

DIE SCHRUMPUNG DER SCHWEISSNÄHTE*

Von

I. BIZINGER

Mechanisch-Technologisches Institut der Technischen Universität, Budapest

(Eingegangen am 20 Februar 1959)

An Schweißnähten treten unter dem Einfluß der beim Schweißen entstehenden Wärme Schrumpfungen auf. Die wissenschaftliche Arbeit zur Aufklärung der Ursachen dieser Schrumpfung und der durch sie verursachten inneren Spannungen gehen bis auf den Beginn der dreißiger Jahre zurück. Das Schrifttum enthält zahlreiche Berichte und Abhandlungen über die Ergebnisse vielseitiger Forschungen, die sich jedoch eher auf die in den Schweißnähten auftretenden inneren Spannungen beziehen, während das Problem der Schrumpfung selbst weniger eingehend behandelt wird, was sich einfach daraus erklärt, daß den Schrumpfungsspannungen vom Gesichtspunkt der Sicherheit aus eine wesentlich größere Bedeutung beizumessen ist als der Schrumpfung selbst. Dennoch kann der Schrumpfung als der primären Erscheinung eine besondere Wichtigkeit nicht abgesprochen werden, bildet doch deren Kenntnis die Voraussetzung für die Untersuchung der durch sie ausgelösten weiteren Erscheinungen.

Sowohl beim Lichtbogen- als auch beim Gasschmelzschweißen ist die jeweilige Schmelzstelle der am stärksten erhitzte Punkt, von dem sich die Wärme nach den Gesetzen der Wärmeleitung auf den Grundwerkstoff überträgt. Der Charakter des Wärmebereiches an der Schweißstelle bzw. in deren unmittelbarer Umgebung ist für gewöhnlich dreidimensioniert, während er in größerem Abstand von der Schweißstelle von Abmessung und Gestalt des Arbeitsstückes abhängt. Die Wärmeverteilung kann mithin bei dicken Werkstücken stets als dreidimensioniert, bei dünneren Blechen als zweidimensioniert, bei stabartigen Werkstoffen hingegen als eindimensioniert angesehen werden.

Demgemäß lassen sich Schrumpfungen in Richtung der Stabachse (stabaxiale), ferner Quer-, Längs- und Winkelschrumpfungen unterscheiden.

Die vorliegende Untersuchung setzt sich ein dreifaches Ziel:

1. Sammlung und Systematisierung der auffindbaren Schrumpfungsgleichungen und Ermittlung der Bedingungen, unter denen die einzelnen Formeln gültig sind.

* Diplomarbeit im Auftrag des Mechanisch-Technologischen Instituts (Professor: Dr. L. GILLEMOT.)

2. Auf dem Wege von Messungen die Frage zu beantworten, welche der Gleichungen die Meßergebnisse am besten annähert, d. h. als die genaueste anzusehen ist, und schließlich

3. die Untersuchung jener Schlußfolgerungen, zu denen die einzelnen Autoren auf Grund ihrer Formeln gelangt sind.

Schrumpfungen in Richtung der Stabachse

Stabaxiale Schrumpfung liegt bei einem normal auf die Stabachse erfolgenden Schweißen stabartiger Werkstoffe vor, wobei zwischen der Schrumpfung frei beweglicher und derjenigen eingespannter Stäbe zu unterscheiden ist.

1. Schrumpfung bei frei beweglichen Stäben

Zwei Stäbe werden im Schmelzschweißverfahren stumpf aneinandergeschweißt, wobei nur die stabaxiale Schrumpfung in Betracht gezogen wird.

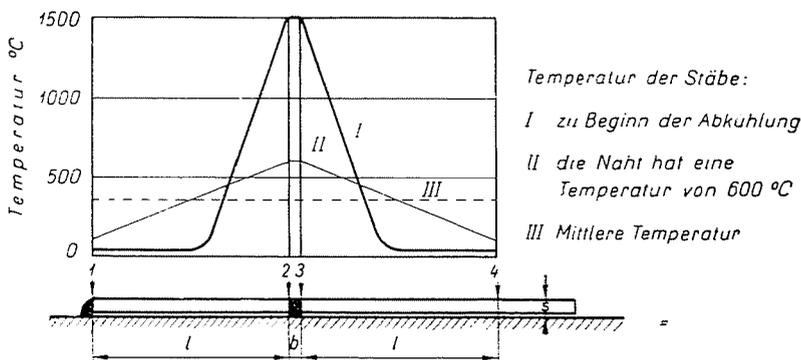


Bild 1. Temperaturverteilung in der Umgebung von Schmelzschweißstellen an Stahlstäben

Um die Bewegungen auf einen fixen Punkt beziehen zu können, wird der linksseitige Stab an einem Ende an die Unterlagsplatte angeschweißt. Den Verlauf der Schrumpfung veranschaulicht Bild 1.

Unter dem Einfluß der Schweißung erhitzen sich die Stäbe den Stoßfugen entlang, und die Wärme breitet sich gegen die Stabenden zu aus. Eine feste Verbindung kommt nicht zustande, solange sich die Schmelze in flüssigem oder teigartigem Zustand befindet. Erst nach Abkühlung auf etwa 600° C beginnt die Schweißbindung Bewegungen auf die Stäbe zu übertragen. Bei höheren Temperaturen überschreiten die Schrumpfspannungen die Warmstreckgrenze des Werkstoffes und rufen in diesem plastische Verformungen hervor. Während des Schweißens verschiebt sich unter dem Einfluß der Wärmeübertragung Punkt 2 nach rechts, Punkt 3 hingegen nach links, so daß sich die Stoßfuge verengt.

Jetzt beginnt die Schrumpfung. Die Bindung wird fest, die Stäbe kühlen sich zusehends ab und die Temperatur gleicht sich mehr und mehr aus. Die mittlere Temperatur sinkt weiter ständig ab, und gleichzeitig tritt eine Verkürzung der Stäbe ein. Nach vollständiger Abkühlung kehrt Punkt 2 wieder in seine ursprüngliche Lage zurück, wobei Punkt 3 infolge der festen Vereinigung die gleiche Bewegung mitzumachen gezwungen ist. Darüber hinaus nähert sich Punkt 3 dem Punkt 2 noch um jenen Wert, der beim Abkühlen des geschmolzenen Werkstoffes von 600° C auf 15° C entsteht. Während der Abkühlung nähert sich jedoch nicht nur Punkt 3 dem Punkt 2, sondern auch Punkt 4 dem Punkt 3. Der Wert der Annäherung zwischen den Punkten 1 und 4 stellt die Gesamtschrumpfung dar.

Soweit die grundlegenden Erscheinungen der stabaxialen Schrumpfung.

2. Schrumpfung bei eingespannten Stäben

Werden zwei Stäbe unter den in Punkt 1 beschriebenen Voraussetzungen aneinandergeschweißt, jedoch an beiden Enden fix eingespannt, dann ergibt sich dieselbe Wärmeausdehnung der Stäbe wie im vorangegangenen Fall, mithin wird aus der Ausdehnung eine Verengung der Schweißfuge resultieren. Die hierauf folgende Schrumpfung wird durch die Dehnung des Werkstoffes aufgenommen.

3. Formeln für Schrumpfungen in Richtung der Stabachse

Die hier folgenden Gleichungen beziehen sich auf frei bewegliche Stäbe.

a) Formel von R. MALISIUS [1]:

$$\Delta l = \lambda_1 \cdot k \cdot \frac{Q}{s} + \lambda_2 \cdot b,$$

wo

Δl = die stabaxiale Schrumpfung in mm,

λ_1 = der lineare Wärmeausdehnungsbeiwert des Grundwerkstoffes in jenem Zustandsabschnitt, wo die Temperatur t des Grundwerkstoffes um den Wert von $\frac{t' - t''}{2}$ ansteigt, wobei t' die Temperaturgrenze

des elastischen Zustandes und t'' die Raumtemperatur bedeutet,

λ_2 = der lineare Wärmeausdehnungsbeiwert der Schmelze, während deren Temperatur von t auf t' steigt,

Q = Gesamtquerschnitt von Schweißfuge und Schweißbraupe in mm²,

s = Stärke der aneinanderzuschweißenden Stäbe in mm,

b = durchschnittliche Stoßfugenbreite in mm,

k = ein für die unterschiedlichen Schweißverfahren charakteristischer Beiwert.

b) Die Formel von F. WÖRTMANN—W. MOHR [2] schreibt sich zu

$$\Delta l = \frac{a \cdot g \cdot k \cdot 10^5}{c \cdot s \cdot \gamma} + 0,0103 \cdot b',$$

wenn

- Δl = die stabaxiale Schrumpfung in mm,
 a = der mittlere Wärmeausdehnungsbeiwert des Eisens,
 g = das Gewicht des in einer Lage auf 1 cm Nahtlänge eingeschmolzenen Zusatzwerkstoffen in Gramm,
 k = die durch 1 g des Werkstoffes übertragene Wärmemenge in kcal,
 c = die mittlere spezifische Wärme des Eisens in kcal/kg,
 s = die Stärke der aneinanderzuschweißenden Bleche in mm,
 γ = die Wichte in kg/dm³, während,
 b' = gemäß Bild 2 zu deuten ist.

