenfilm. Er ist sehr biegsam und verhältnismäßig widerstandsfähig. Zur Beschleunigung des photochemischen Prozesses dienen Verstärkerfolien, die zu beiden Seiten des Röntgenfilms in die Kassette eingelegt werden. Sie enthalten Kalzium-Wolframatsalze, die durch Röntgenstrahlen angeregt fluoreszieren. Dadurch ist es möglich, die Belichtungszeiten erheblich abzukürzen. Gleichzeitig tritt jedoch eine Verschlechterung der Bildschärfe ein, die bei kleinen Werkstückdicken die Bildgüte merklich herabsetzt. Bis 10 mm Stahldicke arbeitet man darum zweckmäßig ohne Verstärkerfolien, von 10—35 mm mit scharf zeichnenden Folien geringer Verstärkerwirkung und erst darüber mit Folien hoher Verstärkerwirkung. Die Größe der Filme ist wie folgt genormt (in Zentimeter):

6 × 24	10 × 24
6 × 48	10 × 48
6 × 72	10 × 72.

Um die Sekundärstrahlung zu vermeiden, kann dem Film eine Sekundärstrahlenblende vorgeschaltet werden. Sie besteht aus einzelnen, 20 mm hohen und 1—2 mm breiten Bleistreifen, die ein Gitter derart bilden, daß die unmittelbaren Strahlen ungehindert hindurchtreten können, dagegen die schräg aus dem Versuchskörper austretenden Sekundärstrahlen zurückgehalten werden. Die Blende wird durch Rotation oder Verschiebung so bewegt, daß die Blendenstreifen alle Teile des Films gleich lange überdecken und somit nicht zur Abbildung kommen.

Gut eingeführt haben sich Kassetten, die aus evakuierbaren Gummischläuchen bestehen. Sie werden nach dem Einbringen der Verstärkerfolien abgeklemmt und mit einer Luftpumpe ausgepumpt. Der äußere Luftdruck drückt die Verstärkerfolien überall gleichmäßig gegen den Film.

An Stelle der teuren Röntgenfilme können auch Röntgen-Negativpapiere verwendet werden. Die Empfindlichkeit der photographischen Schicht ist die

¹ BERTHOLD, R.: Grundlagen der technischen Röntgendurchstrahlung. Leipzig 1930.

² BERTHOLD, R.: Stahlbau Bd. 9 (1936) H. 4, S. 25.

³ WEYERHOFF, E.: Elektroschweißg Bd. 7 (1936) H. 10, S. 192.

⁴ GRIMM, W. u. F. WULFF: Autogene Metallbearb. Bd. 27 (1934) H. 7, S. 101.

gleiche, die Fehlererkennbarkeit ist jedoch geringer als bei dem doppelseitig begossenen Film. Die Bildfeinheiten treten in der Aufsicht weniger deutlich hervor, außerdem erscheint das doppelseitige Negativ des Films doppelt so kontrastreich als das einseitige Negativ des Röntgenpapiers. Vom Negativpapierbild können keine Positivabzüge wie vom Film hergestellt werden. Dafür lassen sich mit Papieren bei Aufnahmen ohne Verstärkerfolie gleichzeitig bis 6 Bilder durch eine Belichtung herstellen. Hierbei müssen die Schichtseiten sämtlicher Papiere der Röntgenröhre zugekehrt sein.

Wenig geeignet erscheint die Verwendung von Röntgenpapier für Aufnahmen an Kehlnähten und Prüfstücken verschiedener Werkstoffdicke. Die obere Grenze ihrer Verwendung liegt bei 20 mm Stahl. Die Papiere können zum Aufsuchen größerer Werkstofffehler verwandt werden. Charakteristische oder zweifelhafte Stellen werden zur Sicherheit durch Filmaufnahmen nachgeprüft.

Zur Beurteilung der Fehlererkennbarkeit und Erzeugung einheitlich beurteilbarer Durchstrahlungsbilder wird ein Prüfkörper auf die Schweißnaht aufgelegt und mitbelichtet. Er besteht aus 7 Drähten verschiedenen Durchmessers, die zwischen Gummi gepreßt sind. In Abhängigkeit von der Blechdicke wird die Erkennbarkeit bestimmter Drahtdurchmesser verlangt. Die Verwendung dieser Prüfkörper ist nach den Richtlinien für die Schweißnahtprüfung mit Röntgenstrahlen (DIN 1914) vorgeschrieben.

Die Kennzeichnung der Filme geschieht entweder durch Bleiplättchen, die neben der Schweißnaht angeheftet werden, und deren Form dann auf dem Röntgenbilde erscheint, oder durch Auflegen eines Bandmaßes mit Bleimarken¹.

Zur praktischen Vornahme von Röntgendurchstrahlungen gibt das Normblatt DIN 1914 folgende Richtlinien:

a) Die Strahlenrichtung R soll möglichst so gelegt werden, daß sie in die Ebene von vermuteten Bindefehlern fällt.

b) Die Röntgenstrahlen sollen die photographische Schicht möglichst senkrecht treffen.

c) Die Aufnahmeanordnungen sollen so gewählt werden, daß die photographische Schicht möglichst nahe an die zu untersuchende Werkstückzone herangebracht werden kann.

d) Um die bildverschleiernde Streustrahlung herabzusetzen, soll das Aufnahmegebiet auf den kleinstmöglichen Querschnitt ausgeblendet werden.

e) Zu achten ist auf den Schutz der photographischen Schicht gegen seitliche oder rückwärtige Streustrahlung, die von bestrahlten Gegenständen außerhalb des Aufnahmegebietes ausgeht (Ausblenden des Primärstrahlenkegels, seitliche und rückwärtige Abdeckung der photographischen Schicht od. dgl.).

Um Unschärfen und Verzerrungen des Schwärzungsbildes in angemessenen Grenzen zu halten, wird empfohlen, das Verhältnis

Abstand der Strahlenquelle von der ihr zugekehrten Seite der Schweißverbindung zu
Abstand dieser Seite von der photographischen Schicht nicht kleiner als 6:1 zu wählen.

Besondere Richtlinien für die Durchstrahlung von Schweißverbindungen.

R = Strahlenrichtung,

P = photographische Schicht.

a) I- und U-Nähte sollen möglichst senkrecht zur Blechebene durchstrahlt werden (Abb. 10 und 11).

b) Werden auf Grund des äußeren Befundes oder von Senkrechtaufnahmen an V- und X-Nähten Bindefehler vermutet, so müssen an den verdächtigen Stellen Aufnahmen in Richtung der Bindeflächen gemacht werden. Allgemein wird empfohlen, bei der Prüfung bei V- und X-Nähten einige Aufnahmen parallel zu den Bindeflächen anzufertigen (Abb. 12 und 13).

c) Empfohlen wird, Kehlnähte überlappter Nähte längs einer Bindefläche zu durchstrahlen (Abb. 14).

d) Kehlnähte von T-Verbindungen können unter beliebigem Winkel zur Schweißraupenfläche durchstrahlt werden; weil aber die Wahrscheinlichkeit, daß Bindefehler auftreten, größer ist als bei V- und X-Nähten, wird die Durchstrahlung längs einer Bindefläche besonders empfohlen (Abb. 15).

