

Zur Beherrschung der Schrumpfwirkungen

Autor(en): **Bierett, G.**

Objektyp: **Article**

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

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

PDF erstellt am: **11.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-2694>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

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

III b 3

Zur Beherrschung der Schrumpfwirkungen.

La lutte contre les effets de retrait.

Controlling the Effects of Shrinkage.

Dr. Ing. G. Bierett,

Professor am Staatl. Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem.

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

1. Anforderungen an die Werkstoffe.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

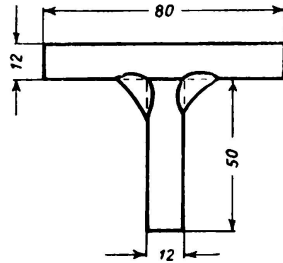


Fig. 1.

Probe für Schweißrissigkeitsverhalten von Elektroden.

2. Ausdehnungs- und Schrumpfungsvorgänge.

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

a) Die Querschrumpfungen.

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

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

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

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

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

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

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

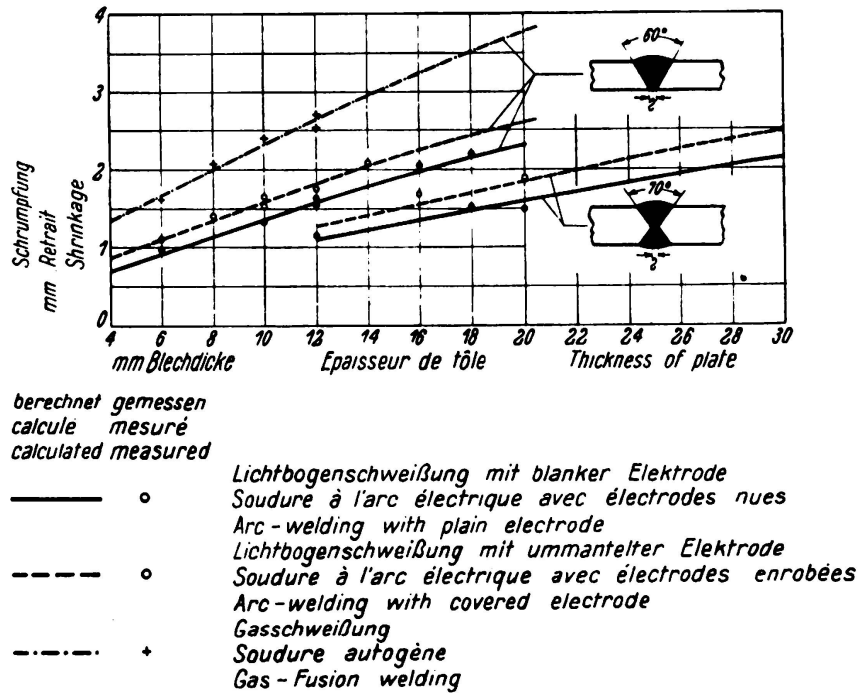


Fig. 2.

Querschrumpfung gut vorgehefteter Nähte.

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

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

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

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

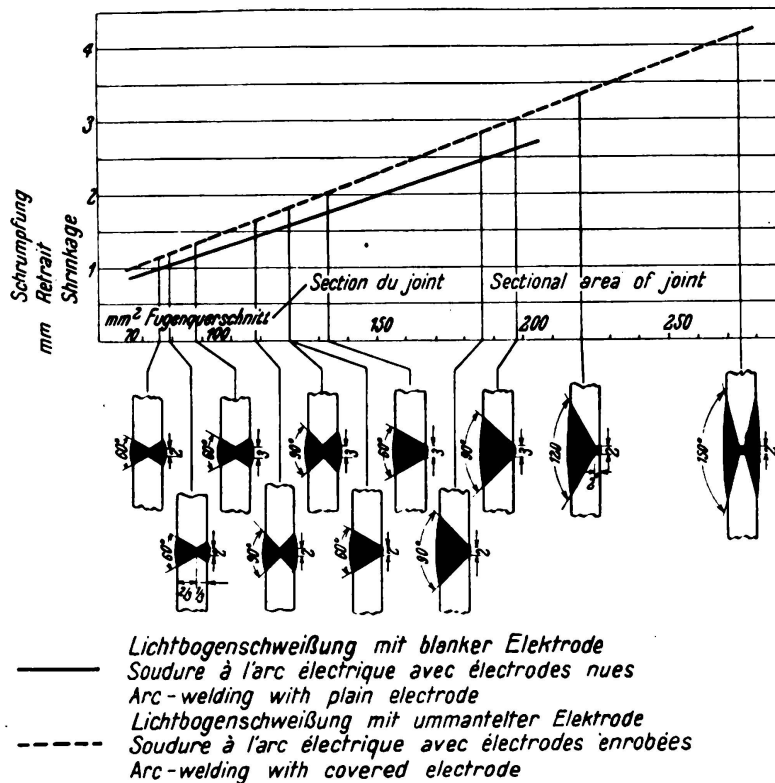


Fig. 3.

Schrumpfung von Stumpfnähten verschiedener Fugenausbildung (Blechdicke 12 mm).