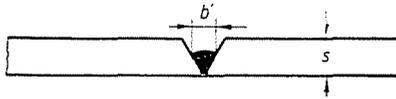


Bild 2. Deutung von b' in der Wörtmann—Mohrschen Formel

c) Von WERNER GILDE [3] wurde folgende Formel eingeführt :

$$\Delta l = \frac{0,24 \cdot 6000 \cdot k \cdot a \cdot U \cdot I \cdot a}{s \cdot u \cdot \lambda}$$

in der

- Δl = die stabaxiale Schrumpfung in mm,
 k = eine Konstante, deren Wert in jedem Fall experimentell ermittelt werden muß,
 a = der mittlere Wärmeausdehnungsbeiwert des Eisens,
 U = die Spannung in V,
 I = die Stromstärke in A,
 a = die Temperaturleitzahl in cm²/sec,
 s = Blechstärke in mm,
 u = Wanderungsgeschwindigkeit des Lichtbogens der Schweißnaht entlang in cm/sec,
 λ = Wärmeleitzahl in kcal/cm sec. °C.

Querschrumpfung

Hier unterscheidet man ebenfalls zwei Fälle, u. zw.

1. Querschrumpfung bei frei beweglichen Blechen.
2. Querschrumpfung bei eingespannten Blechen.

1. Querschrumpfung bei frei beweglichen Blechen

Die beiden in Bild 3 dargestellten, aufliegenden, frei beweglichen Bleche werden der Linie (AB) entlang fortschreitend zusammengeschweißt. Hierbei ergibt sich infolge der Schweißung in der Schweißfuge eine nach vorn fortschreitende Wärmequelle, die die Bleche erhitzt. Während beim Aneinanderschweißen von Stäben nur eine axial gerichtete Wärmeableitung nach rechts

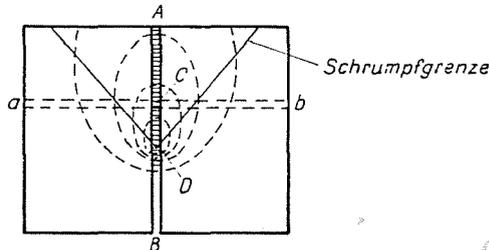


Bild 3. Temperaturverteilung beim Schweißen von Blechen

und links von der Schweißfuge erfolgt, mithin die gesamte Wärmemenge auf die quergerichtete Wärmeausdehnung der Fuge wirkt, wird die Wärme bei Blechen über die ganze Blechfläche strahlenförmig abgeleitet. Aus diesem Grunde setzt sich die Gesamtschrumpfung in einem beliebigen Punkt C der Naht aus drei Komponenten zusammen :

1. aus der Wärmeausdehnung des Blechstreifens (ab),
2. aus der Schrumpfung der Schmelze im Punkt C,

3. aus dem mittelbaren Einfluß der Schrumpfung des zuvor geschweißten Teiles der Naht.

Die beiden ersten Komponenten der Gesamtschrumpfung werden unmittelbare Schrumpfung genannt, und da der Blechstreifen (ab) als Stab betrachtet werden kann, entspricht die Schrumpfung dieser Komponenten der stabaxialen Schrumpfung.

Die dritte Komponente der Gesamtschrumpfung, die aus der Rückwirkung des zuvor geschweißten Nahtteiles stammende, sogenannte mittelbare Schrumpfung, ist umso größer, je größer die unmittelbare Schrumpfung des vorangegangenen Nahtabschnittes ist.

2. Querschrumpfung bei eingespannten Blechen

Es seien die beiden Bleche parallel zur Schweißfuge und in einem gewissen Abstand von dieser starr eingespannt. Eine mittelbare Schrumpfung gemäß 1. kann in diesem Fall nicht eintreten, vielmehr kommt nur die unmittelbare zustande, deren freien Ablauf die Einspannung verhindert, weshalb diese durch die Dehnung aufgenommen werden muß.

3. Formeln für die Ermittlung der Querschrumpfung

Mit der Querschrumpfung befaßt sich nur R. MALISIUS [1], der zwei Formeln empfahl und ein gut verwendbares Diagramm konstruierte.

a) Für Bleche mit langer Keilnaht, die nach beliebigem Verfahren mit einer Lage ohne Unterbrechung aneinandergeschweißt werden, gilt die Formel

$$\Delta l = \left(0,6 \lambda_1 \cdot k \cdot \frac{Q}{s} + \lambda_2 b \right) \left(1 + \frac{L}{e} \right),$$

deren Bezeichnungen die gleichen sind wie diejenigen der Malisius-Formel für die stabaxiale Schrumpfung, ausgenommen L und e , und zwar bezeichnet hier L die Gesamtlänge der Naht, e die Länge des nicht unter 100°C abgekühlten Teiles der Naht.

Die Formel hat den großen Nachteil, daß sich für e ein allgemein gültiger Wert nicht angeben läßt.

b) In einem beliebigen Punkt der Naht läßt sich die Schrumpfung beim Pilgerschrittschweißen anhand der Formel

$$\Delta l = \left(0,6 \lambda_1 \cdot k \cdot \frac{Q}{s} + \lambda_2 \cdot b \right) \cdot 1,3$$

berechnen.

Diese Gleichung ist für jene im Pilgerschrittverfahren durchgeführten Schweißungen gültig, bei denen die beiden Bleche mit parallelem Stoß stark aneinanderheftet oder eingespannt werden. Beim fortlaufenden Lichtbogen-, Argonarc- oder Gasschweißen darf diese Gleichung nur dann verwendet werden, wenn es sich um kurze Nähte handelt und die mittelbare Schrumpfung nicht zu große Werte annehmen kann.

Die einzelnen Bezeichnungen haben dieselbe Bedeutung wie die in Punkt a) angegebenen Faktoren.

Diese Formel erweist sich in der Praxis als sehr verwendbar.

Bild 4 veranschaulicht den Verlauf der Schrumpfung bei gut aneinandergehefteten, im Pilgerschritt geschweißten Nähten in Abhängigkeit von der Blechstärke und der Schweißnahtform.

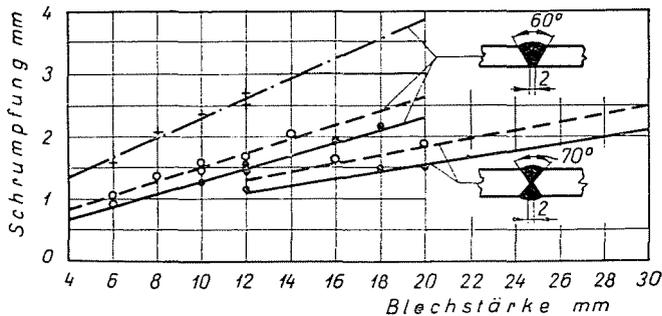


Bild 4. Verlauf der Schrumpfung in Abhängigkeit von Blechstärke und Schweißnahtform

Bezeichnungen in Bild

| | Errechnete Werte | Meßwerte |
|---|------------------|----------|
| Lichtbogenschweißen mit blanker Elektrode | — — — — — | . |
| Lichtbogenschweißen mit umhüllter Elektrode | - - - - - | 0 |
| Gasschweißen | - . - . - . - | + |

Die errechneten Werte wurden anhand der Formel

$$\Delta l = \left(0,6 \cdot \lambda_1 \cdot k \cdot \frac{Q}{s} + \lambda_2 \cdot b \right) \cdot 1,3$$

ermittelt, in der

Q = Gesamtquerschnitt von Schweißnaht und Schweißbraupe,

s = Stärke der aneinanderzuschweißenden Bleche in mm,

b = durchschnittliche Breite der Schweißnaht in mm

$$\lambda_1 = 0,0044,$$

$$\lambda_2 = 0,0093,$$

bei blanker Elektrode : $k = 43$

bei umhüllter Elektrode : $k = 50$

beim Gasschweißen : $k = 75$

Längsschrumpfung

Die Schweißnaht verkürzt sich in ihrer Längsrichtung. Auch die hierbei auftretende Maßverminderung wird Längsschrumpfung genannt (Bild 5).