¹ WULFF, F.: Elektroschweißg. Bd. 7 (1936) H. 5, S. 89.

e) Für alle Kehlnahtaufnahmen wird die Anwendung eines den Dickenunterschied im durchstrahlten Feld verringern den Schwermetallkeiles K empfohlen (Abb. 16 und 17).

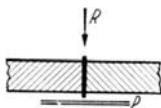


Abb. 10.
Durchstrahlung einer I-Naht.

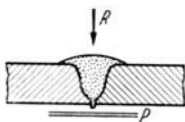


Abb. 11.
Durchstrahlung einer U-Naht.

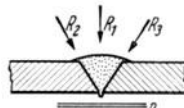


Abb. 12.
Durchstrahlung einer V-Naht.

f) Überlappte Preßschweißungen sollen senkrecht zur Blechoberfläche durchstrahlt werden. Stichprobenweise und an verschiedenen Stellen sollen Ergänzungsaufnahmen möglich in Richtung der Bindeflächen angefertigt werden (Abb. 18). Vor den Aufnahmen ist der auf den Blechoberflächen anhaftende Zunder auf wenigstens 150 mm Breite zu entfernen (Sandstrahlgebläse, Abschleifen, Drahtbürsten).

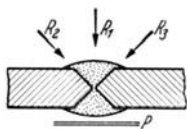


Abb. 13.
Durchstrahlung einer X-Naht.

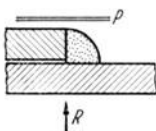


Abb. 14.
Abb. 14 und 15. Durchstrahlung von Kehlnähten.

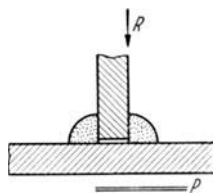


Abb. 15.
Abb. 14 und 15. Durchstrahlung von Kehlnähten.

Zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und Erleichterung der Deutung von Röntgenbildern sind besondere Verfahren entwickelt worden, wie der Zweiröhren-

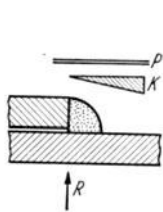


Abb. 16.
Abb. 16 und 17. Verwendung des Schwermetallkeiles.

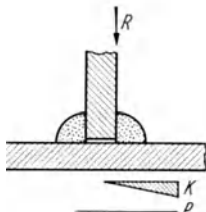


Abb. 17.

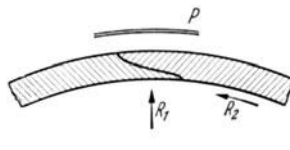


Abb. 18.
Durchstrahlung einer Preßschweißung.

betrieb, die Großflächenaufnahme, das Doppelwinkelverfahren und die stereoskopische¹ Auswertung der Röntgenfilme.

4. Die Deutung der Röntgenaufnahmen.

Zur Deutung, dem „Lesen“ der Röntgenbilder, dienen folgende Angaben: Poren und Gasblasen erscheinen als gleichmäßige, meist runde Pünktchen (Abb. 19).

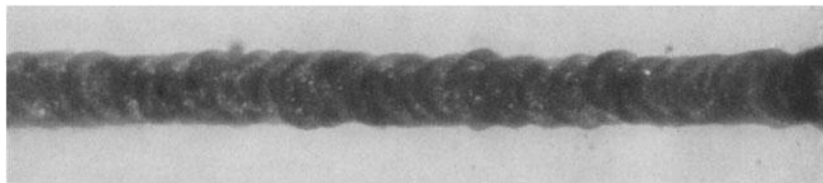


Abb. 19. Schweißnaht mit Poren und Gasblasen.

Schlackeneinschlüsse zeichnen sich durch unregelmäßige Form und ungleichmäßige Helligkeit (wolkiges Aussehen) ab (Abb. 20). Bindefehler erscheinen als

¹ MATTING, A.: Gießerei Bd. 23 (1936) Nr. 1, S. 7.

gerade, scharf begrenzte Striche (Abb. 21 und 22). Risse haben einen veränderlichen Querschnitt (Abb. 23), sie verlaufen oft im Bogen oder im Zickzack, begleitet von Verästelungen.

Die Lage der Fehlstellen kann die Deutung der Aufnahmen erschweren. Feine Risse in oder neben der Schweißnaht treten nur in Erscheinung, wenn sie parallel zur Strahlenrichtung verlaufen. Bindefehler zwischen den einzelnen Lagen einer Schweißnaht können nicht immer sicher nachgewiesen werden.

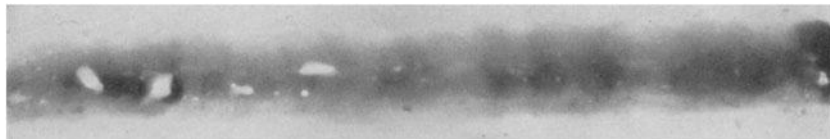


Abb. 20. Schweißnaht mit starken Schlackeneinschlüssen.

Die geringste, bei Filmaufnahmen noch erkennbare Fehlergröße beträgt etwa 1,5% der durchstrahlten Blechdicke. Schwieriger ist das Lesen der Aufnahmen von Kehlnähten.

Noch nicht restlos geklärt ist die Beurteilung der im Röntgenbild festgestellten Fehler hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die mechanischen Güterwerte einer

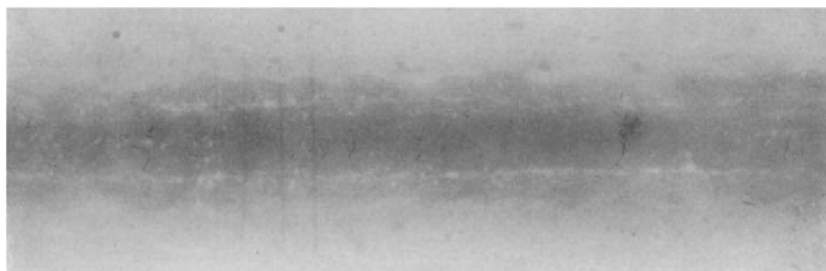


Abb. 21. Schweißnaht mit Bindefehlern.

Schweißverbindung. Eine einfache Beziehung zwischen zerstörender und zerstörungsfreier Prüfung besteht offenbar nicht. Ganz allgemein ergeben im Röntgenbild schlecht aussehende Schweißnähte auch geringe Güterwerte¹. Besonders die

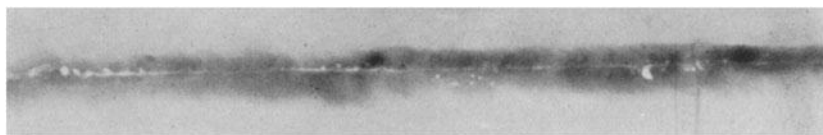


Abb. 22. Nicht durchgeschweißt.

Dauerfestigkeit wird durch Bindefehler, Risse, Wurzelfehler und Schlackeneinschlüsse erheblich herabgesetzt; dagegen ist der Einfluß von kleinen Poren nur gering, wenn sie nicht perlschnurartig aneinander gereiht sind. Mangelhaft durchgeschweißte Stumpfnähte sind der Kerbwirkung im allgemeinen zu verwerfen.

Eine klare Beziehung zwischen Röntgenbefund und Kerbschlagzähigkeit konnte bisher nicht nachgewiesen werden².