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

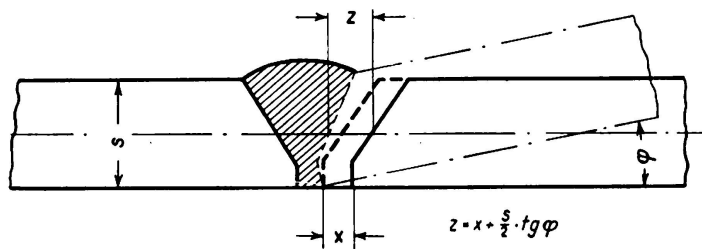


Fig. 4.

x = Parallelquerschrumpfung φ = Winkelschrumpfung z = Gesamtquerschrumpfung
 Zerlegung der Querschrumpfung.

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

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

Die Querschrumpfung bei Kehlnahtverbindungen⁴ ist kleiner als bei Stumpfnahten (Fig. 6), da die Aufschmelzzone nur über einen gewissen Teil der Blechdicke wirkt. Eine Abhängigkeit der Querschrumpfung von der Blechdicke wie bei Stumpfnahten ist bei gleichbleibenden Nahtquerschnitten nicht zu erwarten, eher

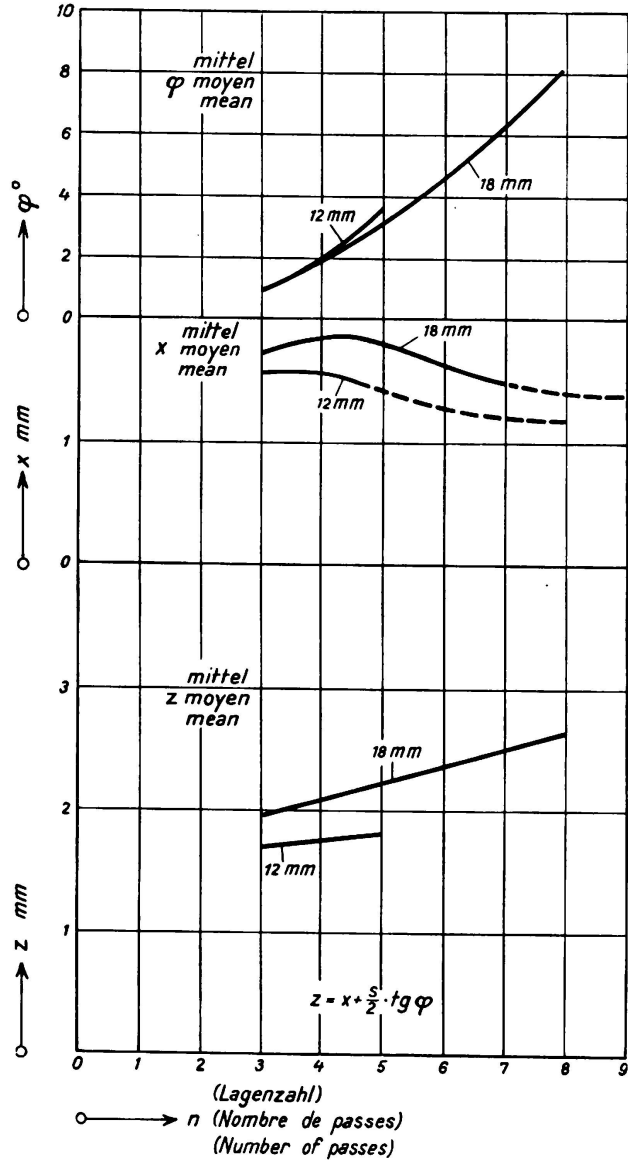


Fig. 5.

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

konstant:

l = Nahtlänge 180 mm;

b = Gesamtbreite 240 mm

V-Stoß;

v = Fugenabstand 3 mm;

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

Normale Stromstärke, an beiden Enden geheftet.

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

b) Die Längsschrumpfungen.

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

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

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

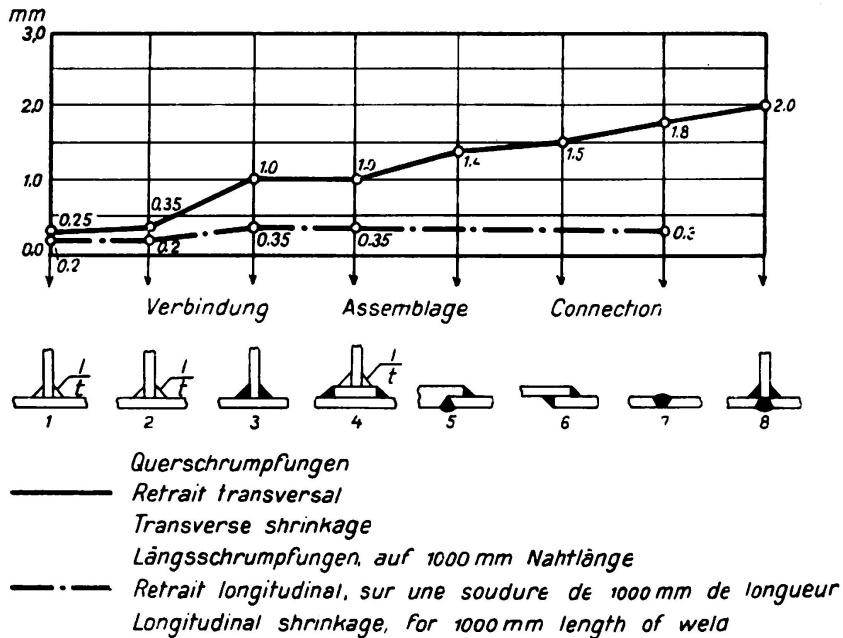


Fig. 6.