Eine Formel für diese Art der Schrumpfung konnte nicht gefunden werden, doch benutzen WÖRTMANN—MOHR [2] die Grundgleichung $\Delta l = a \cdot l \Delta T$ im Zusammenhang mit einem konkreten Beispiel zur Berechnung der Längsschrumpfung.

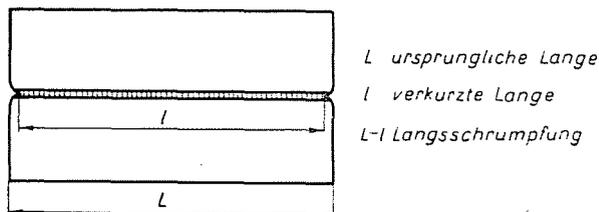


Bild 5. Deutung der Längenverkürzung infolge Schrumpfung

Winkelschrumpfung

Die Nähte schrumpfen nicht nur in Längs- und Querrichtung, vielmehr tritt auch eine Verdrehung der Bleche zueinander um die Längsachse der Naht ein, wenn die Stoßfuge nicht gleichförmig ist, wie etwa bei

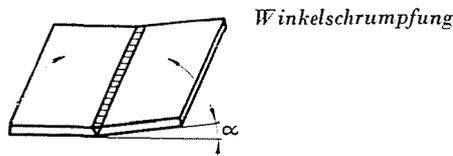


Bild 6. Deutung der Winkelschrumpfung

V-förmigen Schweißnähten (Bild 6). Diese Erscheinung nennt man Winkelschrumpfung.

Auch für die Winkelschrumpfung enthält das Schrifttum keine Formel, doch gaben R. MALISIUS [4] und C. FUCHS [5] Ergebnistabellen bekannt.

Zielsetzungen für die Untersuchung der Formeln für Schrumpfungen in Richtung der Stabachse

Die Ergebnisse des ersten Schrittes der gesetzten Aufgabe sind in Obigen zusammengefaßt, der Systematisierung der Formeln sollen jedoch einige Bemerkungen vorausgeschickt werden, so vor allem die Feststellung, daß die Begriffe der stabaxialen und der Querschrumpfung nur bei MALISIUS eindeutig getrennt erscheinen, während die Formel von WÖRTMANN—MOHR bloß für eingespannte Bleche gültig ist, bei denen aber eine mittelbare Schrumpfung nicht auftreten kann. Aus diesem Grunde ist diese Formel bei frei beweglichen Blechen im wesentlichen auch für die stabaxiale Schrumpfung anwendbar. WERNER GILDE läßt bei der Ableitung seiner Formel die mittelbare Schrumpfung gleichfalls unberücksichtigt und zieht nur die durch die Temperaturänderung verursachte, im wesentlichen allerdings ebenfalls stabaxiale Schrumpfung in Betracht.

Der zweite und dritte Teil der Aufgabe soll auf Grund von Messungen gemeinsam gelöst werden, u. zw. zuerst hinsichtlich der stabaxialen und sodann bezüglich der Querschrumpfung.

Die Untersuchungen wurden an frei beweglichen Stäben vorgenommen, es haben mithin für diese sowohl die Formeln von MALISIUS und WÖRTMANN—MOHR als auch die Gleichung von GILDE Gültigkeit.

Im weiteren sollen nun jene frei wählbaren, d. h. von der Konstruktion unabhängigen Faktoren zusammengefaßt werden, die den einzelnen Autoren gemäß die Schrumpfung beeinflussen.

1. Meßreihe

Pluspol des Gleichstromgenerators mit dem Arbeitsstück verbunden

| Messung | Lage | I A | U V | Schweiß- dauer sec. | Elektroden- durchmesser mm | Abge- schmol- zene Länge mm | Lagen- dicke mm | Gemessener Winkel | Gemessener Wert, mm |
|---------|-----------|--------|--------|---------------------------|----------------------------------|---|-----------------------|----------------------|------------------------|
| 1. | 1. Wurzel | 115 | 20 | 13 | 2,5 | 80 | 3 | 0°32' | 0,39 |
| | 2. Lage | 125 | 21 | 17,5 | 3,25 | 72 | 5 | 0°37' | 0,25 |
| | 3. Lage | 140 | 22 | 55 | 4,00 | 183 | 11 | 1°20' | 0,79 |
| 2. | 1. Wurzel | 115 | 20 | 11 | 2,5 | 72 | 2,8 | 0°27' | 0,59 |
| | 2. Lage | 125 | 21 | 18 | 3,25 | 78 | 5 | 0°37' | 0,26 |
| | 3. Lage | 140 | 22 | 63 | 4,00 | 195 | 11 | 1°20' | 0,81 |
| 3. | 1. Wurzel | 115 | 20 | 9 | 2,5 | 60 | 3,5 | 1°5' | 0,37 |
| | 2. Lage | 125 | 21 | 26 | 3,25 | 105 | 6,0 | 1°25' | 0,73 |
| | 3. Lage | 140 | 22 | 58 | 4,00 | 189 | 11 | 2°7' | 0,71 |
| 4. | 1. Wurzel | 115 | 20 | 11 | 2,5 | 76 | 3,8 | 0°50' | 0,40 |
| | 2. Lage | 125 | 21 | 27 | 3,25 | 106 | 5,5 | 1°10' | 0,81 |
| | 3. Lage | 140 | 22 | 65 | 4,00 | 212 | 11 | 2°0' | 0,90 |
| 5. | 1. Wurzel | 115 | 20 | 11 | 2,5 | 79 | 3,2 | 0°40' | 0,39 |
| | 2. Lage | 125 | 21 | 56 | 3,25 | 162 | 7,5 | 1°10' | 0,78 |
| | 3. Lage | 140 | 22 | 50 | 4,00 | 145 | 10,5 | 1°30' | 0,50 |
| 6. | 1. Wurzel | 115 | 20 | 11 | 2,5 | 78 | 3,5 | 0°35' | 0,49 |
| | 2. Lage | 125 | 21 | 57 | 3,25 | 156 | 7,5 | 1°10' | 0,92 |
| | 3. Lage | 140 | 22 | 42 | 4,00 | 135 | 10,5 | 1°40' | 0,50 |

Laut MALISIUS hängt das Ausmaß der Schrumpfung

1. ausschließlich von der Größe des Lagenquerschnitts (Q) und
2. vom Schweißverfahren ab.

Bei frei beweglichen Blechen verursacht nach Ansicht von MALISIUS nur die Schweißung der ersten Lage eine Schrumpfung.

Laut WÖRTMANN—MOHR sind für das Ausmaß der Schrumpfung maßgebend :

1. die Menge des auf einmal abgeschmolzenen Stoffes (g),
2. die Frage, ob der negative oder der positive Pol des Gleichstromes oder aber Wechselstrom mit dem Werkstück verbunden ist.

Das k der Wörtmann-Mohrschen Formel nimmt nämlich folgende Werte an :

bei Gleichspannung, sofern der positive Pol mit dem Werkstück verbunden ist, wird

