

Über den Spannungszustand und die Festigkeit von Kehlnähten

Über die Wirkung von Blasen und Kerben von autogen und elektrisch geschweißten Nähten

von

E. Höhn

Oberingenieur des Schweizerischen Vereins
von Dampfkessel-Besitzern, Zürich



Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH
1931

Literatur-Verzeichnis

Folgende Druckschriften über Schweißung und Nietung sind vom gleichen Verfasser herausgegeben worden:

Versuche mit autogen geschweißten Kesselblechen.

Versuche mit autogen und elektrisch geschweißten Kesselteilen.

Ueber die Festigkeit elektrisch geschweißter Hohlkörper.

Nieten und Schweißen der Dampfkessel.

Die Sicherung geschweißter Nähte.

Ueber den Spannungszustand und die Festigkeit von Kehlnähten.

Ueber die Wirkung von Blasen und Kerben von autogen und elektrisch geschweißten Nähten.

Über den Spannungszustand und die Festigkeit von Kehlnähten

Über die Wirkung von Blasen und Kerben von autogen und elektrisch geschweißten Nähten

von

E. Höhn

Oberingenieur des Schweizerischen Vereins
von Dampfkessel-Besitzern, Zürich



Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 1931

ISBN 978-3-663-03109-3

ISBN 978-3-663-04298-3 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-663-04298-3

Ueber den Spannungszustand und die Festigkeit von Kehlnähten

von E. Höhn, Oberingenieur des
Schweizerischen Vereins von
Dampfkessel-Besitzern
Zürich.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
1. Einleitung	3
2. Spannungszustand der Flankennähte hinsichtlich der Längsrichtung	3
3. Experimentelle Untersuchungen über den Spannungszustand der Flankennähte in Längsrichtung	8
4. Bestimmung der Werte der Schubspannungen der Flankennähte	11
5. Ueber den Spannungszustand von Flankennähten in Querschnitten, Beitrag zur Theorie	13
6. Ueber den Spannungszustand von Stirnnähten in Querschnitten, Beitrag zur Theorie	14
7. Spannungszustand von Flankennähten bei Mitwirkung von Stirnnähten	16
8. Kraftlinienverlauf und Spannungen in den Flacheisen	18
9. Die Festigkeit von Stirn- und Flankennähten	20
10. Die Berechnung von Kehlnähten auf Festigkeit	24
11. Zusammenfassung	28
Fußnoten	33

1. Einleitung.

Durch die elektrische, zum Teil auch autogene Schweißung gelingt es, Kehlnähte zu schweißen und dadurch Verbindungen herzustellen; die an Einfachheit die genieteten übertreffen. Die Beurteilung der Festigkeit solcher Verbindungen setzt die Kenntnis des Spannungszustandes geschweißter Kehlnähte voraus. Es fehlt in der Literatur nicht an Vorschlägen zur Berechnung solcher Nähte auf Festigkeit, alles bisherige ist aber nicht sehr tieferschürfend.

„Kehlnaht“ ist der zusammenfassende Begriff für Stirn- und Flankennaht. Der Verfasser hat schon bei seinen ersten Untersuchungen auf den verwickelten Spannungszustand derselben hingewiesen.¹⁾

Bei den Flankennähten müssen wir zwei Fälle unterscheiden.

1. Die Bleche (Knotenbleche, Stehbleche usw.), an welche die Flacheisen angeschweißt sind, sind durch Fugen getrennt, durch die Flacheisen werden die Fugen überbrückt. 2. Die Bleche sind vollwandig und die Flacheisen bilden Verstärkungen. Zu dieser Gruppe gehören die Sicherheitslaschen für geschweißte Nähte. Wir untersuchen vorerst den Spannungszustand der Flankennähte.

2. Spannungszustand der Flankennähte hinsichtlich der Längsrichtung.

a) Die Flacheisen überbrücken eine Trennfuge.

In Abb. 1 (S. 5) ist die linke Hälfte der Verbindung veranschaulicht. Der Stab S ist belastet, innerhalb der Laschenverbindung sind die Spannungen σ_S der Stabteile und σ_L der Laschenteile wegen des Ueberganges von Kraftlinien von den einen an die anderen veränderlich. Im Stab fallen die Spannungen von $\sigma_{S \max}$ bis zum Wert 0 bei der Trennfuge, in den Laschen findet umgekehrt ein Anstieg von 0 auf $\sigma_{L \max}$ statt (Abb. 2). Der Einfachheit halber wird gradliniger Spannungsverlauf vorausgesetzt.