Quer- und Längsschrumpfung von geschweißten Verbindungen nach Lottmann.

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

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

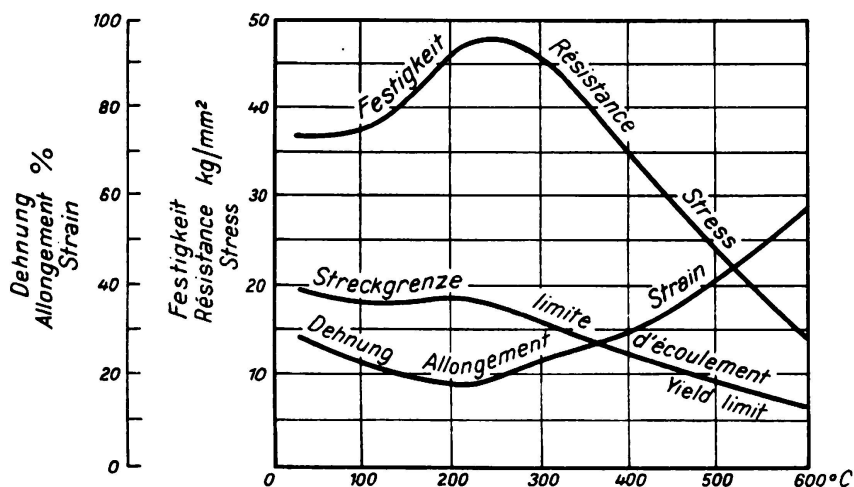


Fig. 7.

Festigkeitseigenschaften von unlegiertem Stahl nach G. Urbanczyk.

C = 0,14 ‰; Mn = 0,51 ‰; P = 0,016 ‰; S = 0,032 ‰.

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

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

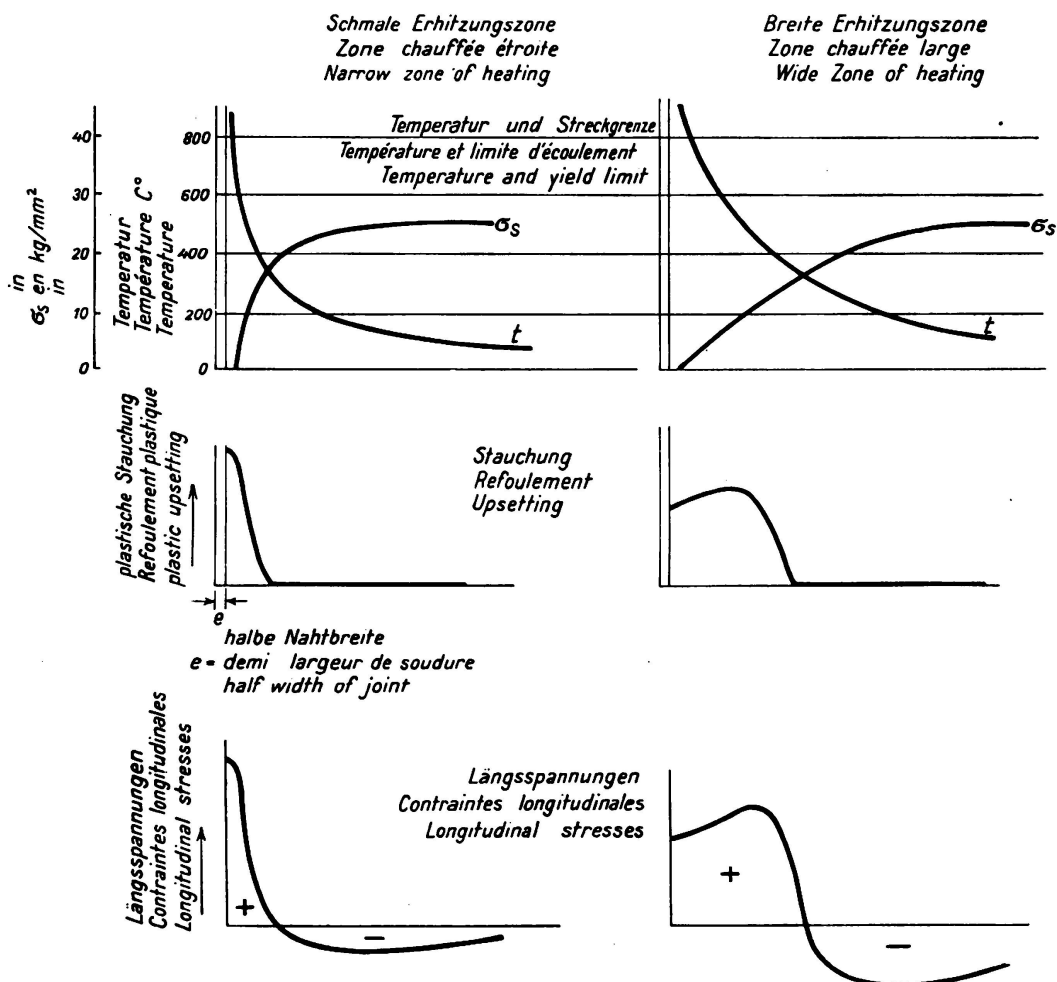


Fig. 8.