$$k = 1,79,$$

2. Meßreihe

Negativer Pol des Gleichstromgenerators mit dem Arbeitsstück verbunden

| Messung | Lage | I A | U V | Schweiß- dauer sec. | Elektroden- durchmesser mm | Abge- schmol- zene Länge mm | Lagen- dicke mm | Gemessener Winkel | Gemessener Wert, mm |
|---------|-----------|--------|--------|---------------------------|----------------------------------|---|-----------------------|----------------------|------------------------|
| 1. | 1. Wurzel | 115 | 20 | 13 | 2,5 | 95 | 3,8 | 0°25' | 0,37 |
| | 2. Lage | 125 | 21 | 25 | 3,25 | 90 | 5,3 | 0°30' | 0,39 |
| | 3. Lage | 145 | 22 | 61 | 4,00 | 215 | 10,5 | 1°20' | 0,88 |
| 2. | 1. Wurzel | 115 | 20 | 14 | 2,5 | 96 | 3,5 | 1°10' | 0,43 |
| | 2. Lage | 125 | 21 | 24 | 3,25 | 88 | 5,75 | 1°15' | 0,39 |
| | 3. Lage | 145 | 22 | 60 | 4,00 | 187 | 10,5 | 1°57' | 0,79 |
| 3. | 1. Wurzel | 115 | 20 | 13 | 2,5 | 75 | 3,2 | 0°25' | 0,36 |
| | 2. Lage | 125 | 21 | 36 | 3,25 | 152 | 6,5 | 0°35' | 0,76 |
| | 3. Lage | 145 | 22 | 62 | 4,00 | 195 | 11 | 1°5' | 0,60 |
| 4. | 1. Wurzel | 115 | 20 | 11 | 2,5 | 70 | 3,3 | 0°30' | 0,49 |
| | 2. Lage | 125 | 21 | 29 | 3,25 | 115 | 6,2 | 0°50' | 0,63 |
| | 3. Lage | 145 | 22 | 65 | 4,00 | 215 | 11 | 1°40' | 0,86 |
| 5. | 1. Wurzel | 115 | 20 | 12 | 2,5 | 77 | 3,5 | 0°35' | 0,36 |
| | 2. Lage | 125 | 21 | 42 | 3,25 | 178 | 8,2 | 1°35' | 1,26 |
| | 3. Lage | 145 | 22 | 52 | 4,00 | 166 | 10,5 | 1°55' | 0,70 |
| 6. | 1. Wurzel | 115 | 20 | 12 | 2,5 | 77 | 3,2 | 0°30' | 0,45 |
| | 2. Lage | 125 | 21 | 41 | 3,25 | 172 | 2,75 | 1°30' | 1,09 |
| | 3. Lage | 145 | 22 | 48 | 4,00 | 150 | 12 | 2°10' | 0,72 |

bei Gleichspannung, wenn der negative Pol mit dem Werkstück verbunden wird, ist

$$k = 1,01,$$

während bei Schweißarbeiten mit Wechselstrom

$$k = 1,15$$

beträgt.

WÖRTMANN—MOHR lassen die Frage offen, ob bloß die erste Lage oder auch die weiteren Lagen Schrumpfungen verursachen.

Nach GILDE ist das Ausmaß der Schrumpfung

1. von den Kenndaten der Schweißung (U, I, u),

2. vom Schweißverfahren, (k) und

3. beim Mehrlagenschweißen von der Lagendicke abhängig.

Seiner Ansicht nach verursacht jede Lage Schrumpfungen, wie dies aus den Ergebnissen seiner Messungen hervorgeht.

3. Meßreihe

Wechselstromschweißung

| Messung | Lage | I A | U V | Schweiß- dauer sec. | Elektroden- durchmesser mm | Abge- schmol- zene Länge mm | Lagen- dicke mm | Gemessener Winkel | Gemessener Wert, mm |
|---------|-----------|--------|--------|---------------------------|----------------------------------|---|-----------------------|----------------------|------------------------|
| 1. | 1. Wurzel | 115 | 25 | 11 | 2,5 | 70 | 3,0 | 1°0' | 0,43 |
| | 2. Lage | 125 | 25 | 21 | 3,25 | 89 | 5,0 | 1°5' | 0,34 |
| | 3. Lage | 138 | 29 | 63 | 4,00 | 194 | 10,5 | 1°45' | 0,87 |
| 2. | 1. Wurzel | 115 | 25 | 12 | 2,5 | 75 | 3,2 | 0°15' | 0,59 |
| | 2. Lage | 125 | 25 | 13 | 3,25 | 77 | 5,2 | 0°25' | 0,22 |
| | 3. Lage | 138 | 29 | 62 | 4,00 | 175 | 11 | 1°0' | 0,66 |
| 3. | 1. Wurzel | 115 | 25 | 13 | 2,5 | 80 | 3 | 0°35' | 0,56 |
| | 2. Lage | 125 | 25 | 25 | 3,25 | 102 | 6,5 | 0°55' | 0,43 |
| | 3. Lage | 138 | 29 | 53 | 4,00 | 138 | 10,5 | 1°15' | 0,30 |
| 4. | 1. Wurzel | 115 | 25 | 12 | 2,5 | 73 | 3,5 | 0°35' | 0,40 |
| | 2. Lage | 125 | 25 | 26 | 3,25 | 105 | 6,5 | 0°55' | 0,43 |
| | 3. Lage | 138 | 29 | 53 | 4,00 | 163 | 10,5 | 1°30' | 0,58 |
| 5. | 1. Wurzel | 115 | 25 | 12 | 2,5 | 75 | 3,5 | 0°35' | 0,40 |
| | 2. Lage | 125 | 25 | 50 | 3,25 | 195 | 8,5 | 1°0' | 0,90 |
| | 3. Lage | 138 | 29 | 45 | 4,00 | 135 | 10,5 | 1°10' | 0,25 |
| 6. | 1. Wurzel | 115 | 25 | 12 | 2,5 | 74 | 4,0 | 0°35' | 0,35 |
| | 2. Lage | 125 | 25 | 48 | 3,25 | 197 | 8,5 | 1°5' | 1,03 |
| | 3. Lage | 138 | 29 | 45 | 4,00 | 137 | 11,0 | 1°25' | 0,32 |

Es erscheint somit zweckmäßig, die Untersuchungen sowohl für Gleich- als auch für Wechselstrom-Schweißung vorzunehmen u. zw. derart, daß vorerst die Wurzel geschweißt und sodann die weiteren Lagen verdickt werden, wobei jeder anderweitige Koeffizient möglichst auf konstantem Wert gehalten wird.

Auf diese Weise läßt sich klarstellen :

1. ob Art oder Polarität des Stromes die Schrumpfung beeinflusst,
2. ob bloß die erste Lage oder auch die weiteren Lagen Schrumpfungen verursachen,
3. welche der Formeln die Meßergebnisse am besten annähert.

Meßvorrichtung und Beschreibung der Messungen

Die Meßvorrichtung ist in dem hier folgenden Bild 7 schematisch dargestellt.

Im Zuge der Messungen kam das Bestreben zur Geltung, die Wurzelagenstärke bei jeder Messung auf demselben Wert zu halten. Die zweite Lage wurde durch Verlangsamung der Schweißgeschwindigkeit verdickt, u. zw.

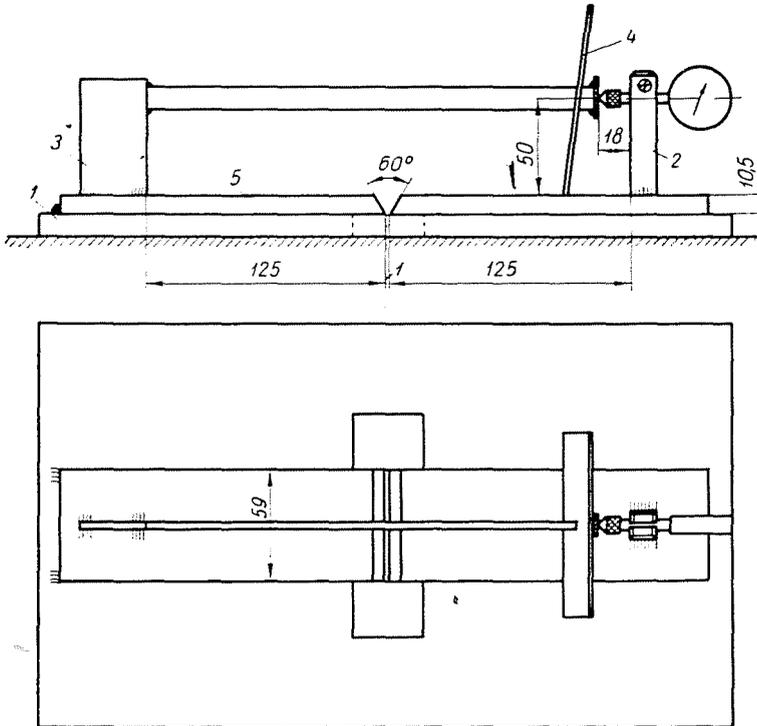


Bild 7. Vorrichtung zum Messen der Schrumpfung: 1. Unterlagsplatte; 2. Indikatorstand; 3. Arm; 4. Schutzblech; 5. Prüfstück

derart, daß die Lagendicke beim ersten und zweiten Messen $1/3$, beim dritten und vierten Messen die Hälfte und bei der fünften und sechsten Messung $2/3$ des Unterschiedes zwischen Blechstärke und Lagendicke an der Wurzel betrage. Durch Aufschweißen der dritten Lage wurde die Schweißfuge gänzlich ausgefüllt.

Diese Reihenmessungen wurden derart vorgenommen, daß zuerst der positive, sodann der negative Pol des Gleichstromes und schließlich Wechselstrom an das Werkstück gelegt wurde.

Bei den Messungen wurden Indikatoren $1/100$ benützt.

