

<b>Zeitschrift:</b>	Schweizerische Bauzeitung
<b>Herausgeber:</b>	Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
<b>Band:</b>	99/100 (1932)
<b>Heft:</b>	19
<b>Artikel:</b>	Wärmespannungen bei Schweißungen und ihr Einfluss auf die Sicherheit ausgeführter Konstruktionen
<b>Autor:</b>	Wörtmann, F.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-45582">https://doi.org/10.5169/seals-45582</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 15.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

INHALT: Wärmespannungen bei Schweißungen und ihr Einfluss auf die Sicherheit ausgeführter Konstruktionen. — Die Geschiebequellen der Bäche und Flüsse. — Die Markthalle in Burgdorf. — Mitteilungen: Elektro-Ofen zur Wärmebehandlung grosser Arbeitsstücke. Einfluss des Waldes auf den Wasserabfluss.

Transkontinentaler Bahnverkehr in Australien. Die Reisegeschwindigkeit im Eisenbahnverkehr. Die Hudsonbrücke bei New York. Ein Diskussionstag über Unfallverhütung. — Nekrolog: John R. Freemann. Maurice Turrettini. — Literatur. — Schweizerischer Verband für die Materialprüfungen der Technik. — Sitzungs- und Vortragskalender.

## Band 100

Der S.I.A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich.  
Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

## Nr. 19

## Wärmespannungen bei Schweißungen und ihr Einfluss auf die Sicherheit ausgeführter Konstruktionen.

Von Dr. Ing. F. WÖRTMANN und Dipl. Ing. W. MOHR, Genf-Sécheron.

Nachdem die Schweißung im Baufach einen immer grösseren Raum einzunehmen beginnt, sucht man ihr und den bei ihr auftretenden Erscheinungen von den verantwortlichen Stellen aus, wie seitens der Behörden und Unternehmungen, auch von der wissenschaftlichen Seite her etwas näher zu kommen.

Da ist es z. B. gerade das grosse Kapitel der Spannungen, vor allem der Wärmespannungen, das zur Debatte steht. Nicht selten kann man feststellen, dass auf diesem Gebiet noch grosse Unklarheit herrscht und dass hier manchmal Schlussfolgerungen gezogen werden, die man nicht anders denn als Trugschlüsse bezeichnen kann, wie nachstehende Beispiele zeigen mögen: Als bei einer Trägerkonstruktion für eine Bahn ein Fachmann sein Erstaunen über die Dicke ganz schwach beanspruchter Nähte ausdrückte, wurde ihm erwidert, man wisse wohl, dass  $\frac{1}{3}$  dieser Dicke genüge, aber um die eigenen Wärmespannungen aufnehmen zu können, müsse die Naht dreimal so dick gemacht werden, als sie ohne diese Spannungen zu sein brauchte. Oder ein anderer Fall: Für eine grosse Druckrohrleitung war Schweißung in Aussicht genommen. Man fragte sich, welche Wärmespannungen da wohl auftreten werden und stellte u. a. folgende Versuche an: zwei Bleche von der in Frage kommenden Stärke wurden fest auf eine Unterlage gespannt und durch eine V-Naht miteinander verschweisst. Man stellte hierauf die Spannungen in der Naht und ihrer nächsten Umgebung fest. Sie betragen teilweise 20 bis 25 kg/mm<sup>2</sup>. Da dies weit mehr ist als bei der Beanspruchung im Betriebe selbst zulässig ist, trug man starke Bedenken, die Arbeit auf diese Art und Weise auszuführen, „da ja eine geringe zusätzliche Betriebsspannung von einigen kg schon nahe an die Zerreissgrenze führen würde“.

Wie kommt es nun aber, dass praktisch eine Unmenge von ähnlichen Konstruktionen schon ausgeführt wurden, die allen Beanspruchungen standhalten, ohne dass die Nähte dreimal so dick gemacht wurden als nötig. Wie kommt es, dass man andererseits aber auch manchmal von Fällen hört, wo solche Nähte gesprungen sind, wie z. B. kürzlich bei einem mit Nacktdraht geschweissten Ruthspeicher in Brünn. Eine nähere Untersuchung des Wesens der Wärmespannungen und aller dabei auftretenden Erscheinungen soll zur Klärung dieser Fragen beitragen:

Es können Spannungen auftreten a) in Richtung der Naht und b) quer zur Naht. Hierbei ist wieder zu beachten, ob die Naht freibeweglich oder ob sie eingespannt ist.