¹ MATTING, A.: Der Bauingenieur Bd. 20 (1939) H. 15/16, S. 193.

² SÖHNCHEN, E.: Elektroschweißg Bd. 6 (1935) H. 8, S. 51.

Die Feinstrukturuntersuchung mittels Röntgenstrahlen beschränkt sich auf Laboratorien und Versuchsanstalten. Nachweisbar ist der Aufbau der Atomverbände in Abhängigkeit von der Behandlung des Werkstoffes. Ein neues

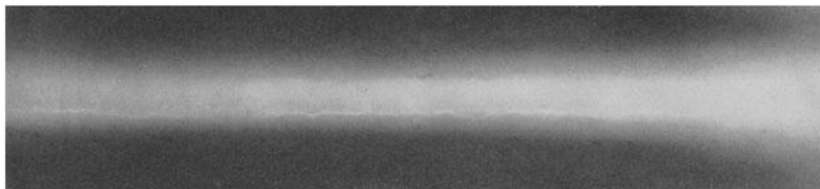


Abb. 23. Kehlnaht mit Schrumpfriß.

Verfahren von GLOCKER¹ ermöglicht darüber hinaus die unmittelbare Messung von Eigenspannungen in Schweißnähten.

B. Die übrigen zerstörungsfreien Prüfverfahren.

1. Die Gammastrahlen.

Die Gammastrahlen² sind elektromagnetische Wellenstrahlen, ähnlich den Röntgenstrahlen, aber von wesentlich kleinerer Wellenlänge. Die Strahlen werden von Salzpräparaten radioaktiver Elemente ausgesandt, wie Radium, Radiumemanation und Mesothor. Die Präparate werden in Glas- oder Metallhülsen an einem Stativ vor dem Prüfstück angebracht. Ein hinter dem Prüfstück angeordneter Röntgenfilm nimmt das von der Strahlenquelle entworfene Schattenbild auf.

Die Belichtungszeiten sind wesentlich größer als bei Röntgenstrahlen, weil wegen der großen Durchdringungsfähigkeit nur ein geringer Bruchteil der auftreffenden Strahlungsenergie auf die photographische Schicht einwirkt. Bei starken Stücken ändert sich das Verhältnis der Belichtungszeiten zugunsten der Gammastrahlen, weil sich hier die leichtere Durchdringung des Prüfstückes günstig auswirkt.

Wegen des hohen Durchdringungsvermögens ist die Fehlererkennbarkeit bei Verwendung von Gammastrahlen für kleine Dicken geringer. Leuchtschirmuntersuchungen sind nicht möglich. Günstiger ist das Verhalten bei großen Wanddicken. Hier ist die Bildschärfe bei Gammastrahlen besser, weil sich fast punktförmig wirkende Präparate herstellen lassen, während der Brennfleck einer Röntgenröhre eine bestimmte Ausdehnung hat. Die Präparate lassen sich überall, auch an schwer zugänglichen Stellen, anbringen. Sie bedürfen während der Belichtung keiner Wartung. Die Strahlengefährdung des Personals ist dagegen größer als bei Röntgenstrahlen.

Für die Anordnung und Auswertung der Filme gelten die Ausführungen über Röntgenstrahlen sinngemäß.

2. Die magnetischen Prüfverfahren.

Die Wirkungsweise der magnetischen Prüfverfahren³ beruht grundsätzlich darauf, daß jede Unterbrechung des metallischen Zusammenhanges in magnetisierbaren Werkstücken ein Hindernis für den magnetischen Fluß darstellt. Feinste Risse, die durch Röntgen- oder Gammastrahlen nicht erfaßt werden, stellen dem

¹ Literatur s. Fußnote 3, S. 177.

² WIDEMANN, M.: Autogene Metallbearb. Bd. 29 (1936) H. 13, S. 196.

³ STAEBLER, J.: Autogene Metallbearb. Bd. 31 (1938) H. 24, S. 393.

magnetischen Fluß einen erheblichen Widerstand entgegen und werden angezeigt. Die magnetischen Verfahren bilden so eine wertvolle Ergänzung der Durchstrahlungsverfahren.

Fehler, die in der Richtung des Flusses liegen, werden aber nicht angezeigt. Das Werkstück muß in zwei zueinander senkrechten Richtungen magnetisiert werden, um jeden möglichen Fehler zu erfassen. Neuzeitliche Geräte tragen diesem Umstand Rechnung.

a) **Das Magnetpulververfahren**¹. Die Magnetisierung des Prüfkörpers wird entweder mit Gleichstrommagneten (Ferroskopverfahren) oder dadurch vorgenommen, daß ein kräftiger Wechselstrom hindurch geschickt wird, der ein Ringmagnetfeld erzeugt. Als Folge der bei Wechselstrom auftretenden Stromverdrängung entstehen kräftige Magnetfelder, besonders an der Oberfläche des Prüfkörpers (Ferroflux-Verfahren). Wird der Prüfkörper durch einen kurzen starken Stromstoß bleibend magnetisiert, so wird das Ferropulververfahren angewandt.

Das Gerät (Abb. 24) besteht aus einem kleinen Transformator, dessen Kabel die Tiefspannung (Sekundärspannung) zu den Elektroden führen. Die Entfernung zwischen den aufgesetzten Elektroden soll höchstens 150 mm betragen. Feinkörniges, gefärbtes Eisenpulver wird in Öl auf den Prüfkörper aufgeschlämmt.

Wo die magnetischen Kraftlinien auf eine Unterbrechung des metallischen Zusammenhanges stoßen, sammelt sich das Eisenpulver und zeigt den äußerlich unsichtbaren Fehler an. Das Feilspänebild kann photographiert werden und führt so zu einem bleibenden Dokument.

Das Verfahren spricht gut auf feinste Rißbildungen in der Oberfläche an. Es ist billig, schnell betriebsbereit und einfach in der Handhabung. Da die Tiefenwirkung jedoch nur gering ist, muß der Fehler sehr nahe der Oberfläche liegen, um sicher angezeigt zu werden. Auch ist das Verfahren ziemlich unempfindlich gegen Poren, Schlackeneinschlüsse und allmählich einsetzende Querschnittsänderungen.

b) **Der I.G.-Schweißnahtprüfer**. Eine kleine Schwingspule wird hierbei über die Schweißnaht geführt. An diese ist unter Zwischenschaltung eines Verstärkers ein Kopfhörer oder Lautsprecher angeschlossen. Fehler in der Schweißnaht sollen an einer Lautstärken- oder Klangfarbenänderung des Tones zu hören sein. Der magnetische Fluß wird durch Stabmagnete im Stück erzeugt. Der Kolben mit der Schwingspule wird quer zur Schweißnaht hin und her bewegt.

Der I.G.-Schweißnahtprüfer hat die zunächst auf ihn gesetzten großen Erwartungen bisher nicht zu erfüllen vermocht. Eine genaue Abgrenzung der Fehlstellen und eine genaue Deutung sind nicht möglich. Der Befund ist stets von der Person des Prüfers abhängig.

c) **Sonstige magnetische Prüfverfahren**. Die sonstigen magnetischen Prüfverfahren spielen praktisch kaum eine Rolle. Das erste Feilspäneverfahren von ROUX benutzte zur Magnetisierung einen hufeisenförmigen Elektromagneten mit Nord- und Südpol.