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

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

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

3. Die Schrumpfspannungen beim „verspannungsfreien“ Schweißen.

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

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

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

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

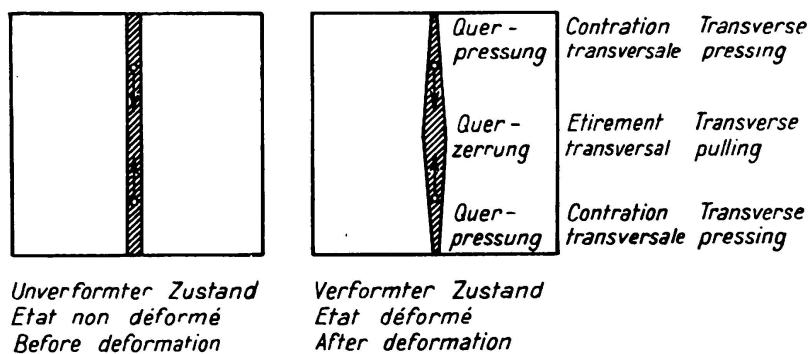


Fig. 9.

Die Längsschrumpfung als Erzeugende der Querspannungen bei freier Schweißung.

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

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

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

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

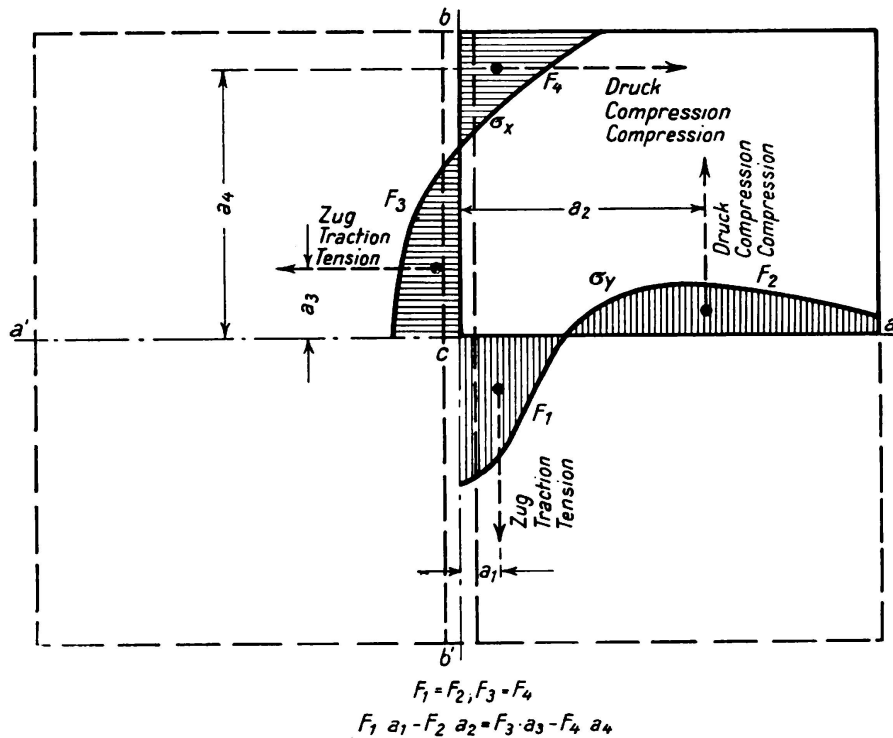


Fig. 10.

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

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

Durch experimentelle Untersuchungen ist die dargestellte Anordnung der Längs- und Querspannungen in Stumpfnähten bestätigt worden (Fig. 11, Platte 20, 3 und 15). Selbst bei längeren Nähten und auch bei dickeren, in vielen Lagen hergestellten Nähten⁵ ist dieser Spannungszustand annähernd vorhanden,

⁵ G. Bierett: Versuche zur Ermittlung der Schrumpfspannungen in geschweißten Stumpfnahverbindungen. Z. V. D. I. 78 (1934) S. 709/715. — G. Bierett und G. Grüning: Schrumpfspannungen in autogen geschweißten Teilen. Autog. Metallbearbtg. 27 (1934) S. 259/266. — G. Grüning: Die Schrumpfspannungen beim Schweißen. Stahlbau 7 (1934) S. 110/112. Die drei genannten Arbeiten zusammengefaßt in Mitt. d. Deutsch. Mat.-Prüf.-Anst. Sonderheft 25, S. 65/86. — F. Bollenrath: Eigenspannungen bei Lichtbogen- und Gasschmelzschweißung. Abhandlung. Aerodyn. Inst. Techn. Hochsch. Aachen 1934 H. 14, S. 27/54. — F. Bollenrath: Weitere Untersuchungen über Eigenspannungen in einfachen Schweißnähten. Arch. f. d. Eisenhüttenw. 9 (1925, 36) H. 4, S. 203, 207.