Zu a) Die Schweiße und das unmittelbar benachbarte Material werden flüssig, das anschliessende Material wird glühend. Das glühende Material staucht sich um den Betrag der Wärmedehnung, da es vom kalten Nachbarmaterial in seiner Lage gehalten wird. Beim Abkühlen wird es gereckt und man kann annehmen, dass erst unter  $700^{\circ}$  durch das Schwinden der Nahtzone bleibende Spannungen entstehen. Die Nahtzone schwindet um den Betrag  $\Delta l = \alpha l \Delta t$ , wobei  $\alpha l = 0,0103^1)$  die Wärmedehnungszahl des Flusseisens für den Bereich von 20 bis  $700^{\circ}$  und  $l$  die Länge der Naht in cm ist. Die Länge zu 100 cm angenommen ergibt sich:

$$\begin{aligned}\Delta l &= 0,0103 \cdot 100 \\ &= 1,03 \text{ cm}\end{aligned}$$

<sup>1)</sup> Nach Hütte Bd. I.

d. h. die Naht zöge sich, wenn sie nicht daran gehindert würde, um 1,03 % zusammen. Daraus ergibt sich eine rechnungsmässige Zugspannung  $s$  in Richtung der Naht von der Grösse

$$s = \frac{\Delta l E}{l} = \frac{1,03 \cdot 2,15 \cdot 10^6}{100 \cdot 100} = 221 \text{ kg/mm}^2$$

( $E = 2,15 \cdot 10^6$  = Elastizitätsmodul des Flusseisens in kg/cm<sup>2</sup>). Da die errechnete Spannung weit über der Streckgrenze der Schweiße liegt, wird die Naht in Längsrichtung „kalt“ gereckt und es verbleibt in ihr eine Zugspannung gleich der Spannung des Eisens etwas über der Streckgrenze, d. h. für eine Schweiße mit etwa 50 kg Festigkeit etwa 40 kg/mm<sup>2</sup>. Neben der Naht geht die Zugspannung ziemlich plötzlich in eine Druckspannung über. Die Zugspannung in Längsrichtung kann durch Hämmern der Naht entfernt werden.

Welchen Einfluss hat nun die übertragene Wärmemenge auf die Höhe der Zugspannung? Keinen, denn die Breite der Nahtzone ist für die Grösse der Spannung in Richtung der Naht ganz gleichgültig. Erst wenn die übertragene Wärmemenge so gross wird, wie manchmal beim Autogenschweissen, kann das auf Druck beanspruchte volle Blech ausknicken, d. h. sich aufbeulen.

Zu b) Bei freibeweglichen Stücken treten Kräfte quer zur Naht zwar auf, doch heben sie sich gegenseitig auf, d. h. es wechseln Zug- und Druckspannung miteinander ab (Abb. 1). Grössere Bedeutung kommt den Spannungen bei eingespannten Stücken zu. Derartige Nähte sind z. B. bei Dampfkesselreparaturen ziemlich häufig. Eine halbfertige Naht kann gleichfalls für den Rest der Arbeit als eingespannt gelten.

### Beispiel:

Es sei ein Blech von 10 mm Stärke zugrunde gelegt. Die Schweißnaht habe die in Abb. 2 gezeichnete Form. Es wird ferner angenommen, dass in der ersten Schweißlage eine 3,5 mm starke Lage niedergebracht werde. Alle Angaben sind so angenommen, dass die Spannungen möglichst gross werden.

Die übertragene Wärmemenge ist fast nur von der übertragenen Eisenmenge abhängig<sup>1)</sup> und fast gar nicht von der Stromstärke, mit der man schweist. Dieses letzte ist auf den ersten Blick überraschend, es ist aber ganz einleuchtend, wenn man bedenkt, dass eben auch mit höherem Strom das Eisen schneller abschmilzt, sodass man mit niedrigerem Strom für die selbe abgeschmolzene Eisenmenge den Lichtbogen längere Zeit brennen lassen muss, also auch längere Zeit das Werkstück erhitzt. Die in der Zeiteinheit übertragene Eisenmenge ist proportional der Stromstärke.

Die bei Wechselstromschweißung pro kg Schweiße übertragene Wärmemenge beträgt 1150 kcal/kg. 1 cm der

<sup>1)</sup> F. Wörtmann. Die elektr. Schweißung mit dem Wechselstrom-Lichtbogen, Dissertation T. H. Hannover 1924. S. 63/64.