Das Gerät der de Forest Ass., New York, ebenfalls ein Magnet-Pulververfahren, sieht zwei Möglichkeiten der Magnetisierung vor: Das Werkstück wird zwischen zwei Polplatten magnetisch fremderregt und außerdem durch einen hindurch-



Abb. 24. Gerät zur Durchflußprüfung (nach BERTHOLD).

¹ BERTHOLD, R. u. F. GOTTFELD: Stahlbau Bd. 10 (1937) H. 4, S. 31.

geschickten Stromstoß eigenerregt. Dieses Verfahren wurde in Deutschland zu dem beschriebenen Magnetpulververfahren mit Ringfeld ausgebildet.

3. Die übrigen Verfahren.

Ein nicht zu unterschätzendes Prüfverfahren ist der äußere Befund der Schweißnähte, das dem erfahrenen Prüfer Rückschlüsse auf die Güte gestattet. Äußere Poren und Schlackeneinschlüsse, Überhitzungen und Verbrennungen, Einbrandkerben und Bindefehler sind zu erkennen. Aus der Sauberkeit und Gleichmäßigkeit der Naht lassen sich Schlüsse auf das Können des Schweißers ziehen. Äußerlich sehr schlechte Nähte werden stets zu verwerfen sein. Die Möglichkeit, daß eine äußerlich einwandfreie Naht auf Grund ihrer inneren Beschaffenheit den Anforderungen trotzdem nicht entspricht, ist nicht von der Hand zu weisen.

An Hohlkörpern können Wasserdruck-, Dampfdruck- und Luftdruckversuche vorgenommen werden, an Bauwerken Belastungsproben oder Dauerprüfungen bei gleichzeitigen Spannungsmessungen. Das Prüfverfahren der Universität Wisconsin benutzt die Düninflüssigkeit erwärmten Petroleums, um die Dichtigkeit und Güte von Schweißnähten zu prüfen.

Das Anfräsverfahren nach SCHMUCKLER gestattet nur Stichproben vorzunehmen. Mit einem Fräser, durch eine biegsame Welle von einem Elektromotor angetrieben, wird eine kleine Nut in der Schweißnaht bis auf den Grundwerkstoff hergestellt. Anschließend wird die freigelegte Fläche zur metallographischen Grobgefügeuntersuchung vorbereitet. Zum Aufsuchen von Fehlern an hochwertigen Schweißungen, z. B. von Hohlkörpern, ist das Verfahren ungeeignet. Auch im Normalfall darf die Blechdicke ein bestimmtes Maß nicht übersteigen. Schwierigkeiten kann auch die Anbringung des Gerätes bereiten. Sein Wert besteht allenfalls in einer erzieherischen Einwirkung auf die Schweißer.

An Bauwerken können überstehende Bleche aus demselben Werkstoff, die unter den gleichen Bedingungen vom gleichen Schweißer geschweißt werden, belassen werden. Diese Teile werden entfernt und zerstörend geprüft. Hieraus ist ein Rückschluß auf die Güte der Arbeit am Bauwerk möglich.

Zusammenstellung von Richtlinien und Vorschriften für die zerstörungsfreie Prüfung.

1. „Merksblatt über die zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen“ des Fachausschusses für Schweißtechnik im VDI.

2. DIN 1914: Richtlinien für die Prüfung von Schweißverbindungen mit Röntgen- und Gammastrahlen.

3. Deutsche Reichsbahn: Anweisung für Röntgenuntersuchungen. (Ein Anhang mit näheren Ausführungen zum Durchstrahlen und Durchfluten von Brücken ist zur Zeit in Bearbeitung.)

4. DIN Rönt. 5: Vorschriften für den Hochspannungsschutz in nicht-medizinischen Röntgenanlagen.

5. DIN Rönt. 6: Vorschriften für den Strahlenschutz in nichtmedizinischen Röntgenanlagen.

6. DIN Rönt. 7: Regeln für das Messen von Spannungen in Röntgenanlagen mit der Kugelfunkenstrecke.

7. DIN Rönt. 8: Vorschriften für den Strahlenschutz in nichtmedizinischen Radiumbetrieben.

8. DIN Rönt. 35: Bandfilme, Verstärkerfolien, Kassetten für Röntgenaufnahmen von Schweißnähten. Abmessungen.

9. DIN 4512: Negativmaterial für bildmäßige Aufnahmen.

Sachverzeichnis.

Abbrand 25, 87.
Abbrennen 41.
Abkühlung 30.
Abkühlungserscheinungen 16.
Abkühlungsflächen 26.
Abkühlungsgeschwindigkeit 20, 24, 28.
Abkühlungsvorgänge 17.
Abnahmeprüfung 169.
Abschmelzen 60, 90.
Abschmelzschweißen 34, 41.
Abschmelzverfahren 35, 38.
Abschmelzzeiten 123.
Abschreckbiegeversuch 172.
Abschrecken 24, 32.
Abschreckgefüge 24.
Abschreckmittel 20.
Abschreckung 20.
Absperrventile 112.
Ätzkalk 104.
ALEXANDER 87.
Alterung 20, 104.
Aluminium 16, 49, 88.
Aluminiumsilikate 88.
Ampèremeter 64.
Ankerückwirkung 67.
Anlassen 24.
Anlaßtemperatur 24.
Anode 55, 178.
Anpreßdruck 44.
Ansaugbrenner 113.
Ansaugfähigkeit 113.
Anschlußschwierigkeiten 44.
Antikathode 178.
Anzapfung 44, 71.
Anzug 85.
Arbeitsprüfung 169.
Arbeitszeit 62, 63.
Arcatomverfahren 38.
Arcogenverfahren 37.
Asbestkleidung 85.
Atmosphäre 25.
Aufhärtung 31, 32.
Aufkohlung 20.
Ausbrennen 113.
Ausglühen 31.
Austenit 18, 23, 24, 31.
Automaten 57.
Azeton 108.
Azetylen 104.
Azetylerzeuger 105.
Azetylenflaschen 108.
Azetylenleitungen 110.

Azetylenverordnung 105.
Azetylen- und Sauerstoff-
flaschen 118.
Bariumsuperoxyd 49.
Bauart 58, 64, 66.
Baustähle 4.
Baustellenstoß 149.
Baustoff 57.
Beagid 107.
BENARDOS-Verfahren 36, 54.
Benzingebläse 49.
Berechnung von Schweißspan-
nungen 160.
Bessemer- oder Thomasbirne
23.
Biegedehnung 172.
Biegeproben 31.
Biegewinkel 97, 172.
Blasen 96.
Blasspulen 56, 77, 80.
Blaswirkung 55, 56.
Bleimennige 86.
Blockfehler 17.
Blockrisse 16.
Blockseigerungen 16, 17.
Breitstahl 6.
Brennschneiden 37, 104, 113.
Brennschneidmaschinen 115.
Brennschnitt 122.
Brinellhärte 31.
Bruchfestigkeit 128.
Charakteristik, statische 59,
60.
Chemische Umsetzungen beim
Schweißvorgang 25.
Chemische Zusammensetzung
des Schweißgutes 87.
Chrom 4, 13, 20, 86.
— -Kupferstähle 22.
Dampfkessel 26.
Dauerbetrieb 62.
— mit aussetzender Belastung
62.
Dauerfestigkeit 91, 96, 97, 165.
Dauerprüfung 174.
Decklagen 96.
Dehnung 97.