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

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

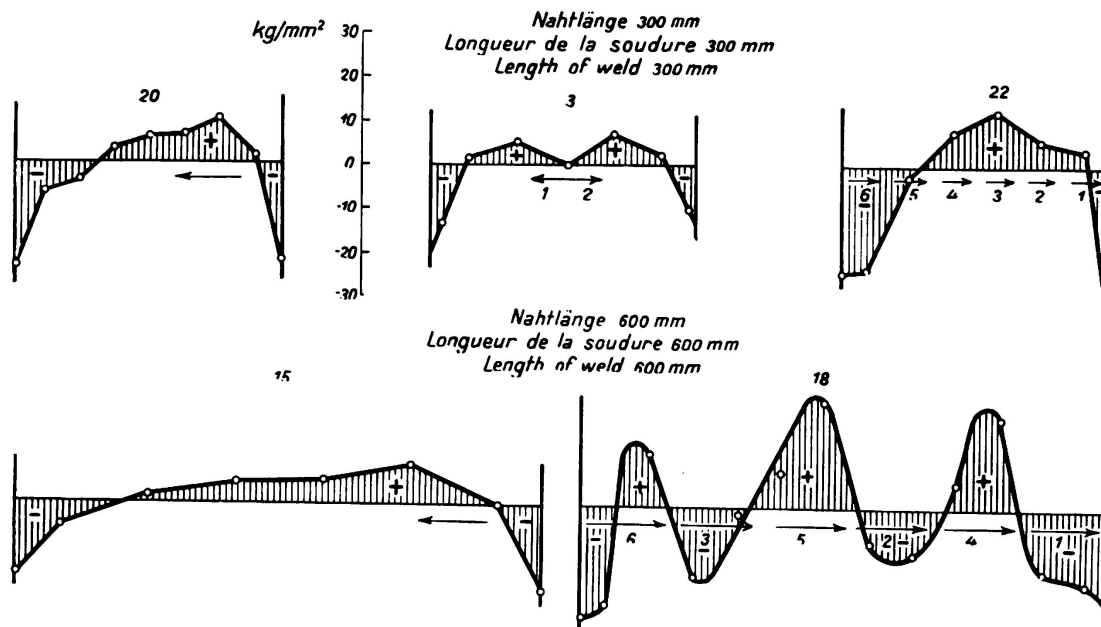


Fig. 11.

Werkstoff: St. 37. Plattendicke: 12 mm. Schweißverfahren: Lichtbogenschweißung.

Schweißdrähte: Seelendrähte Böhler-Elite. Zahl der Lagen: 3.

Schweißquerspannungen für freie Schweißung bei verschiedenen Schweißwegen.

4. Die Längsschrumpfspannungen.

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

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

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

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

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

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

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

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

5. Die Querverspannungen.

a) Äußere und innere Querverspannungen.

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

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

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

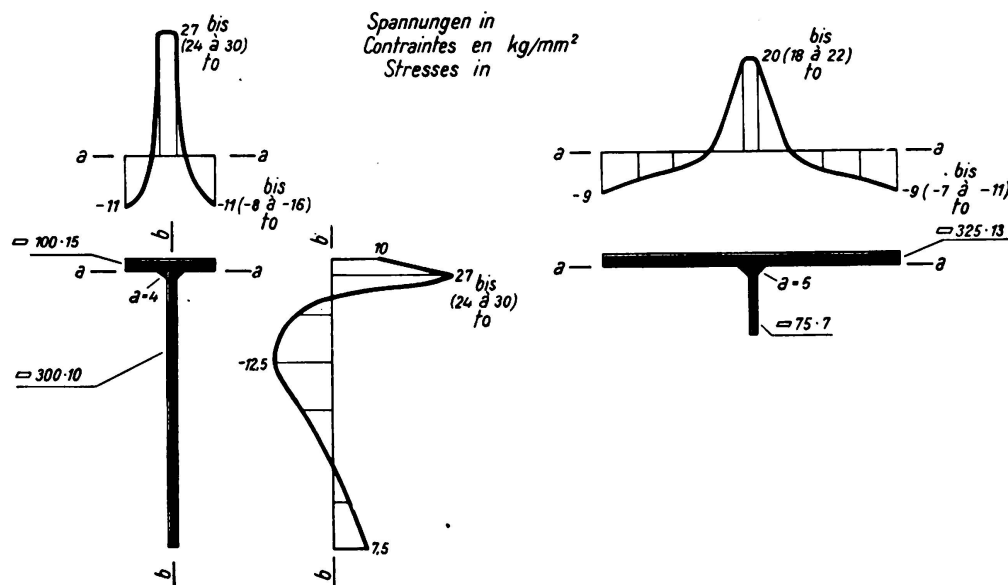


Fig. 12.

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

Schweißverfahren: Lichtbogenschweißung.