Der Neigungswinkel wurde mit einem Nonius-Winkelmesser ermittelt.

Die Schweißarbeit wurde stets von demselben gutgeschulten Schweißer verrichtet.

Kenndaten des untersuchten Bleches :

| | |
|-------------------|---------------------------------|
| Blechdicke | 10,5 mm |
| Härte HB | 132 kg/mm ² |
| hiervon | |
| Bruchfestigkeit | $\sigma_B = 44 \text{ kg/mm}^2$ |
| Kohlenstoffgehalt | $C = 0,2\%$ |

Ausbildung des Probestückes gemäß Bild 7. Verwendet wurden Elektroden ES2. Die Meßergebnisse sind in den drei Tabellen auf S. 131—133 zusammengefaßt.

In die Tabellen wurden nur die bei einwandfreier Schweißnaht ermittelten Meßergebnisse eingetragen. Kamen mit freiem Auge erkennbare Schweißfehler vor, so wurde die Schweißung wiederholt.

Beim Messen der Schrumpfung wurde der Indikator um 5 mm eingedrückt und so eingespannt. Nach Abkühlung des Probestückes wurde die Abweichung von dieser eingestellten Lage abgelesen. Die hierbei gewonnenen Meßwerte figurieren in den Tabellen (gemessener Wert).

Wegen der Winkelschrumpfung ließ sich die Größe der gemessenen Schrumpfung nicht direkt ablesen, vielmehr mußte der sogenannte Meßwert um den durch die Winkelschrumpfung verursachten Wert korrigiert werden, und erst das so erhaltene Ergebnis ergab den gemessenen Wert der stabaxialen Schrumpfung.

Berechnung der Korrektur

Bezeichnungen : H = Korrektionswert

M = gemessener Wert

a = Winkelschrumpfung

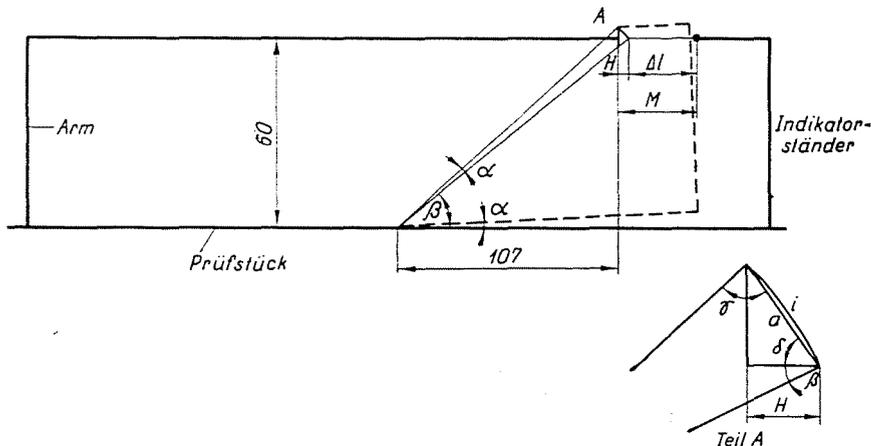


Bild 8. Deutung der auf Grund der Kenndaten der Meßvorrichtung berechneten Korrektur

Aus den Kenndaten der Meßvorrichtung gemäß Bild 8 folgt, daß

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{60}{107} = 0,56$$

$$\beta = 29^{\circ}20'.$$

Setzt man $\alpha = 1^{\circ}$, dann wird

$$\gamma = \frac{180 - 1}{2} = 89^{\circ}30'$$

$$\delta = \gamma - \beta = 89^{\circ}30' - 29^{\circ}20' = 60^{\circ}10'$$

$$a \approx i = r \cdot a$$

$$\cos \delta = \frac{H}{a}$$

$$H = a \cdot \cos \delta = r \cdot a \cdot \cos \delta$$

$$r = \sqrt{10,7^2 + 6^2} = \sqrt{151} = 12,3 \text{ cm}$$

$$H = 123 \cdot a \cdot 0,498 = 61,1 \cdot a, \text{ wenn } a = 1^{\circ}$$

$$H = 61,1 \cdot 0,0174 = 1,066 \approx 1,07 \text{ mm.}$$

Wie hieraus ersichtlich, sind r und nur von den Abmessungen des Probestückes bzw. der Meßvorrichtung abhängige Größen, die im Laufe einer Messung konstant bleiben, d. h. der Wert der Korrektion hängt ausschließlich von der Winkelschrumpfung ab und ändert sich linear mit dieser.

Mit den für die einzelnen Messungen bekannten Winkelschrumpfungen lassen sich nunmehr die Fehler durch einfache Multiplikation bestimmen.

Auswertung der Meßergebnisse

Die Meßergebnisse sind in Tabellen zusammengefaßt, deren einzelne Rubriken mit den für die stabaxiale Schrumpfung gültigen Formeln überschrieben sind. Die Rubriken sind sodann nach den zur Lösung der betreffenden Gleichung erforderlichen Faktoren unterteilt, ausgenommen jedoch die letzte Rubrik, die die solcherart errechneten Schrumpfungswerte enthält. Jene Faktoren, die für die gesamte Meßreihe gelten, sind folgende :

1. Meßreihe

In der WÖRTMANN—MOHRschen Formel ist

$$\frac{a}{c \cdot s \cdot \gamma} = \frac{1,16}{10^6}, \text{ und}$$

$$k = 1,79,$$

in der MALISIUS-Formel gilt für

$$k = 55,$$

während in der Formel von WERNER GILDE

$$k = 0,45$$

$$a = 15 \cdot 10^{-6}$$

$$\frac{a}{\lambda} = 0,8.$$

2. Meßreihe

In der Formel von WÖRTMANN—MOHR ist .