Dehnung und Einschnürung
32.
Desoxydation 5, 6.
Desoxydationsmittel 30.
Deutschleder 85.
Dieselmotor 69.
Dornschlitten 49.
Drahtpreise 102.
Drehstrom 72.
Drehstromnetz 39.
Drehstromspanner 71.
Drehvorrichtungen 123.
Drehzahl 66.
Drosselpulven 73.
Druckfaltungsrisse 9.
Druckmesser 112.
Druckminderer 112, 113, 118.
Druckschweißen 34, 41.
Dünnblechschweißung 60, 80.
Einankerumformer 39, 44.
Einbrand 57.
Einbrandkerben 91, 123.
Einfrieren 113.
Eingehäuseumformer 66.
Einlagenschweißung 26.
Einphasenwechselstrom 39.
Einsatzhärtung 20.
Einsatzverfahren 52.
Einschaltdauer 68.
Einschaltzeit 63.
Einschlüsse 25.
Einschnürung 32, 97.
Einspannbacken 40.
Einspannvorrichtung 40.
Eisenbegleiter 25.
Eisen-Eisenkarbid 18.
Eisenerze 1.
Eisenkarbid 23, 25, 88.
Eisenkarbonüle 88.
Eisenkern 73.
Eisenkohlenstoffschaubild 18.
Eisenoxyde 88.
Eisenoxydul 15.
Eisensilikate 88.
Elektroden 29, 44, 48, 86.
Elektrodenabstand 60.
Elektrodenarme 44.
Elektrodenhalter 79.
Elektroden, Festkleben 59.
Elektronen 178.
Elektronenemission 25.

- Elektroofen 23.
 Elektroschmelzschweißung 33, 36, 54.
 Elektrostahl 5.
 Entschwefelung 6.
 Entwickler 118.
 Erdleitungen 83.
 Erhitzen 32.
 Erregermaschine 67.
 Erstarrung 30.
 Erstarrungsintervall 18.
 Erstarrungspunkt 17.
 Erwärmen 24.
 Eutektikum 23, 25.
 Eutektoid 23.

 Fahrgestell 65.
 Fahrkante 52.
 Faltversuch 171.
 Federung 65.
 Fehlererkennbarkeit 181.
 Feilgeräte 54.
 Fernregler 61, 70.
 Ferrit 18, 23, 24.
 Ferritkörner 25.
 Ferromangan 88.
 Ferrosilizium 88, 106.
 Ferrotitan 88.
 Ferrovanadin 88.
 Festkleben der Elektrode 59.
 Feuerschweißung 33.
 Flammenrückschläge 110.
 Fluoreszenz 180.
 Flußstahl 23.
 Formänderungsfähigkeit 27, 31.
 Formen 53.
 Fußhebel 44.
 Fußschalter 39, 44.

 Gammastrahlen 184.
 Gasaufnahme 25.
 Gasblasen 9, 16.
 Gasblasenseigerung 17.
 Gaselektrische Schweißung 33, 37.
 Gasmantel 25, 87.
 Gasschmelzschweißung 33, 37, 104.
 Gefüge 92.
 Gefügeausbildung 28.
 Gefügeunterschied 31.
 Generator 58, 66.
 Gesamtarbeitszeit 61.
 Gesamtschrumpfung 130.
 Getriebe 75, 76.
 Gießschweißung 33, 36.
 Gießverfahren 16.
 Gitteraufbau 23.
 Gittergesteuerte Stromrichter 49.
 Gleichdruckbrenner 113.
 Gleichdruckverfahren 113.
 Gleichgewichte 14.
 Gleichgewichtszustand 24.
 Gleichrichter 61.
 Gleichstrom 39, 55, 59.
 Gleitlager 65.
 Glühdauer 24.
 Glühen 21.
 Glühkathoden 45.
 Glühkathodenröhren 71.
 Glühventilröhren 179.
 Glühwirkung 26.
 GOLDSCHMIDT 49.
 Grat 35.
 Grenzquerschnitte 40.
 Großschweißgeräte 60.
 Grundwerkstoff 26.
 Güterwerte 97.
 Gummi-Lichtbogen 60.
 Gußeisen 11.
 Gußform 50.
 Gußkristalle 26.

 Hämmern 155.
 Härte 97, 176.
 — des Abschreckgefüges 24.
 Härterisse 9.
 Härtung 30.
 Härtungserscheinungen 26.
 Härtungszonen 27.
 Hammerschweißung 33.
 Handhabung 58.
 Handhobel 54.
 Handschnitte 115.
 Handschweißbetrieb 61.
 Handschuhe 85.
 Hautwiderstand 83.
 Hochofen 1.
 Hochspannungsnetz 39.
 Hohlodenröhre 178.
 Hohlkehlnähte 30.

 Ionisation 25.
 Isolierung 79, 80, 83.

 Kabel 60.
 Kabelanschlüsse 64.
 Kabelquerschnitt 81.
 Kalkschlamm 108.
 Kalkschlammgruben 119.
 Kaltschweißen 17.
 Kaltstreckung 140.
 Kaltverformung 11.
 Kalziumkarbonate 88.
 Kalziumsilikate 88.
 Karbid 20, 104.
 Karbidausscheidungen 21.
 Karbidlager 117.
 Kathode 55, 178.
 Kehl nähte 27, 30, 122.
 Kehl naht, Schrumpfung 137.
 Kelchnähte 119.
 Kerbschlagversuch 173.

 Kerbschlagzähigkeit 25, 26, 97, 104.
 Kerbwirkung 170.
 Kipptiegel 50.
 Klebsand 52.
 Kleinschweißgeräte 60.
 Klemmbacken 34.
 Klemmenspannung 68.
 Klemmgerät 49, 50, 51, 54.
 Kletterfähigkeit 176.
 Knickfestigkeit 167.
 Kohle 88.
 Kohleelektrode 54.
 Kohlelichtbogen 63.
 Kohlelichtbogenschweißung 80.
 Kohlelichtbogen-Schweißköpfe 77.
 Kohlendioxyd 13.
 Kohlenoxyd 13, 16, 25, 96.
 Kohlensäure 96.
 Kohlenstoff 4, 13, 25, 87, 88.
 Kohlenstoffstähle 4, 22.
 Kokillen 23.
 Kollektor 59.
 Kondensatoren 39, 62, 73.
 Konstantdruckverfahren 113.
 Kopfschutz 52.
 Korngrenzen 25, 30.
 Korngröße 19, 21.
 Kornvergrößerung 26.
 Kornwachstum 24.
 Kosten von Schweißnähten 123.
 Kraftlinien 55.
 Kratzer 19.
 Kreuzproben 171.
 Kristallisationsgefüge 30.
 Kristallseigerung 18.
 Kupfer 4.
 Kurzschluß 57, 59.
 Kurzschlußläufer 66.