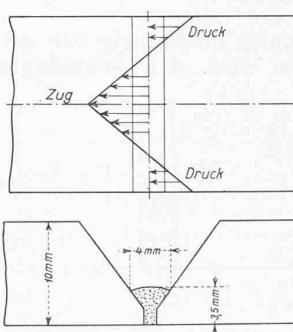


Abb. 1 (oben).

Abb. 2 (darunter).

angenommenen Naht wiegt nun 0,87 gr, die pro cm Naht übertragene Wärmemenge beläuft sich also auf  $\frac{1150}{1000} \cdot 0,87 \text{ kcal} = 1 \text{ kcal/cm Naht}$ . Diese Wärmemenge verteilt sich beiderseits der Naht im vollen Blech. Die Naht schliesst sich daher am Lichtbogen um ein kleines Stückchen, das sich aus der übertragenen Wärmemenge errechnen lässt. Ausserdem schwindet das eingeschmolzene Material selbst natürlich auch in Querrichtung und zwar von  $700^\circ$  bis auf  $20^\circ$  um 1,03 %, wie oben schon für das Schwinden in Längsrichtung festgestellt worden ist.

Bedeutet nun  $g$  das pro cm Nahtlänge in einer Lage eingeschmolzene Gewicht Schweisse,  $k$  die pro g Schweisse übertragene Wärmemenge und  $Q = gk = 0,87 \cdot 1,15$  die pro cm Nahtlänge übertragene Wärmemenge = 1 kcal,  $c = 0,159$  die mittlere spez. Wärme des Eisens für den gegebenen Temperaturbereich,  $\alpha = 0,00001515$  die mittlere Wärmedehnungszahl des Eisens und ferner  $\Delta T$  die aus der Wärmezufuhr von  $Q$  kcal sich ergebende Temperaturerhöhung von  $G$  kg Eisen, so gilt die Gleichung:

$$gk = Q = c \Delta T G \quad \dots \quad (1)$$

und ferner gilt für die relative Dehnung des erwärmten Eisens  $\frac{\Delta l}{\alpha \cdot l} = \Delta T \quad \dots \quad (2)$

$$\text{und daher } \frac{\Delta l}{l} = \alpha \frac{gk}{cG}$$

$$\text{und weiterhin } \Delta l = \alpha \frac{gk l}{cG} \quad \dots \quad (3)$$

Die Werte  $c$  und  $\alpha$  können mit genügender Genauigkeit als konstant angenommen werden. Darum ist es für den Gesamtbetrag der Wärmedehnung gleichgültig, wieviel Nachbareisen neben der Naht erwärmt wird. Denn es wird z.B. von 1 kcal z.B. 1 kg Eisen um  $6,3^\circ$  erhitzt ( $c = 0,159$ ),  $\frac{1}{2}$  kg dann aber gerade um das Doppelte, also um  $12,6^\circ$ .

Nun gilt für das Gewicht des zu erwärmenden Stückes:

$$G = d \gamma l b;$$

$b$  wurde zu 1 cm angegeben, wir betrachten nämlich einen Streifen  $b = 1 \text{ cm}$  (Abb. 3).

Setzt man diese Gleichung in Gl. (3) ein, so erhält man

$$\Delta l = \alpha \frac{g k l}{cG} = \frac{\alpha g k}{c d \gamma}$$

Man sieht, dass die Wärmedehnung unabhängig von der Länge des betrachteten Streifens wird, d.h. unabhängig davon, wie weit die Wärme von der Naht abgeleitet wird (Abb. 3).

Es ist einzusetzen:  $k$  in kcal/g;  $g$  in g/cm;  $c$  in kcal/kg;  $d$  in mm;  $\gamma = 7,8$  in kg/dm<sup>3</sup>;  $d = 10 \text{ mm}$ .

Damit wird

$$\Delta l = \frac{\alpha g k 10^5}{c d \gamma} \quad \dots \quad (4)$$

Um den gleichen Betrag schwindet das Blech beim Erkalten. Dazu kommt, wie früher erwähnt, das Schwinden der Naht selbst, die  $b' = 4 \text{ mm}$  breit sei (Abb. 2). Die gesamte Wärmedehnung, die nach dem Erkalten die Wärmespannung hervorruft, beläuft sich also auf den Betrag

$$\Delta l = \frac{\alpha g k 10^5}{c d \gamma} + 0,0103 b' \text{ mm} \quad \dots \quad (5)$$