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

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

2. durch *innere Verspannungen*. Unter innerer Verspannung einer Naht verstehen wir die Verspannung zunächst frei gegeneinander beweglicher Teile durch die bereits fertiggestellten Nahtabschnitte oder Lagen, die ein querverspannungsfreies Schweißen der Naht über die ganze Länge oder über die ganze Nahthöhe unmöglich machen. Diese Spannungen entstehen durch die nicht gleichzeitig, sondern nacheinander erfolgende Einschmelzung, Erwärmung und Abkühlung der einzelnen Nahtabschnitte über die Nahtlänge und der einzelnen Lagen über die Nahthöhe;
3. einer äußeren Einspannwirkung ähnlich sind die *Verspannungen bei der Herstellung von Kehlnähten*;
4. Sonderfälle stellen die *Einschweiß- oder Aufschweißaufgaben* dar, also das Einschweißen von 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 Wärmeigenschaften der Werkstoffe.*

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

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

c) *Maßnahmen zur Herabsetzung der Verspannungswirkung.*

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

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

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

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

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

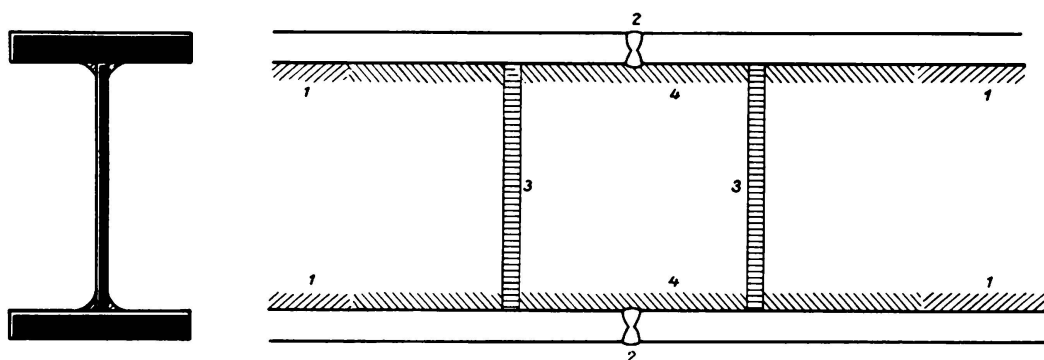


Fig. 13.

Zweckmäßige Schweißfolge bei einem Trägerstoß.

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

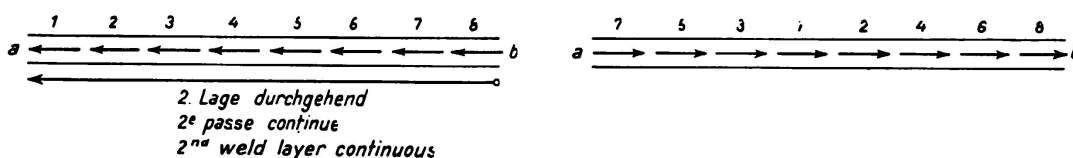


Fig. 14.

Pilgerschrittschweißung.

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

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

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

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

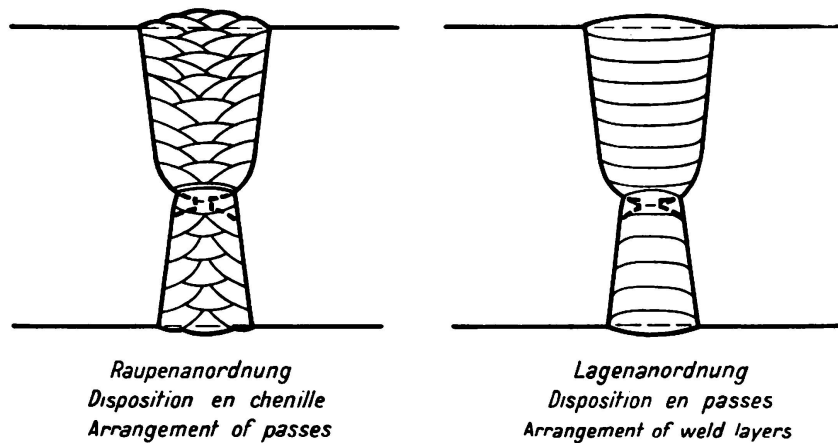


Fig. 15.

Schweißung von dicken Stumpfnähten.

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

Symmetrische oder annähernd symmetrische Nahtquerschnitte, die nach Möglichkeit wechselseitig geschweißt werden, werden allgemein bevorzugt.⁷ Hinsichtlich der Lagenzahl, über Raupenanordnung im Nahtquerschnitt und Drahtdurchmesser besteht in den verschiedenen Anwendungsgebieten der Schweißtechnik keine Einheitlichkeit. Der Behälterbau ist auf Grund langjähriger Erfahrungen in der Dickblechschweißung⁸ mehr zur Anwendung dickerer Drähte übergegangen. Die Lagendicke wird jedoch nicht übermäßig groß gewählt, nicht größer als 3 bis 4 mm, aber auch nicht zu dünn. Die Schweißung erfolgt in breiten Lagen von einer Seite des Nahtquerschnittes zur anderen. Im Stahlbau

⁷ E. Höhn, a. a. O. Fußnote, vor Fig. 3.