 Längenverlust 42.
 Längsnahtschweißung 48.
 Längsraupen 31.
 Längsschrumpfspannungen 142.
 Längsschrumpfung 139.
 LANGMUIR 38.
 Laufkatze 77.
 Ledeburit 18, 23.
 Leerlauf 58, 64.
 Leerlaufspannung 64.
 — in der Unfallverhütung 82, 83.
 Leerlaufstromverbrauch 67.
 Leerlaufverbrauch 62.
 Leerlaufverluste 58, 61.
 Legierung 5.
 Legierungsbestandteile 26.
 Legierungselemente 22, 24, 26.
 Leichtbau 43.
 Leistung 58.
 Leistungsfaktor 39, 58, 62, 73.

- Leuchtgas 104.
 Leuchtschirm 180.
 Lichtbogen 36, 54, 55, 57, 87, 89.
 — elastischer 60.
 Lichtbogenlänge 25, 60.
 Lichtbogentheorie 55.
 Lichtbogenwiderstand 57.
 Linksschweißung 115.
 Luftspalt 73.
 Lunker 17.
- Magnesiumkarbonate** 88.
Magnesiumsilikate 88.
Magnetfelder 56.
Magnetische Prüfverfahren 184.
Magnetismus 66.
Magnetpulververfahren 185.
Magnettöpfe 76.
Mangan 4, 13, 20, 24, 25, 87, 88.
Mangankarbid 88.
Mangankarbonüle 88.
Manganoxyde 88.
Manganoxydul 16.
Mangan-Siliziumstähle 22.
Maschinengehäuse 66.
Maschinenschnitte 115.
Markenbezeichnung 3.
Martensit 24, 129.
Mehrlagenschweißer 26, 96.
Mehrstellenschweißumformer 67.
Mehrstellenumspanner 74.
Meßinstrumente 58, 64.
Meßverfahren 156.
 — mechanische 156.
 — röntgenographische 159.
Metallelektrode 54.
Metallgleichrichterplatten 71.
Metallmikroskop 25.
Metallographie 23.
Metallurgie 22.
Methanol 87.
Mindestfestigkeit 22.
Mischkristalle 18, 23.
Modulatoren 49.
Molybdän 4.
Molybdän-Stähle 22.
Motor 66.
Motorantrieb 69.
Motorgenerator 39, 44.
- Nachwärmungen** 154.
Nacktdrahtschweißung 25, 26.
Nahtformen 119.
Nahtlässigkeit 30.
Nahtschweißmaschinen 44, 48.
Nahtschweißung 43.
Nahtschweißverfahren 35.
Negativpapiere 180.
Netzspannung 58.
- Nickel** 20, 24, 86.
Niederspannungsnetz 39.
Nitrid 21, 25.
Nitrideinschlüsse 16.
Nitridnadeln 96.
Normalglühen 24, 26, 96.
Normalisieren 24.
- Oberflächenhärtung** 20.
Oberspannungsseite 39, 44.
Oberspannungswicklung 73.
Ottomotor 69.
Oxydbildung 25.
Oszillogramm 58.
Oszillograph 59.
- Papierkordel** 77.
Parallelschrumpfung 130.
Periodenumformer 75.
Perlit 18, 23, 24, 31, 92, 129.
Phosphideinschlüsse 16.
Phosphor 1, 4, 13, 88, 89.
Pilgerschrittsschweißung 147.
Poren 96.
Preis 58, 66.
Preise der Drähte 102.
Preßschweißung 33, 49.
Preß- und Schmelzschweißung, vereinigte 51.
Primärkorn 19.
Primärkristalle 18.
Prüfkörper 181.
Prüfung von Schweißverbindungen 169.
Prüfverfahren, magnetische 184.
 — mit Zerstörung 170, 176.
 — ohne Zerstörung 177, 184.
 — technologische 176.
 — Richtlinien 186.
Punktschweißbügel 46.
Punktschweißmaschinen 44.
Punktschweißung 35, 43.
Punktschweißzange 47.
Punktschweißzeuge 43, 45.
- Quecksilberdampf-Gleichrichter-Röhren** 45.
Querfeldmaschinen 67.
Quernahtschweißung 48.
Querschnitte 40.
Querschrumpfung 130.
 — von Kehlnähten 137.
Querverspannungen 144.
- Rechtsschweißung** 115.
Reckstab 172.
Reckung 132.
Regelbereich 58, 60, 61.
Regelgröße 60.
Regelung 58.
- Regelung, feinstufige** 60.
Regelwiderstände 68.
Regler 61, 64.
Reibradgetriebe 76.
Reifen 40.
Reiniger 110.
Relais 43, 45, 76.
Remanenzmagnetismus 67.
Restschmelze 18.
Restspannungen 140.
Rißanfälligkeit 30.
Rißbilder 20.
Rißfahrt 27, 30, 31, 132, 140, 150.
 — Vermeidung 154.
Röntgenfilme 180.
Röntgenprüfung 177.
Röntgenröhre 178.
Roheisen 1.
Rost 98.
Rotbrüchigkeit 25.
Rotglut 92.
Rückschlagsicherheit 113.
Rutil 88.
- Sammelkabel** 69.
Sauerstoff 13, 25, 26, 77, 87, 104, 110.
Sauerstoffflaschen 110, 113.
Sauerstoffleitungen 110.
Schienenköpfe 51.
Schlacke 25, 88, 90.
Schlackenhaut 25.
Schlackenschicht 82.
Schlagstellen 51.
Schlagzreierversuch 174.
Schmelzbad 88.
Schmelzführung 27.
Schmelzschweißung 33, 36, 50.
Schmerzmittel 84.
Schmeidbarkeit 10, 176.
Schneidbrenner 113, 114.
Schneiddüse 114.
Schneidsauerstoff 114.
Schnellpunktschweißmaschinen 45.
Schrott 2.
Schrumpfung 30, 128, 130.
Schrumpfspannungen 141.
Schubspannungen 30.
Schutzanzug 85.
Schutzbrille 84, 86, 119.
Schutzgasmantel 25, 38.
Schutzkleidung 119.
Schutzmaske 84, 85.
Schutzschild 84, 85, 86.
Schutz vor Gasen 119.
Schwefel 4, 13, 25, 88, 89.
Schwellbeanspruchungen 175.
Schwellen 40.
Schweißbedingungen 27.
Schweißbegrenzer 45.
Schweißbereich 61.
Schweißbrenner 113.