Die prozentuale Dehnung  $D = \frac{\Delta l}{b'} 100$ , die für die Beurteilung der Zulässigkeit oder der Möglichkeit der Schweißung massgebend ist, ergibt sich zu

$$D = \frac{\Delta l 100}{b'} = \frac{\alpha g k 10^7}{c a \gamma b'} + 1,03 \% \quad \dots \quad (6)$$

Im vorliegenden Fall erhalten wir:

$$D = \frac{0,0000152 \cdot 0,87 \cdot 1,15 \cdot 10^7}{0,159 \cdot 10 \cdot 7,8 \cdot 4} + 1,03 \% \\ = 3,06 + 1,03 = 4,09 \%$$

Der Vollständigkeit halber seien auch noch die Gleichungen für Gleichstromschweißung mit + und - Pol am Werk-

stück gegeben, wobei mit andern übertragenen Wärmemengen zu rechnen ist.

$$\text{Gleichstrom} + \text{Pol am Werkstück } D = \left( \frac{220 \text{ g}}{d b} + 1,03 \right) \% \quad (7)$$

$$\text{, } - \text{Pol } D = \left( \frac{124 \text{ g}}{d b} + 1,03 \right) \% \quad (8)$$

$$\text{Wechselstrom } D = \left( \frac{141 \text{ g}}{d b} + 1,03 \right) \% \quad (9)$$

Die Gleichungen zeigen, dass die Reckung  $D$  der Schweisse umso grösser wird, je grösser das auf einmal eingeschmolzene Materialgewicht  $g$  ist. Mit dem eingeschmolzenen Materialgewicht wächst aber auch die Festigkeit der Naht. Die Reckung nimmt dann nur so lange mit der Nahtdicke zu, bis ihre Festigkeit die Fliessgrenze des vollen Materials erreicht, denn von diesem Augenblick an nimmt das Blech selbst an der überelastischen Dehnung teil und die Beanspruchung der Naht nimmt ab. Die endgültige Spannung ist dann leicht aus der errechneten Dehnung und der Einspannlänge zu ermitteln. Es interessiert nun, die maximal erreichbare Reckung (kritische Reckung) der Schweisse zu kennen.

Diese kritische Reckung richtet sich nach der Festigkeit der Schweisse und der Fliessgrenze des Bleches. Legt man, was eigentlich Normalfall sein sollte, gleiche Zerreissfestigkeit zugrunde für Schweisse ( $Z_s$ ) und Blech ( $\sigma_B$ ), z.B. 48 kg/mm<sup>2</sup>, so liegt die Fliessgrenze des Bleches erfahrungsgemäss bei etwa 30 kg/mm<sup>2</sup>. Bei durchlaufenden Nähten ist die Festigkeit proportional der Materialdicke. Es wird dann die kritische Dicke ( $d_k$ ) der Schweisse, bei der die maximale Reckung auftritt:

$$d_k = d_B \cdot \frac{\sigma_B}{Z_s} = d_B \cdot \frac{30}{48} = 0,62 d_B$$

Wenn die Schweisse also ungefähr  $\frac{2}{3}$  der Blechdicke ( $d_B$ ) erreicht, ist die kritische Reckung  $D_k$  erreicht. Nach obigen Formeln berechnet beträgt sie bei V-Nähten:

Bei Wechselstrom

$$D_k = 4,45 \% \quad (4,56 \%)$$

Gleichstrom, + Pol am Werkstück

$$D_k = 6,35 \% \quad (6,45 \%)$$

Gleichstrom, - Pol am Werkstück

$$D_k = 4,03 \% \quad (4,17 \%)$$

Nur Gültigkeit für  
V-Nähte und wenn  
das Material in  
einer Lage aufge-  
bracht wird

Die Zahlen in Klammern geben die aus Querschrumpfung ( $D_k$ ) und Längsschrumpfung (1,03 %) erhaltene Gesamtreckung.

Ist die spezifische Festigkeit des Bleches grösser als die der Schweisse, so erhöhen sich die Werte für  $D_k$ .

Wird das Verhältnis all dieser angeführten Werte sehr ungünstig, so kann die Naht während der Schweißung, wenn z.B. eine Lage aufgetragen ist, reissen.