⁸ Joellenbeck: Elektroschweißung 8 (1936).

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

d) *Die Schrumpfspannungen bei Kehlnahtverbindungen.*

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

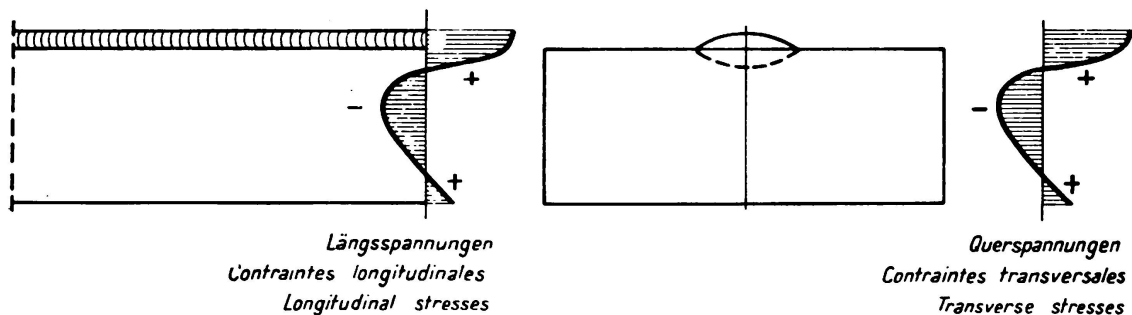


Fig. 16.

Längs- und Querspannungsanordnung beim Aufschweißen einer Raupe.

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

Die Schrumpferspannung 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 Stumpfnahverbindungen infolge der viel ungünstigeren Eigenspannungsverhältnisse einer erhöhten Reißgefahr. Die kurzen Ausführungen an dieser Stelle sollen im nächsten Abschnitt, der sich allgemein mit dieser Frage beschäftigt, ergänzt werden.

6. Die Rißgefahr.

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

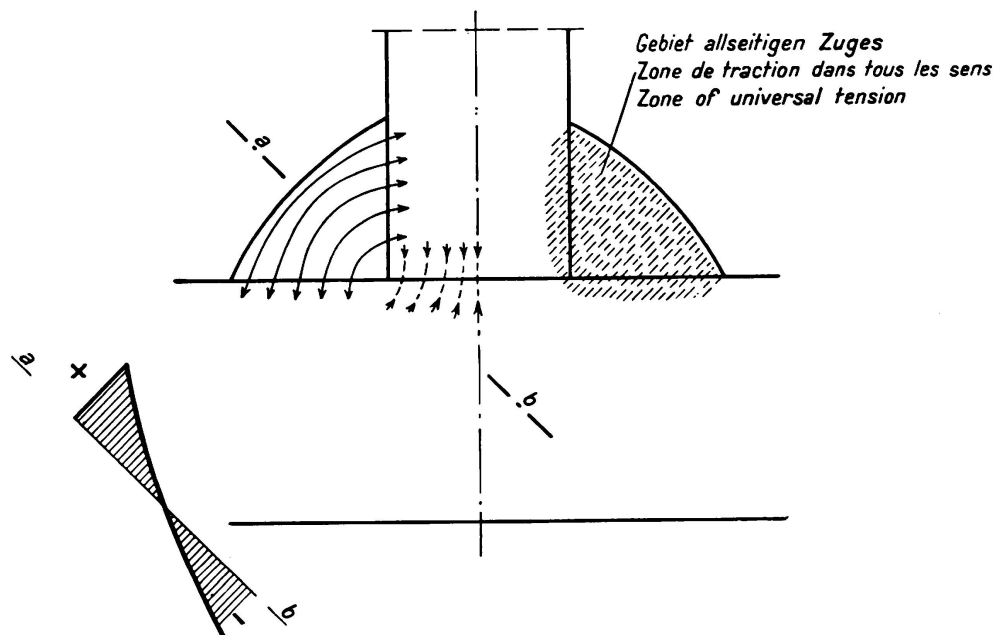


Fig. 17.

Schrumpfwirkung bei Kehlnähten.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

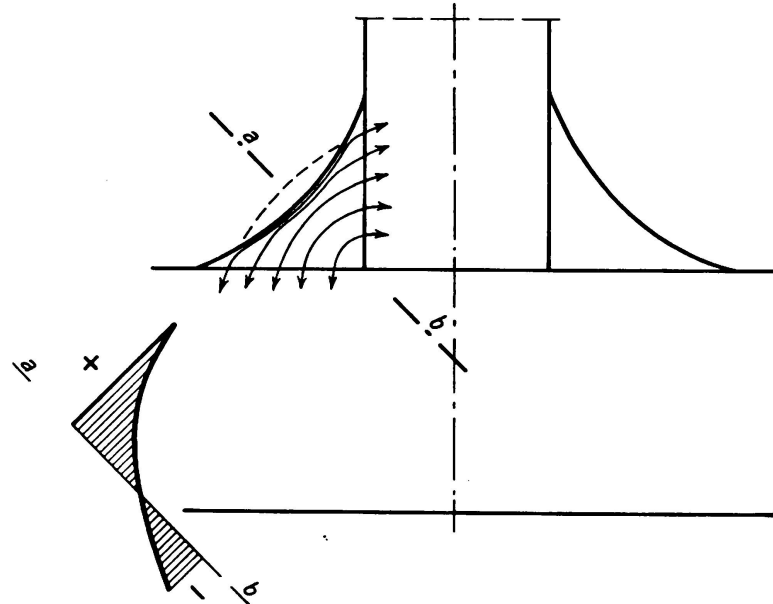


Fig. 18.