- Schweißdrähte 86.
 Schweißdrahtlieferbedingungen 98.
 Schweißdruck 40.
 Schweißeigenschaften 58, 60, 67, 89, 90.
 Schweißeinrichtungen, selbsttätige 75.
 Schweißempfindlichkeit 27, 31, 150, 151.
 Schweißerprüfung 101.
 Schweißfolgen 146.
 Schweißgeneratoren 69.
 Schweißgeschwindigkeit 29.
 Schweißgleichrichter 71.
 Schweißgut 26, 57, 88, 91, 171.
 — chemische Zusammensetzung 87.
 Schweißhitze 34.
 Schweißkabel 57, 80.
 Schweißkolben 79.
 Schweißkontrolleur 63, 64.
 Schweißkopf 76.
 Schweißnahtprüfung 185.
 Schweißnahtrißempfindlichkeit 150.
 Schweißnahttrissigkeit 27, 30.
 Schweißoszillogramm 59.
 Schweißrissigkeit 27, 150, 152.
 Schweißspannungen 140.
 — Berechnung 160.
 — Bestimmung 156.
 — Festigkeit 164.
 — Versuchsergebnisse 161.
 Schweißstrom 57.
 Schweißstromerzeuger 58.
 Schweißstromkreis 62.
 Schweißstromverbrauch 61.
 Schweißumformer 66.
 Schweißumspanner 59, 72.
 Schweiß- und Schneidbrenner 119.
 Schweißverbindungen, Prüfung von 169.
 Schweißverfahren 33.
 Schweißzange 79.
 Schweißzeiten 42, 45, 61, 63.
 Schweißzeitmesser 62, 63.
 Seelendrähte 89.
 Seelenelektroden 26, 55.
 Seigerungen 17.
 Sekundärkorn 19.
 Sekundärstrahlen 180.
 Selbsttätige Schweißeinrichtungen 75.
 Sicherheitsventile 118, 119.
 Siemens-Martin-Ofen 1, 2, 4, 23.
 Silizium 4, 13, 25, 87, 88.
 Siliziumkarbid 88.
 SLAVIANOFF-Verfahren 37, 54.
 Sorbit 129.
 Spannung 24, 57, 58, 59, 60, 64, 103, 128.
 Spannungsabfall 81.
 Spannungsfreiglühen 24, 96.
 Spannungsschema 161.
 Spannungsspitzen 27, 28.
 Spannungszustand 20.
 Sparformen 53.
 Spezifische Wärme 128.
 Spitzhammer 82.
 Spitztiegel 50, 51.
 Spreizelektroden 47.
 Stärke 88.
 Stahl 1.
 Stahlanalyse 13.
 Stahlblock 6.
 Stahldrahtbürste 82.
 Stahlguß 11, 22.
 Stahlprozeß 4.
 Stahlthermit 51.
 Statische Charakteristik 64.
 Statische Festigkeit 164.
 Stauchen 41.
 Stern-Dreieck-Schalter 66.
 Stickstoff 13, 15, 20, 25, 26, 87.
 Stickstoffaufnahme 26.
 Stickstoffeinschlüsse 96.
 Stickstoffhärtung 20, 21.
 Stickstoff in der Naht 25.
 Stoßstelle 50.
 Strahlenwirkung des Lichtbogens 84.
 Strahlungsschutz 84.
 Streckgrenze 24, 97, 128, 129.
 Streueisenpaket 73.
 Streuung 71, 73.
 Stromanschluß 55.
 Stromkostenaufwand 61.
 Stromkreis 58.
 Strommesser 63.
 Stromrichter, gittergesteuerte 49.
 Stromrichtersteuerung 45.
 Stromspitzen 59.
 Stromstärke 29, 57, 59, 60, 64.
 Stromstöße 39.
 Stromverbrauch 42.
 Stromzuführungen, Widerstände in 64.
 Stumpfnähte 119.
 Stumpfproben 171.
 Stumpfschweißmaschinen 39.
 Stumpfschweißung 34, 38.
 Stumpfschweißverfahren 41.
 Sulfideinschlüsse 16.
 Technologische Prüfungen 176.
 Thermit 50.
 Thermitpreßschweißung 33, 36.
 Thermitmelzschweißung 33, 38.
 Thermiterschweißung 49.
 Thomasbirne 23.
 Thomas-Stahlwerk 1.
 Tiegel 54.
 Titan 15.
 Tonerde 49.
 Trockengleichrichter 67.
 Troostit 129.
 Tulpennähte 119.
 Überhitzungsgefüge 24.
 Überhitzungszone 26.
 Überhöhungen 123.
 Überkopfschweißung 55.
 Überlappungen 16.
 Überwalzungen 9.
 Umformer 58, 61.
 Umhüllen der Drähte 89.
 Umhüllung 25.
 Umhüllungsmassen 88.
 Umkristallisation 18.
 Umpolenschutz 67.
 Umspanner 39, 44, 58, 61.
 Umwandlung 18, 129.
 Umwandlungsfreudigkeit 31.
 Umwandlungspunkt 23.
 Umwickeln der Drähte 89.
 Unfälle durch Eisen- und Schlackenspritzer 86.
 — durch elektrischen Strom 82.
 — durch Gase 85.
 — durch Lichtbogenstrahlen 82, 84.
 Unfallverhütung 82, 117.
 Unterspannungsseite 39, 40, 44.
 Unterspannungswicklung 73.
 Verblitzen der Augen 84.
 Verbrennen 25.
 Verfahrungsprüfung 169.
 Verformbarkeit 97, 128, 129.
 Verformungsprüfung 171.
 Verformungsvermögen 25, 26.
 Vergüten 20, 24.
 Verlustzeiten 61.
 Verspannung 30, 146.
 Versprödung 28.
 Verstärkerfolien 180.
 Versuchsergebnisse 134, 161.
 Verziehen 20.
 Verzögerungssystem 111.
 Volumenänderung 130.
 Vorschriften 100.
 Vorschub 76.
 Vorwärmung 31, 32, 41, 154.
 Wälz- (Rollen-) Lager 65.
 Wärmeabgabe 26.
 Wärmeausdehnung 30.
 Wärmeausdehnungszahl 128.
 Wärmebehandlung 26.
 Wärmeeigenschaften 128.
 Wärmefluß 30.
 Wärmeleitfähigkeit 29, 128.
 Wärmemaßnahmen 28, 154.

- Wärmemißhandlung 32.
 Wärmewirkung beim Schweiß-
 vorgang 25.
 Wärmezufuhr 30.
 Wäscher 110.
 Walzbarkeit 9.
 Walzprozeß 23.
 Walzstahl 24.
 Walztemperatur 10.
 Walzverfahren 7.
 Walzwerk 6.
 Warmbehandlung 20.
 Warmbiegeversuch 172.
 Warmrisse 30.
 Wassergasschweißung 34.
 Wasserstoff 13, 15, 20, 30, 104.
 Wasserstoffmoleküle 38.
 Wasservorlagen 110, 119.
 Wechselbeanspruchungen 174.
 Wechselstrom 39, 55, 56, 59,
 72, 83.
 Wechselstromgenerator 39.
 Wechselstromlichtbogen 55.
 Weichglühen 24.
 Wendevorrichtungen 123.
 Werkstofftropfen 25.
 Werkstückanschlußkabel 56.
 Werkstückanschlußklemme
 81.
 Widerstände 57, 58, 61.
 — in Stromzuführungen 64.
 Widerstandsschweißung 33,
 34, 38.
 Winkelschrumpfung 130.
 Wirkungsgrad 58, 61, 68, 73.
 Wirtschaftlichkeit 68.
 Wolfram 38.
 Wulst 34.
 Wurzeleinbrand 30.
 Wurzellagen 27, 30.
 Wurzelraupen 123.
 Zahnradgetriebe 76.
 Zeilenstruktur 23.
 Zellulose 88.
 Zementationsmittel 20.
 Zementit 20, 23.
 ZERNER-Verfahren 36.
 Zerknallgefahr 104.
 Zünden 58.
 Zündgemisch 49.
 Zugfestigkeit 32, 97.
 Zugversuch 170.
 Zusatzstoff 26, 86.
 Zweistofflegierung 23.
 Zwischentransformator 39.