Ungünstig ist es z.B., wenn die Schweissnaht nicht die glatte Form wie Abb. 4a hat, sondern wie bei Abb. 4b eine Stelle der Naht besonders schwach ist, oder wenn eine übertriebene Hohlkehle vorliegt, der Wert für  $b'$  in (Gl. 7, 8, 9) wird dann sehr klein und  $D$  sehr gross. In der schwachen Stelle konzentriert sich dann die Spannung und Dehnung und es tritt mit grosser Wahrscheinlichkeit ein Riss auf. All diese Risse können aber, wie schon erwähnt, nur während der Arbeit und nie am fertigen Stück auftreten, es sei denn, dass man die Naht zu dünn lässt.

Ausnahmsweise sind Risse durch Wärmespannungen noch am fertigen Stück möglich, wenn durch die Vorspannung die Dehnungsfähigkeit der Schweisse nahezu erschöpft ist, und gleichzeitig die Festigkeit der Naht geringer ist als die des vollen Bleches (bei Nacktdrahtschweißungen nicht selten).

Will man sich Rechenschaft geben, mit wievielfacher Sicherheit eine vorgereckte, unter Wärmespannungen stehende Schweissnaht hält, so hat man festzustellen, welcher Anteil der Gesamtdehnung erschöpft ist. Obige Formeln geben einen Anhalt für die Berechnung der Reckung in ungünstigen Fällen. Bei Feststellung der Dehnung bis zum Reissen von Schweissnähten muss man berücksichtigen, dass

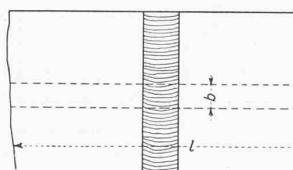


Abb. 3.

es sich um sehr kurze „Einspannlängen“ handelt. Dabei wird die Dehnung grösser als bei normaler Einspannlänge. Wir haben z. B. bei Exotherm-Elektroden Typ SCW der Ateliers de Sécheron, Genf, eine Dehnung von 42 bis 67 % festgestellt für die bei Schweissnähten in Frage kommenden Verhältnisse von der Einspannlänge zur Dicke. Elektroden mittlerer Qualität geben unter gleichen Bedingungen etwa 25 bis 28 % Dehnung. Diese Werte gelten allerdings für runde Probe-Stäbe. Wenn die Zerreisslänge sehr breit ist, wie es bei Schweissnähten immer der Fall ist, dann wird die Dehnung geringer. Setzt man sie um 30 % niedriger an als die oben ermittelte, so bleibt noch eine Dehnung von 30 bis 40 % für hochwertige Elektroden und 16 bis 20 % Dehnung für mittlere Elektroden. Bei der oben errechneten Reckung der Schweissnähte in der Grössenordnung von 4 bis 6,4 % hat man demnach bei hochwertigen Elektroden eine Sicherheit von mindestens  $\frac{30}{6,4} = 4,7$  und bei mittleren Elektroden von  $\frac{16}{6,4} = 2,5$ . Die letzte Zahl ist schon ziemlich gering, sodass man bei starr eingespannten Nähten lieber von der Verwendung mittlerer Elektrodensorten absehen sollte. Wie oben erwähnt, sind alle genannten Dehnungszahlen für ungünstige Fälle gewählt, sodass man fast immer höhere Sicherheit zu erwarten hat. Ausserdem ist zu berücksichtigen, dass bei mehrmaligen Schweissungen die jeweils untere Lage ausgeglüht und grossenteils entspannt wird, und dass die Formeln in der vorliegenden Fassung überhaupt für einlagige Schweissungen gelten, die unter ungünstigsten Bedingungen niedergebracht werden, aber dabei doch eine günstige Form nach Abb. 4a haben.

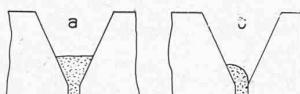


Abb. 4.

Um nach der berechneten Dehnung den genauen Spannungszustand der Schweisse zu erkennen, muss man das Zerreissdiagramm zu Hilfe nehmen. Es wird nach Zerreissdiagramm bei einer Schweisse von 50 kg/mm<sup>2</sup> Festigkeit und 40 kg/mm<sup>2</sup> Fließgrenze bei z. B. 3 % Dehnung die Spannung von 42 kg/mm<sup>2</sup> erreicht.

Man stellt sich die Frage, ob man die Schweisse überhaupt noch belasten kann, da sie doch schon mit 42 kg/mm<sup>2</sup> vorbeansprucht ist. Es sei z. B. zu untersuchen, ob eine Nutzlast von 12 kg/mm<sup>2</sup> noch zulässig ist oder nicht. Man würde bei oberflächlicher Betrachtung sagen: 42 kg/mm<sup>2</sup> + 12 kg/mm<sup>2</sup> machen 54 kg/mm<sup>2</sup>, das ist mehr als die Zerreissfestigkeit von 50 kg/mm<sup>2</sup>, die Schweisse reisst also. Das ist aber nicht zutreffend.