$$\frac{a}{c \cdot s \cdot \gamma} = \frac{1,16}{10^6} \text{ und}$$

$$k = 1,01,$$

in der Gleichung von MALISIUS

$$k = 55,$$

und schließlich in der WERNER GILDESchen Formel

$$k = 0,42$$

$$a = 15 \cdot 10^{-6}$$

$$\frac{a}{\lambda} = 0,8.$$

3. Meßreihe

In der WÖRTMANN—MOHRSchen Gleichung ist

$$\frac{a}{c \cdot s \cdot \gamma} = \frac{1,16}{10^6} \text{ und}$$

$$k = 1,15,$$

in der Gleichung von MALISIUS hingegen

$$k = 55$$

und in der WERNER GILDE-Formel

$$k = 0,35$$

$$a = 15 \cdot 10^{-6} \text{ und}$$

$$\frac{a}{\lambda} = 0,8.$$

Meßergebnisse

I. Meßreihe

| Messung | $\Delta l = \frac{\alpha \cdot g \cdot k \cdot 10^6}{\sigma \cdot s \cdot \gamma} + 0,0103 \cdot b'$ | | | | $\Delta l = \lambda_1 \cdot k \cdot \frac{Q}{s} + \lambda_2 \cdot b$ | | | | $\Delta l = \frac{0,24 \cdot 6000 \cdot k \cdot \alpha \cdot U \cdot I \cdot a}{s \cdot u \cdot \lambda}$ | | | | Meßwerte | | | |
|---------|--|----------|-----------------|-------|--|---------|-----------------|-------|---|-----------------|-------|----------------|----------|-------------------|-------|------|
| | g g/cm | b' mm | Schrumpfung, mm | | Q mm ² | b mm | Schrumpfung, mm | | U cm/p | Schrumpfung, mm | | Schrumpfung mm | | Winkelschrumpfung | | |
| | | | Lage | Insg. | | | Lage | Insg. | | Lage | Insg. | Lage | Insg. | Lage | Insg. | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | Lage |
| 1. | 0,53 | 4,5 | 0,153 | | 8,25 | 2,75 | 0,22 | | 27 | 0,22 | | 0,39 | | 0° | | |
| | 0,78 | 6,8 | 0,23 | 1,153 | 11,25 | 3,9 | 0,30 | 0,52 | 20 | 0,205 | 0,795 | 0,16 | 0,58 | 5' | 48' | |
| | 3,06 | 13,7 | 0,77 | | | | | | 6,4 | 0,37 | | 0,03 | | 43' | | |
| 2. | 0,47 | 4,1 | 0,14 | | 7 | 2,5 | 0,20 | | 31,6 | 0,20 | | 0,59 | | 0° | | |
| | 0,85 | 6,8 | 0,25 | 1,20 | 12,5 | 3,9 | 0,345 | 0,545 | 19,5 | 0,211 | 0,811 | 0,16 | 0,80 | 10' | 53' | |
| | 3,27 | 13,7 | 0,81 | | | | | | 5,5 | 0,398 | | 0,05 | | 43' | | |
| 3. | 0,39 | 5,0 | 0,145 | | 10,5 | 3 | 0,263 | | 39 | 0,13 | | 0,37 | | 0° | | |
| | 1,14 | 8,0 | 0,318 | 1,265 | 16,5 | 4,5 | 0,406 | 0,669 | 13,5 | 0,238 | 0,732 | 0,385 | 0,765 | 20' | 1°2' | |
| | 3,20 | 13,7 | 0,802 | | | | | | 6 | 0,364 | | 0,01 | | 42' | | |
| 4. | 0,5 | 5,4 | 0,156 | | 12,2 | 3,2 | 0,302 | | 32 | 0,147 | | 0,40 | | 0° | | |
| | 1,15 | 7,2 | 0,312 | 1,34 | 10,8 | 4,2 | 0,284 | 0,586 | 13 | 0,287 | 0,835 | 0,465 | 0,875 | 20' | 1°10' | |
| | 3,55 | 13,7 | 0,872 | | | | | | 5,42 | 0,401 | | 0,01 | | 50' | | |
| 5. | 0,52 | 4,7 | 0,159 | | 9,1 | 2,85 | 0,251 | | 32 | 0,147 | | 0,39 | | 0° | | |
| | 1,76 | 9,7 | 0,469 | 1,258 | 31,0 | 5,35 | 0,731 | 0,982 | 6,3 | 0,433 | 0,934 | 0,28 | 0,74 | 30' | 50' | |
| | 2,45 | 13 | 0,63 | | | | | | 7,0 | 0,327 | | 0,07 | | 20' | | |
| 6. | 0,51 | 5,0 | 0,157 | | 10,5 | 3,0 | 0,263 | | 32 | 0,159 | | 0,49 | | 0° | | |
| | 1,70 | 9,7 | 0,458 | 1,225 | 29,0 | 5,3 | 0,72 | 0,983 | 6,2 | 0,441 | 0,875 | 0,30 | 0,79 | 35' | 1°5' | |
| | 2,26 | 13 | 0,61 | | | | | | 8,35 | 0,375 | | 0,0 | | 30' | | |

2. Meßreihe

| Messung | $\Delta l = \frac{a \cdot g \cdot k \cdot 10}{c \cdot s \cdot \gamma} + 0,0103 \cdot b'$ | | | | $\Delta l = \lambda_1 \cdot k \cdot \frac{Q}{s} + \lambda_2 \cdot b$ | | | | $\Delta l = \frac{0,24 \cdot 6000 \cdot k \cdot a \cdot U \cdot I \cdot a}{s \cdot u \cdot \lambda}$ | | | | Meßwerte | | | |
|---------|--|----------|-----------------|-------|--|---------|-----------------|-------|--|-----------------|-------|----------------|----------|-------------------|-------|--|
| | g g/cm | b' mm | Schrumpfung, mm | | Q mm ² | b mm | Schrumpfung, mm | | U cm/p | Schrumpfung, mm | | Schrumpfung mm | | Winkelschrumpfung | | |
| | | | Lage | Insg. | | | Lage | Insg. | | Lage | Insg. | Lage | Insg. | Lage | Insg. | |
| 1. | 0,62 | 5,5 | 0,127 | | 12,1 | 3,2 | 0,295 | | 26,8 | 0,165 | | 0,37 | | 0° | | |
| | 0,97 | 7,0 | 0,186 | 0,861 | 9,2 | 4,0 | 0,261 | 0,556 | 14,0 | 0,261 | 0,704 | 0,30 | 0,67 | 5' | 55' | |
| | 3,55 | 13,0 | 0,548 | | | | | | 5,85 | 0,278 | | 0,0 | | 50' | | |
| 2. | 0,63 | 5,0 | 0,128 | | 10,4 | 3,0 | 0,257 | | 25,0 | 0,238 | | 0,43 | | 0° | | |
| | 0,96 | 7,6 | 0,185 | 0,812 | 14,4 | 4,3 | 0,358 | 0,615 | 14,6 | 0,23 | 0,848 | 0,30 | 0,76 | 5' | 47' | |
| | 3,13 | 13,0 | 0,499 | | | | | | 5,85 | 0,38 | | 0,03 | | 42' | | |
| 3. | 0,49 | 4,7 | 0,108 | | 9,1 | 2,85 | 0,229 | | 26,8 | 0,195 | | 0,36 | | 0° | | |
| | 1,66 | 8,5 | 0,277 | 0,913 | 21,4 | 4,7 | 0,52 | 0,749 | 9,7 | 0,308 | 0,853 | 0,58 | 1,01 | 10' | 40' | |
| | 3,27 | 13,7 | 0,528 | | | | | | 6,0 | 0,35 | | 0,07 | | 30' | | |
| 4. | 0,46 | 4,9 | 0,104 | | 9,4 | 2,85 | 0,227 | | 32 | 0,158 | | 0,49 | | 0° | | |
| | 1,25 | 8,2 | 0,224 | 0,886 | 19,1 | 4,6 | 0,47 | 0,697 | 12,2 | 0,256 | 0,804 | 0,275 | 0,756 | 20' | 1°10' | |
| | 3,55 | 13,7 | 0,558 | | | | | | 5,4 | 0,39 | | 0,00 | | 50' | | |
| 5. | 0,5 | 5,0 | 0,109 | | 10,5 | 3,0 | 0,264 | | 29,2 | 0,163 | | 0,36 | | 0° | | |
| | 1,93 | 10,4 | 0,330 | 0,90 | 36,0 | 5,7 | 0,869 | 1,133 | 8,35 | 0,284 | 0,777 | 0,2 | 0,90 | 1° | 1°20' | |
| | 2,8 | 13,0 | 0,461 | | | | | | 6,7 | 0,33 | | 0,34 | | 20' | | |
| 6. | 0,5 | 4,7 | 0,108 | | 9,1 | 2,85 | 0,232 | | 29,2 | 0,179 | | 0,45 | | 0° | | |
| | 1,86 | 10,0 | 0,321 | 0,877 | 32,9 | 5,4 | 0,79 | 1,022 | 8,5 | 0,295 | 0,739 | 0,03 | 0,49 | 1° | 1°40' | |
| | 2,5 | 14,6 | 0,448 | | | | | | 7,3 | 0,265 | | 0,01 | | 40' | | |

3. Meßreihe

| Messung | $\Delta l = \frac{a \cdot g \cdot k \cdot 10^6}{c \cdot h \cdot \gamma} + 0,0103 \cdot b'$ | | | | $\Delta l = \lambda_1 \cdot k \cdot \frac{Q}{h} + \lambda_2 \cdot b$ | | | | $\Delta l = \frac{0,24 \cdot 6000 \cdot k \cdot a \cdot U \cdot I \cdot a}{h \cdot u \cdot \lambda}$ | | | Meßwerte | | | |
|---------|--|----------|-----------------|-------|--|---------|-----------------|-------|--|-----------------|-------|-----------------|-------|-------------------|-------|
| | g g/cm | b' mm | Schrumpfung, mm | | Q mm ² | b mm | Schrumpfung, mm | | U cm/p | Schrumpfung, mm | | Schrumpfung, mm | | Winkelschrumpfung | |
| | | | Lage | Insg. | | | Lage | Insg. | | Lage | Insg. | Lage | Insg. | Lage | Insg. |
| 1. | 0,53 | 4,5 | 0,121 | | 8,25 | 2,75 | 0,22 | | 32 | 0,18 | | 0,43 | | 0° | |
| | 0,78 | 6,8 | 0,176 | 0,837 | 11,25 | 3,9 | 0,30 | 0,52 | 16,7 | 0,225 | 0,825 | 0,25 | 0,84 | 5' | 45' |
| | 3,06 | 13,7 | 0,54 | | | | | | 5,5 | 0,42 | | 0,16 | | 40' | |
| 2. | 0,47 | 4,1 | 0,103 | | 9,1 | 2,85 | 0,251 | | 29,2 | 0,189 | | 0,59 | | 0° | |
| | 0,85 | 6,8 | 0,185 | 0,857 | 13,7 | 4,0 | 0,34 | 0,591 | 27,0 | 0,135 | 0,714 | 0,11 | 0,73 | 10' | 45' |
| | 3,27 | 13,7 | 0,569 | | | | | | 5,7 | 0,39 | | 0,03 | | 35' | |
| 3. | 0,39 | 5,0 | 0,09 | | 8,25 | 2,75 | 0,22 | | 27 | 0,218 | | 0,56 | | 0° | |
| | 1,14 | 8,0 | 0,234 | 0,882 | 22,75 | 4,75 | 0,546 | 0,766 | 14 | 0,212 | 0,790 | 0,07 | 0,63 | 20' | 40' |
| | 3,20 | 13,7 | 0,558 | | | | | | 6,5 | 0,36 | | 0,00 | | 20' | |
| 4. | 0,5 | 5,4 | 0,118 | | 10,5 | 3,0 | 0,263 | | 29,2 | 0,174 | | 0,40 | | 0° | |
| | 1,15 | 7,2 | 0,225 | 0,950 | 20,5 | 4,75 | 0,50 | 0,763 | 13,5 | 0,218 | 0,754 | 0,07 | 0,47 | 20' | 55' |
| | 3,55 | 13,7 | 0,607 | | | | | | 6,5 | 0,362 | | 0,00 | | 35' | |
| 5. | 0,52 | 4,6 | 0,12 | | 10,5 | 3,0 | 0,263 | | 29,2 | 0,172 | | 0,40 | | 0° | |
| | 1,76 | 9,5 | 0,327 | 0,907 | 39,5 | 5,9 | 0,934 | 1,197 | 7,0 | 0,325 | 0,797 | 0,45 | 0,92 | 25' | 35' |
| | 2,45 | 13 | 0,46 | | | | | | 7,8 | 0,30 | | 0,07 | | 10' | |
| 6. | 0,51 | 5,0 | 0,119 | | 13,2 | 3,3 | 0,321 | | 29,2 | 0,151 | | 0,35 | | 0° | |
| | 1,7 | 9,5 | 0,318 | 0,870 | 36,8 | 5,9 | 0,874 | 1,195 | 7,3 | 0,307 | 0,743 | 0,50 | 0,85 | 30' | 50' |
| | 2,26 | 13 | 0,433 | | | | | | 7,8 | 0,285 | | 0,00 | | 20' | |