Stahl im Hochbau. Taschenbuch für Entwurf, Berechnung und Ausführung von Stahlbauten. Mit Unterstützung durch den Stahlwerks-Verband Aktiengesellschaft, Düsseldorf, und Deutschen Stahlbau-Verband, Berlin. Herausgegeben vom Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik (Düsseldorf). 10. Auflage. Mit über 2000 Textabbildungen. XII, 770 Seiten. 1938. (Gemeinsam mit Verlag Stahleisen m. b. H., Düsseldorf.) Gebunden RM 12.—

Berichte des Deutschen Ausschusses für Stahlbau. Ausgabe B (Fortsetzung der vom Deutschen Stahlbau-Verband, Berlin, herausgegebenen Berichte des früheren Ausschusses für Versuche im Stahlbau.)

Heft 8. **Versuche über den Einfluß der Gestalt der Enden von aufgeschweißten Laschen in Zuggliedern und von aufgeschweißten Gurtverstärkungen an Trägern.** Von Professor **Otto Graf**, Stuttgart. Mit 56 Textabbildungen. III, 16 Seiten. 1937. RM 3.60

Forschungshefte aus dem Gebiete des Stahlbaues.

Herausgegeben vom Deutschen Stahlbau-Verband, Berlin.

Soeben erschienen:

Heft 2. **Die Kipp-Stabilität gerader Träger mit doppelsymmetrischem I-Querschnitt.** Von Professor Dr. techn. **Ernst Chwalla** VDI, Brünn. Mit 33 Textabbildungen. IV, 63 Seiten. 1939. RM 4.80

(Inhalt und Preise weiterer Hefte beider Sammlungen auf Anfrage.)

Der Stahlskelettbau mit Berücksichtigung der Hoch- und Turmhäuser. Vom konstruktiven Standpunkte behandelt für Ingenieure und Architekten. Von Dr.-Ing. **Alfred Hawranek**, o. Professor des Brücken- und Stahlhochbaues an der Deutschen Technischen Hochschule in Brünn. Mit 458 Textabbildungen. VIII, 286 Seiten. 1931. Gebunden RM 34.20

Der Eisenbau. Von **Martin Grüning**, o. Professor an der Technischen Hochschule zu Hannover.

Erster Band: **Grundlagen der Konstruktion. Feste Brücken.** (Handbibliothek für Bauingenieure, herausgegeben von Robert Otzen, IV. Teil, IV. Band.) Mit 360 Textabbildungen. VIII, 441 Seiten. 1929. Gebunden RM 24.—

Korrosionen an Eisen und Nichteisenmetallen. Betriebs- erfahrungen in elektrischen Kraftwerken und auf Schiffen. Von **August Siegel** VDI, Oberingenieur i. R. der AEG-Turbinenfabrik Berlin. Mit 112 Abbildungen auf 22 Tafeln. V, 86 Seiten. 1938. RM 19.50; gebunden RM 21.60

Rostschutz und Rostschutzanstrich. Von Professor **Hermann Suida**, Wien und Privatdozent **Heinrich Salvaterra**, Wien. (Technisch-gewerbliche Bücher, Band 6.) Mit 193 Abbildungen im Text. VI, 344 Seiten. 1931. (Verlag von Julius Springer-Wien.) Gebunden RM 24.—

Korrosionstabellen metallischer Werkstoffe geordnet nach angreifenden Stoffen. Von Dr.-Ing. **Franz Ritter** VDI. V, 193 Seiten. 1937. (Verlag von Julius Springer-Wien.) Gebunden RM 19.80

Schweißkonstruktionen. Grundlagen der Herstellung, der Berechnung und Gestaltung. Ausgeführte Konstruktionen. Von Dipl.-Ing. **R. Hänchen**, Berlin. (Einzelkonstruktionen aus dem Maschinenbau, Heft 9.) Mit 491 Abbildungen. IV, 123 Seiten. 1939. Steif geheftet RM 18 60

Praktisches Handbuch der gesamten Schweißtechnik. Von Direktor Professor Dr.-Ing. **P. Schimpke**, Chemnitz, und Obergeringieur Direktor **Hans A. Horn**, Berlin.

Erster Band: **Gasschweiß- und Schneidtechnik.** Dritte, neubearbeitete und vermehrte Auflage. Mit 347 Textabbildungen und 22 Tabellen. VIII, 300 Seiten. 1938. Gebunden RM 18.—

Zweiter Band: **Elektrische Schweißtechnik.** Zweite, neubearbeitete und vermehrte Auflage. Mit 375 Textabbildungen und 27 Tabellen. VIII, 274 Seiten. 1935. Gebunden RM 15.—

Grundzüge der Schweißtechnik. Kurzgefaßter Leitfaden. Von Studienrat Dipl.-Ing. **Theodor Ricken** VDI, Frankfurt a.M. Mit 97 Abbildungen im Text. 63 Seiten. 1938. RM 3.90

Die Bearbeitung von Fragen der Schweißtechnik an den Deutschen Materialprüfungsämtern (Stand Ende 1938). Herausgegeben vom Präsidenten des Staatlichen Materialprüfungsamts Berlin-Dahlem. (Wissenschaftliche Abhandlungen der Deutschen Materialprüfungsanstalten, Erste Folge, Heft 2.) Mit 243 Abbildungen. V, 95 Seiten. 1939. RM 19.60

Die neueren Schweißverfahren. Von Prof. Dr.-Ing. **P. Schimpke**, Chemnitz. (Werkstattbücher, Heft 13.) Vierte Auflage. In Vorbereitung.

Das autogene Schweißen und Schneiden mit Sauerstoff. Handbuch zum Studium, zur Einrichtung und zum Betriebe von Sauerstoff-Metallbearbeitungsanlagen. Von Ing., Oberbahnstaatsrat **Felix Kagerer**. Dritte, verbesserte und erweiterte Auflage. (Technische Praxis, Band I.) Mit 127 Abbildungen und 15 Tabellen. 278 Seiten. 1923. (Verlag von Julius Springer, Wien.) Gebunden RM 3.—

Die Schweißung des Kupfers und seiner Legierungen Messing und Bronze. Von Obergeringieur **Hans A. Horn**, Berlin. Mit 102 Textabbildungen. IV, 102 Seiten. 1928. RM 4.32

Widerstandsschweißen. Von Dr.-Ing. **Wolfgang Fahrenbach** VDI, Berlin. (Werkstattbücher, Heft 73) Mit 141 Abbildungen im Text. 62 Seiten. 1939. RM 2.—

Elektrische Widerstand-Schweißung und -Erwärmung. Von Dipl.-Ing. **A. J. Neumann**, Obergeringieur. Mit einem Geleitwort von Professor Dr.-Ing. A. Hilpert, Berlin. Mit 250 Textabbildungen. VIII, 193 Seiten. 1927. Gebunden RM 15.75

Praktische Regeln für den Elektroschweißer. Anleitungen und Winke aus der Praxis für die Praxis. Von Ing. **Rud. Hesse**, Tetschen (Sudeten-gau). (Werkstattbücher, Heft 74.) Mit 105 Abbildungen und 7 Tabellen im Text. 47 Seiten. 1939. RM 2.—

Das Lichtbogenschweißen. Eine Einführung in die Technik des Lichtbogenschweißens. Von Dr.-Ing. **Ernst Klosse** VDI, Köthen (Anhalt). Zweite, völlig neubearbeitete Auflage. (Werkstattbücher, Heft 43.) Mit 141 Abbildungen im Text. 61 Seiten. 1937. RM 2.—