Um richtig zu sehen, müssen die Erscheinungen vom Standpunkt der Formänderungsarbeit aus betrachtet werden. Dies ist möglich am bequemsten an Hand eines Zerreissdiagramms (Abb. 5). Wir errechnen nach dem Hookeschen Gesetz eine Spannung von 650 kg/mm<sup>2</sup> für 3 % Dehnung. Das experimentell gefundene Zerreissdiagramm zeigt uns aber, dass in Wirklichkeit bei 3 % Dehnung eine Spannung von etwa 42 kg/mm<sup>2</sup> besteht. Die Wärmespannungen haben uns eine Formänderungsarbeit von Kraft  $\times$  Weg = Fläche A B C D geleistet. Wir nehmen an, wir könnten jetzt das eingespannte Stück, das unter einer Spannung von 42 kg/mm<sup>2</sup> steht, entlasten. Es verkürzt sich dabei um die Strecke ED und die Zugspannung ist Null geworden. Wir haben nun nicht mehr den ursprünglichen, sondern einen vorgereckten Werkstoff mit einer Fließgrenze von 42 mm<sup>2</sup>. Er ist um etwa 2,8 % vorgereckt (Punkt E in Abb. 5) und hat nur noch 17,2 % Dehnung statt der ursprünglichen 20 %.

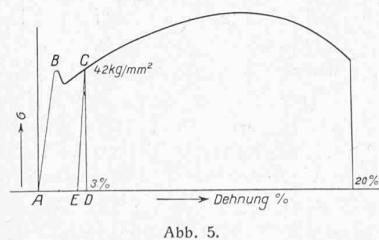


Abb. 5.

Wird nun ein solcher Werkstoff mit 12 kg/mm<sup>2</sup> beansprucht, so dehnt er sich nach dem Hookeschen Gesetz dabei im Bereich elastischer Dehnung. Er verträgt diese Spannung ohne weiteres. Beladen wir allmählich höher und höher, so folgt der Dehnungs-Spannungszustand der Linie EC, bis bei C wieder 42 kg/mm<sup>2</sup> erreicht sind. Wir haben wieder eine Formänderungsarbeit von der Grösse des Dreiecks ECD geleistet. Diese Arbeit und nicht mehr kann eine Kraft von 42 kg/mm<sup>2</sup> gegen den vorhandenen Stahl leisten.

Jetzt erhebt sich die Frage nach der Arbeitsfähigkeit einer auf den Stahl wirkenden, zusätzlichen äusseren Kraft. Dafür ist sowohl der Weg, den diese Kraft zurücklegen kann, als auch die Grösse dieser Kraft von Bedeutung. Man ist von der Festigkeitslehre her gewohnt, mit Kräften zu rechnen, die über einen sehr langen Weg wirken, der jedenfalls lang genug ist, um die Dehnungsfähigkeit des Eisens zu erschöpfen und bei genügender Stärke den Bruch des tragenden Eisenteiles herbeizuführen. Demgegenüber haben wir es bei den Wärmespannungen, die beim Schweißen auftreten, mit Kräften zu tun, die nur einen kurzen Weg wirken. Wir haben z. B. oben festgestellt, dass der zurückgelegte Weg 3 % der Breite der Schweissnaht betragen kann. Nach Zurücklegung dieses Weges ist die Arbeitsfähigkeit der Wärmespannungen erschöpft. Wenn das Stück nur wenig über 3 % binaus durch eine äussere Kraft gereckt wird, so verschwinden die Wärmespannungen, sobald die äussere Kraft fortfällt. Daraus folgt, dass die äussere Kraft, wenn sie den Rest der zur Zerstörung des Stückes erforderlichen Formänderungsarbeit aufbringen soll, die volle Zerreissfestigkeit allein für sich schon aufbringen muss, ohne Rücksicht auf die Wärmespannungen.

Wir machen uns den Vorgang an folgender Vorrichtung klar:

Eine Feder trage bei elastischer Federung maximal 35 kg und gehe bei 50 kg zu Bruch. Wir geben der Feder eine Vorspannung von 40 kg, z. B. gemäss Abb. 6.