Auf Grund der Meßergebnisse lassen sich folgende Schlüsse ziehen :

1. Nicht bloß die erste Lage, sondern auch alle weiteren Lagen verursachen Schrumpfungen.

2. Im allgemeinen ergibt sich die größte Schrumpfung bei der ersten Lage.

3. Die Formeln bringen den tatsächlichen Ablauf der Schrumpfung nicht zum Ausdruck. Während nämlich die Schrumpfung gemäß Punkt 2 beim Schweißen der ersten Lage am größten ist, bleiben die aus den Formeln errechneten Werte wesentlich unter den gemessenen Werten der Schrumpfung beim Aufschweißen der ersten Lage. Bei der letzten Lage liegen die Verhältnisse gerade umgekehrt. Die Messungen zeigen hier prozentuell sehr geringe Schrumpfungen, wogegen sich anhand der Formeln eben hier die größten Schrumpfungen ergeben.

Aus diesem Grunde wurde bei der rechnerischen Ermittlung der Gesamtschrumpfung anhand der WÖRTMANN—MOHRschen sowie der GILDESchen Formeln die Schrumpfung jeder einzelnen Lage gesondert in Betracht gezogen, während den Berechnungen anhand der MALISIUS-Formel bloß die errechneten Schrumpfungswerte für die erste und zweite Lage zugrunde gelegt sind. WÖRTMANN—MOHR geben nämlich, wie bereits erwähnt, nicht an, wieviele Lagen Schrumpfungen verursachen. Demgegenüber ist WERNER GILDE der Auffassung, daß die Schweißung jeder Lage zu Schrumpfungen führt, wogegen MALISIUS eindeutig festhält, daß bei frei beweglichen Blechen nur bei der Aufschweißung der ersten Lage Schrumpfungen vorkommen. Die Meßergebnisse lassen demgegenüber klar erkennen, daß die tatsächliche Schrumpfung von den gemessenen stark abweichen würde, wenn man anhand der MALISIUS-Formel bloss diejenige der ersten Lage in Rechnung ziehen wollte, während die Schrumpfung der beiden ersten Lagen im Durchschnitt die Mittelwerte der Messungen gut annähert.

Bild 9. zeigt den Verlauf der gemessenen Schrumpfungen in Abhängigkeit vom Gesamtquerschnitt der beiden Lagen.

Auf Grund der Diagramme lassen sich folgende Schlüsse ziehen :

1. Die Schrumpfung ist unabhängig davon, ob man mit Gleich- oder Wechselstrom schweißt. Sämtliche der drei Messungen zeigen eine durchschnittliche Schrumpfung von 0,75 mm.

2. Das Ausmaß der Schrumpfung ist ferner unabhängig von der Stärke der zweiten Lage. Es wurde nämlich eben der Querschnitt der zweiten Lage stufenweise vergrößert und dementsprechend vergrößerte sich auch die Summe der Querschnitte der ersten und zweiten Lage, als deren Funktion die Schrumpfungswerte aufgetragen sind, während der Mittelwert der Schrumpfung durch eine parallel zur Abszisse verlaufende Gerade dargestellt ist.

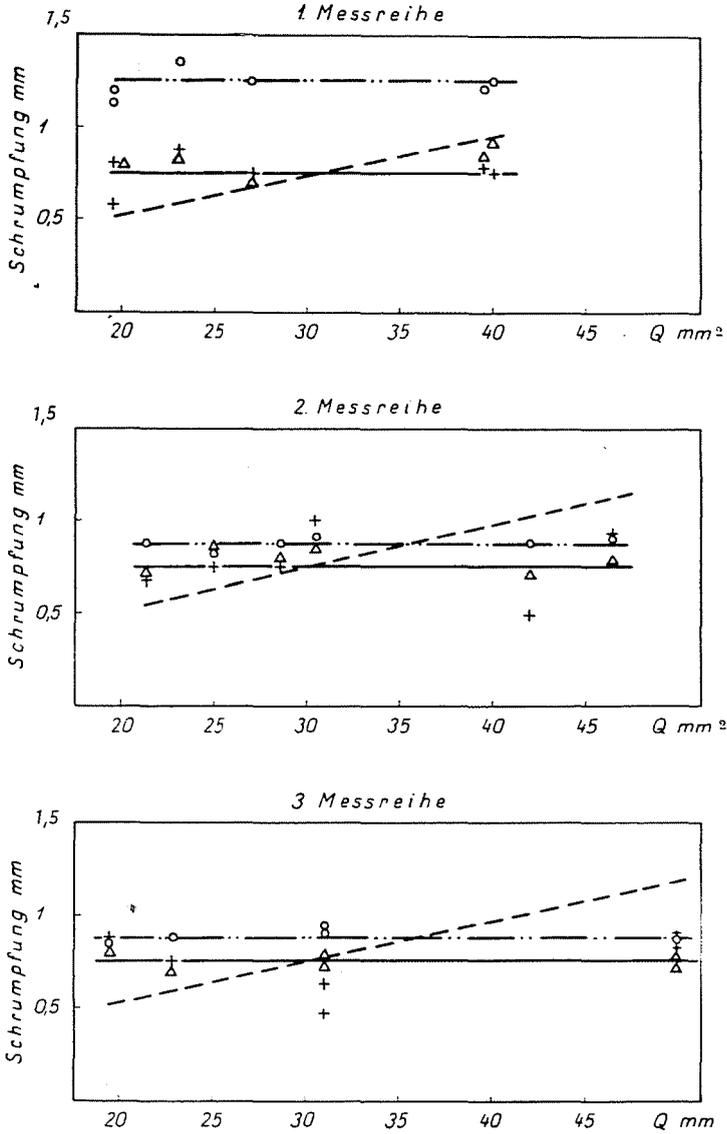


Bild 9. Zusammenfassende Ergebnisse der Schrumpfungsmessungen

In den Diagrammen wurden folgende Zeichen benützt :

| Meßwerte | Anhand der Wärtmann-Mohrschen Formel errechnete Ergebnisse | Anhand der Malisius-Formel errechnete Ergebnisse | Der Gildeschen Formel gemäß errechnete Ergebnisse |
|---------------|--|--|---|
| + | ○ | ● | △ |
| Mittelwerte : | | | |
| — | — · — · — | - - - - - | |