Schumpfwirkung bei ausgesprochenen Hohlkehlnähten.

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

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

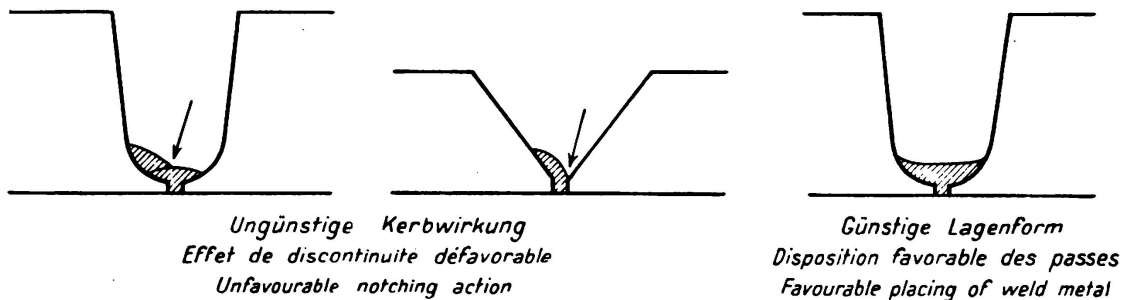


Fig. 19.

Rißgefahr bei ungünstiger Raupenform.

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

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

ausgekreuzt (Abb. 15). Zur Vermeidung von Rissen bei der Herstellung dicker Nähte sollen die Schweißarbeiten nicht unterbrochen werden, bis ein größerer Teil der Nahthöhe ausgefüllt ist. Bei wechselseitigem Schweißen unter Drehen der Teile soll zunächst auf der einen Seite eine gewisse Höhe fertiggestellt werden. Bei Einschweißung von Platten¹² um den ganzen Umfang, Werkstoff St 52, konnten Reißbildungen dadurch vermieden werden, daß jeder Abschnitt der schrittweise hergestellten Naht über die ganze Dicke (in mehreren Lagen) fertiggestellt wurde, ehe die weiteren Abschnitte in Angriff genommen wurden.

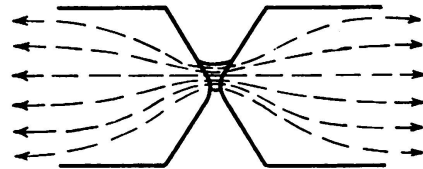


Fig. 20.

Gefährdung der Wurzellagen infolge ungünstiger Kraftwirkung.

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

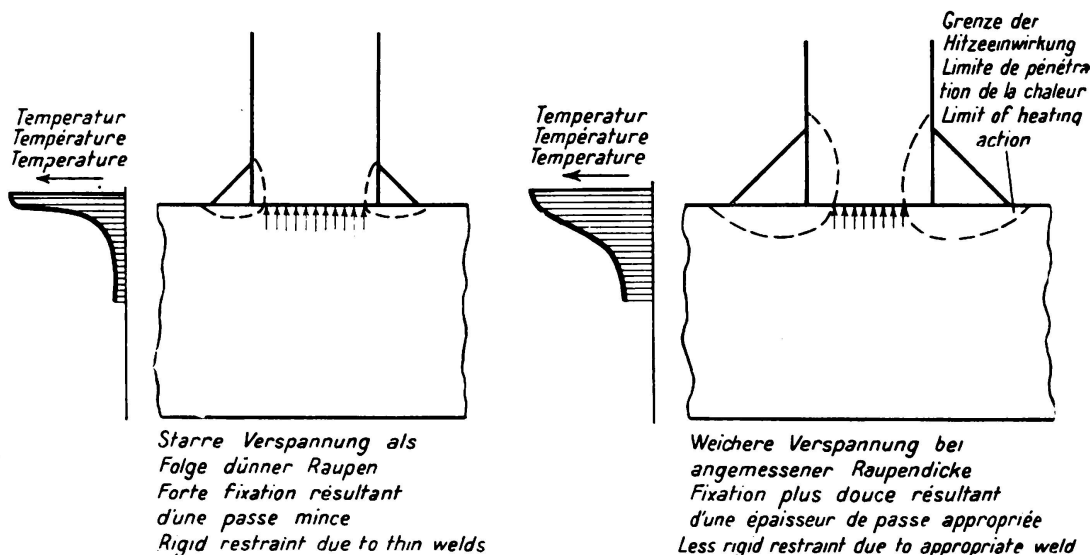


Fig. 21.

Verspannungswirkung bei Kehlnähten.

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

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

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

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

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

a) Wärmemaßnahmen.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

b) *Das Hämmern.*

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

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

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

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

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

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

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

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

Zusammenfassung.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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