Die Feder sei an der Wand A befestigt. Um ihr eine Vorspannung zu geben, kann man z. B. über die Seillrolle 40 kg an der Feder anhängen und dann das Stück B blockieren. Die Feder hat jetzt 40 kg Vorspannung (analog der Wärmespannung) und wir können das Gewicht abnehmen.

Die Feder ist bereits ein Stück überelastisch gereckt, da die Streckgrenze bei 35 kg liegt. Wenn wir sie also entlasten, geht sie nicht mehr ganz auf ihre Ursprungslänge zurück. Es ist eine Formänderungsarbeit geleistet. Die Arbeitsfähigkeit einer Last bis zu 40 kg gegenüber der Feder ist aber damit vollständig erschöpft. Trotz der 40 kg Vorspannung müssen wir nämlich ein Gewicht von über 40 kg auflegen, um eine weitere Verlängerung der Feder herbeizuführen, weil mit der Verlängerung der Feder die Vorspannung verschwindet.

Bei den Wärmespannungen liegt im wesentlichen der gleiche Fall vor; die Vorspannung beeinträchtigt die zulässige Belastung bzw. die Sicherheit nur dann, wenn durch sie schon ein grosser Teil der Dehnungsfähigkeit des Materials verzehrt ist, was bei minderwertigen Schweissen, bei denen die Dehnungsreserve ohnehin klein ist (z. B. bei Nackdraht) allerdings nicht selten ist.

Bei Schweissnähten ist es selten, dass sie durch die Wärmespannungen der ganzen Länge nach auf Zug beansprucht sind. Meist wechseln Druck und Zug ab, je nach Fortschreiten der Schweissung. Schweisst man z. B. nach Abb. 7 erst das Stück A, dann B und zuletzt C, so kann man in C Zug, in A und B aber Druck erwarten. Die Unschädlichkeit einer Vorspannung, selbst über die

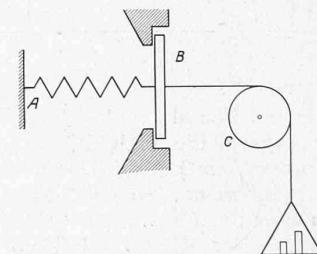


Abb. 6.

Elastizitätsgrenze hinaus, wird bei diesem Beispiel klar, wenn wir die drei Stücke ABC durch je eine Feder ersetzt denken, wobei die Feder C etwas kürzer sei als A und B (Abb. 8). A und B erhalten durch die Zugspannung von C eine Druckspannung. Werden jetzt die drei Federn durch die Kraft P gezogen, so verlängern sich alle drei Federn gleichzeitig. Die Vorspannung von C hört in dem Augenblick auf, in dem A und B ihre ursprüngliche Länge wieder haben und die Feder C trägt in diesem Augenblick allein die volle äussere Kraft P. Bei weiterer Dehnung tragen alle drei Federn. C kommt schneller an die Fliessgrenze als A und B, sie verlängert sich dann etwas, sodass

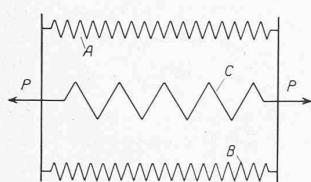
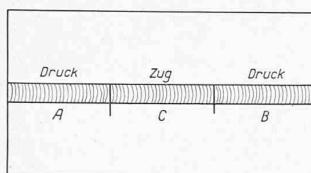


Abb. 7 (oben).

Abb. 8 (darunter).

A und B stärker tragen müssen. Nach Entspannung haben dann alle Federn etwa gleiche Länge, womit die Vorspannung behoben ist.

Mittels des Zerreissdiagrammes können die Spannungen und Dehnungen von Stücken, die durch Wärmespannungen vorgespannt sind, ziemlich genau verfolgt werden (Abb. 9). Wir befinden uns bei 3 % Dehnung des Stückes z. B. bei Punkt C, Spannung = 40 kg/mm<sup>2</sup>. Belasten wir von aussen mit 15 kg/mm<sup>2</sup>, so dehnt sich das Stück nach CF. Zur Erreichung dieses Punktes verlängert man EC über C hinaus bis 55 kg/mm<sup>2</sup> (40 + 15). Dann ziehe man eine Senk-

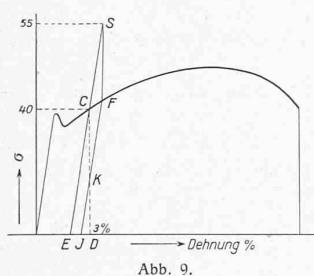


Abb. 9.