3. Hinsichtlich der Formeln ergeben sich folgende Feststellungen :

| | 1. Meßreihe | 2. Meßreihe | 3. Meßreihe |
|--|---|---|---|
| Wörtmann—Mohrsche-Formel: | + 78,5% | + 21,4% | + 26,7% |
| Maximale Abweichung der berechneten Punkte vom Mittel der Meßwerte | + 53,5% | + 8,0% | + 10,7% |
| Malisius-Formel: | + 30,8% | + 50,5% | + 58,5% |
| Maximale Abweichung der berechneten Punkte vom Mittel der Meßwerte | — 30,8% | — 25,4% | — 30,8% |
| Gildesche Formel: | + 24% | + 13,4% | + 9,3% |
| Maximale Abweichung der berechneten Punkte vom Mittel der Meßwerte | — 2,65% | — 6,65% | — 5,35% |
| Maximale Abweichung der gemessenen Punkte von ihrem Mittelwert | + 19,2 ⁰ / ₀ — 21,7% | + 34,7 ⁰ / ₀ — 34,7% | + 22,6 ⁰ / ₀ — 37,3% |

a) Die anhand der WÖRTMANN—MOHRschen Formel errechneten Schrumpfungswerte weichen besonders beim Schweißen mit entgegengesetzten Polen stark von den gemessenen Werten ab. Die rechnerische Ermittlung der Schrumpfung beim gleichpoligen oder beim Wechselstromschweißen ergibt zwar wesentlich geringere Abweichungen, jedenfalls aber Werte, die das Mittel der Meßwerte übersteigen.

b. Die auf Grund der Formel von MALISIUS errechneten Werte sind wesentlich genauer. Im Mittel stimmen sie mit der gemessenen Schrumpfung überein.

c) Die Formel von GILDE ergibt mit den gemessenen gut übereinstimmende Werte.

Letzten Endes gelangt man also zu der Schlußfolgerung, daß die Formel von GILDE bei stabaxialer Schrumpfung deren tatsächliche Größe am besten annähert.

Nachteilig wirkt sich jedoch der Umstand aus, daß der jeweils gültige k -Wert in jedem einzelnen Fall experimentell ermittelt werden muß, doch findet die Genauigkeit der Formel eben in diesem Umstand ihre Begründung. Ein weiterer Nachteil besteht darin, daß die gemessene Schrumpfung der einzelnen Lagen mit der rechnerisch ermittelten nicht übereinstimmt. Immerhin zeigt die resultierende Gesamtschrumpfung eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Gesamtwerten.

Untersuchung der Formel von Malisius (1) für die Querschrumpfung

Die Untersuchung wurde an gut anstoßenden, im Pilgerschritt geschweißten Nähten vorgenommen, für die MALISIUS die Formel

angegeben hat.

$$\Delta l = (0,6 \cdot \lambda_1 \cdot k \cdot \frac{Q}{s} + \lambda_2 \cdot b) \cdot 1,3$$

Anhand dieser Formel errechnete Werte sind in Bild 4 in Abhängigkeit von Blechstärke, Schweißnahtform und Schweißverfahren aufgetragen. Die rechnerisch ermittelten Werte gelten für den Fall, daß der gesamte Schweißnahtquerschnitt in einer Lage aufgetragen wurde.

Nach der gegenwärtig üblichen Technologie werden stärkere Bleche beim Hand-Lichtbogenschweißen nicht mehr in einer Lage geschweißt, und das Schweißen mit blanker Elektrode ist aus der Praxis gänzlich verschwunden. Nach dem Gasschweißverfahren hingegen schweißt man nur dünne Bleche.

Aus diesem Grunde wurden die von MALISIUS mitgeteilten Schrumpfungswerte an Lichtbogenschweißungen mit umhüllter Elektrode ferner an den in der neuzeitlichen Schweißtechnik üblichen automatischen UP-Schweißungen untersucht.

Beim Hand-Schweißen wurde ein Gleichstromgenerator benützt, dessen Pluspol mit dem Werkstück verbunden war, wobei Elektroden E 50 verwendet wurden. Die Härte (HB) des untersuchten Bleches betrug 124 kg/mm^2 .

Zum automatischen UP-Schweißen wurde ein Automat vom sowjetischen Typ ADS 1000 mit Weichstahlelektrode und keramischen Schweißpulver benützt. Das untersuchte Blech hatte dieselben Kenndaten wie das oben beschriebene.

Die Meßwerte sind im Diagramm des Bildes 10 aufgetragen.

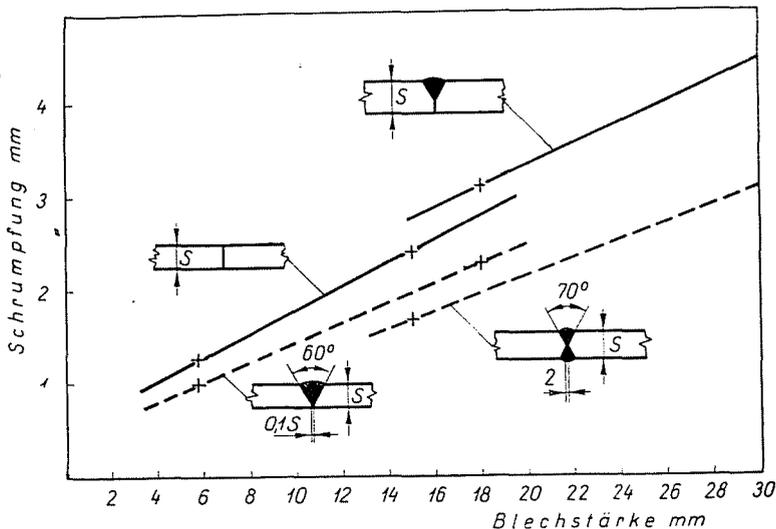


Bild 10. Verlauf der Schrumpfung in Abhängigkeit von der Blechstärke bei Hand-Lichtbogenschweißung und beim automatischen UP-Schweißen

Lichtbogenschweißung mit umhüllter Elektrode : - - - - -
 Automatische UP-Schweißung : _____

Beim Hand-Lichtbogenschweißen war der Stoß gemäß ungarischer Norm MSZ 4304, beim automatischen UP-Schweißen hingegen nach [6] ausgebildet.

Der Verlauf der Diagrammkurven läßt erkennen, daß

1. die gemessenen Schrumpfungswerte bei V- und X-Nähten mit den nach der MALISIUS-Formel errechneten ziemlich gut übereinstimmen. (Die rechnerisch ermittelten Werte sind dem Bild 4 zu entnehmen.)

2. Wie aus dem Verlauf der von MALISIUS mitgeteilten, im Bild 4 dargestellten Kennlinie ersichtlich, treten bei X-Nähten wesentlich geringere Schrumpfungen als bei V-Nähten auf.

3. Beim automatischen UP-Schweißen ist die Schrumpfung wesentlich größer als beim Hand-Lichtbogenschweißen.

Zusammenfassung

Die im Schrifttum auffindbaren Schrumpfungsgleichungen wurden nach den grundlegenden Schrumpfungerscheinungen gruppiert. Auf dem Wege von Messungen wird nachgewiesen, daß keine der Formeln den tatsächlichen Verlauf der Schrumpfung deckt, doch nähert die Formel von WERNER GILDE bei Berechnung der Gesamtschrumpfung die tatsächlichen Schrumpfungswerte sehr gut an. Die solcherart als die genaueste zu bezeichnende Formel hat jedoch den Nachteil, daß der für die jeweiligen Verhältnisse gültige k-Wert fallweise experimentell ermittelt werden muß.

Schließlich wurden die Werte der beim Hand-Lichtbogenschweißen und der beim automatischen UP-Schweißen auftretenden Schrumpfungen durch Messung bestimmt. Die gefundenen Werte wurden in ein Diagramm aufgetragen, aus dem die Schrumpfungen an der Schweißnaht zuvor gut aneinandergehefteter Platten in Abhängigkeit von der Blechstärke abgelesen werden können.

Schrifttum

1. R. MALISIUS, : Die Schrumpfung geschweißter Stumpfnähte. Elektroschweißung 7 (1936) 1—9.
2. F. WÖRTMANN—W. MOHR: Wärmespannungen bei Schweißungen und ihr Einfluß auf die Sicherheit ausgeführter Konstruktionen. Schweizerische Bauzeitung 100 (1932) 243—246.
3. WERNER GILDE: Beitrag zur Berechnung der Querschrumpfung. Schweißtechnik I (1957) 10—14.
4. R. MALISIUS: Praktische Maßnahmen gegen Schrumpfwirkungen Schweißen und Schneiden 7 (1955) 123—124
5. C. FUCHS: Schrumpfungen, Schrumpfspannungen Konstruktion 8 (1956) 67
6. HAJAS—KRISTÓF—PÁSZTOR: Korszerű hegesztés.

I. BIZINGER, Budapest, XI., Bertalan Lajos u. 7. Ungarn.