rechte SF und erhält damit als Schnittpunkt mit der Zerreisskurve die endgültig erreichte Spannung im Punkt F (40,5 kg/mm<sup>2</sup>). Wird nun die äussere Kraft 15 kg/mm<sup>2</sup> fortgenommen, so geht die Belastung um 15 kg/mm<sup>2</sup> auf 35 kg/mm<sup>2</sup> zurück. Dieser Vorgang spielt sich längs der Linie FJ ab. Der Schnittpunkt K von CD mit FJ liefert die restlich verbleibende Vorspannung. Wollte man die Vorspannung vollständig fortführen, so müsste man das Stück so stark beladen, dass es um den Betrag ED gereckt wird.

#### Zusammenfassung.

Wir haben festgestellt, dass die Wärmespannungen beim Gebrauch guter Elektroden keine Gefahr bilden. Die ermittelten Formeln geben darüber Auskunft, welche Gesichtspunkte man bei der Ausführung der Schweißarbeit zu beachten hat, um die Wärmespannungen einzuschränken: Man muss die in einer Lage eingebrachte Menge Schweiße möglichst klein halten. Der wählbare Faktor ist  $g = \text{Eingeschmolzenes Gewicht}$ . Alle andern Größen, meist auch  $b'$ , sind konstruktiv festgelegt (Gl. 6). Mit andern Worten ausgedrückt: Wenig Material auf einmal auftragen und lieber mehr Lagen schweissen.<sup>3)</sup>

Wann können die Wärmespannungen für ein geschweisstes Stück gefährlich werden?

1. Wenn die Dehnung durch die Schrumpfung nahezu erschöpft ist (schlechte Elektroden oder sehr ungünstige Anordnung und Form der Nähte), z. B. starke Häufung von Nähten oder sehr breite Nähte mit Kerben.

3) Wenn man die einzelnen Lagen ohne Abkühlung schnell hintereinander schweissst, so gelten die Formeln 7, 8, 9 in Annäherung auch bei mehrlagigen Schweißen. Desgl. muss man bei Häufung von Nähten ohne Zwischenkühlung die einzelnen Dehnungen addieren, um in Annäherung die Reckung der schwächsten Naht zu erhalten.



Abb. 12. Rutschung bei Bruck im Zillertal, Nordtirol.

2. Wenn sich in dem den Wärmespannungen unterworfenen Konstruktionsteil eine Kerbe oder eine kerbenartig wirkende schwache Stelle befindet (z. B. eine zu schwach bemessene Naht).

In diesen beiden Fällen sind die Spannungen umso gefährlicher, je weiter sie reichen, d. h. je mehr elastische Formänderungsarbeit aufgespeichert ist. Ueberelastische Formänderungsarbeit ist für die Sicherheit der fertigen Konstruktion nicht mehr gefährlich.

Wenn man sich also über die Gefahr der Wärmespannungen Rechenschaft geben will, so hat man zu messen: 1. Wie weit abseits von den Schweißnähten noch Wärmespannungen vorhanden sind, 2. wie weit das Material in der Nähe der Schweißnähte geflossen ist. Aus diesen Messungen kann man die noch vorhandene elastische Formänderung berechnen und feststellen, ob sie ausreicht, um bei zusätzlicher äusserer Beanspruchung etwa vorhandene schwächere Stellen zum Bruch zu bringen.

Spannungsmessungen mit Tensometer oder ähnlichen Instrumenten in der Nähe der Naht allein haben nur akademischen Wert und lassen keinerlei Schlüsse auf eventuelle Unsicherheit der Konstruktion zu.

Bemerkt sei weiterhin, dass die Feststellung geringer überelastischer Dehnung in der Nähe der Schweißnähte keinen Mangel darstellt, sondern eher das Gegenteil, weil damit erwiesen ist, dass auch die Schweißnaht so fest ist, dass sie einer Beanspruchung über die Elastizitätsgrenze des Bauteils hinaus standhält. Eine mässige Reckung stellt für die Naht eine Art Feuerprobe dar. Wie oben erwiesen wurde, bringt nämlich eine erhebliche äussere Zusatzlast dann nur eine ganz geringe Mehrspannung in die Schweißnaht, weil die Vorspannung fast im selben Masse verschwindet, wie die äussere Last zunimmt. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine solche Schweißnaht allen Beanspruchungen gewachsen ist, ist daher sehr gross.