Die Dehnungen ϵ unterscheiden sich bei einachsiger Spannung wie in unserm Fall nur im Maßstab von den Werten σ . Die Aufgabe ist, Art und Grösse der Spannungen, die in den Flankennähten auftreten, zu bestimmen. Spannungen und Dehnungen in Stab und Laschen hängen nach Hook zusammen gemäß

$$\Delta l = \frac{Pl}{FE} \quad \frac{\Delta l}{l} = \epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (1)$$

In einem Schnitt x (Abb. 2) ist $\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}$. Für die ganze Längung des Stabes oder der Laschen innerhalb der Strecke l gilt

$$\Delta l = \int_0^l \epsilon \, dx = \frac{1}{E} \int_0^l \sigma \, dx \quad (2)$$

Bei proportionaler Spannungszunahme ist

$$\epsilon = n x \quad (3)$$

bzw. $\epsilon_0 = n \cdot 0$ und $\epsilon_{\max} = n l$, woraus

$$n = \frac{\epsilon_{\max}}{l}$$

Die Gleichung (2) mit $\epsilon = n x$ integriert, gibt

$$\Delta l = n \frac{l^2}{2} + C$$

Für $l = 0$ ist $\Delta l = 0$, daher $C = 0$.

$$\Delta l = \epsilon_{\max} \frac{l}{2} = \frac{1}{E} \sigma_{\max} \frac{l}{2} \quad (4)$$

Bei nicht linearem Spannungsverlauf können die Dehnungen aus dem Spannungsbild, das durch Messung bekannt sein muß (Beispiel in Abb. 14) gemäß

$$\Delta l = \frac{1}{E} \sum_0^l \sigma \Delta x \quad (5)$$

ermittelt werden. Die Längung Δl des Stabes ist verschieden von Δl der Laschen, schon wegen ungleichen Querschnitten. Außerdem dehnt sich der Stab örtlich bei gleichzeitiger Verkürzung der gegenüberliegenden Laschenteile und umgekehrt. Im Schnitt x ergibt sich die relative Verschiebung

$$\Delta a_1 = \Delta x_S - \Delta x_L = \frac{1}{E} \left(\sum_0^x \sigma_S \Delta x - \sum_0^x \sigma_L \Delta x \right) \quad (6)$$

Der Verlauf ist in Abb. 3 angegeben. Wir wollen die Verschiebungen Δa_1 als innere rel. Verschiebungen bezeichnen; es gibt, wie wir später sehen werden, noch eine andere Art der rel. Verschiebungen.

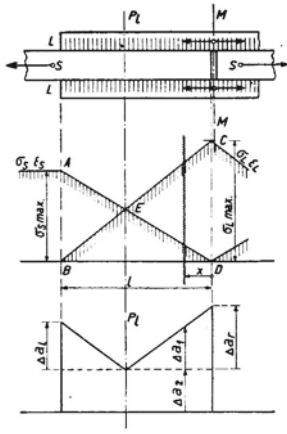


Abb. 1. Stab mit durch Flanken-
nähte aufgeschweißten Laschen, das Blech ist durch eine
Trennfuge gehälftet.

Abb. 2. Schematischer Span-
nungsverlauf bei Blech und
Laschen.

Abb. 3. Innere relative Ver-
schiebungen Δa_1 (max. Werte
 Δa_l u. Δa_r) bzw. äußere Δa_2 ,
schematisch.

Um dem Problem näher zu treten, nehmen wir die Stelle E, Abb. 2, in welcher $\sigma_L = \sigma_S$ als Ausgangspunkt. Den Schnitt, den wir durch diese Stelle legen, können wir Bezugsebene (P_l) nennen, wie bei Nietverbindungen²⁾. In dieser Ebene haben die rel. Verschiebungen den Wert 0, wir können sie zur Einspannungsebene machen. Rechts von P_l dehnen sich die Laschen mehr als die Stabteile, links davon verhält es sich umgekehrt. Die Verschiebungsgröße Δa_1 wächst nach den beiden Richtungen und nimmt in den Endstellungen Höchstwerte an (Abb. 3). P_l ist mit dem Zeichen l versehen, weil diese Bezugsebene links von der Symmetrieebene (M von Abb. 1) liegt, die andere liegt rechts von ihr.

Der Verschiebungsmechanismus kann durch den Vergleich der Verbindung mit ineinander gelegten Bürsten veranschaulicht werden. Stab und Laschen sind die Bürstenböden, die Flankennähte die Borsten (Abb. 4). Das Material der Böden sei zunächst äußerst elastisch (Kautschuck). Im Schnitt $P_l P_l$ haben Spannungen und Dehnungen den nämlichen Wert, eine rel. Verschiebung findet nicht statt, die Borsten bleiben vertikal gestellt. Nach rechts wächst die Teilung der Borsten bei der Bürste L zunehmend, nach links nimmt sie ab. In Abb. 4 sind Zu- und Abnahme als linear angenommen. Die ursprünglich konstanten Teillängen t ändern sich bei

$$\begin{aligned} \text{L nach rechts} & t \quad t(1 + \alpha t) \quad t(1 + 2\alpha t) \quad \dots \quad t(1 + n\alpha t) \\ \text{L nach links} & t \quad t(1 - \alpha t) \quad t(1 - 2\alpha t) \quad \dots \quad t(1 - m\alpha t) \end{aligned} \quad (7)$$

umgekehrt beim Stab

$$\begin{aligned} \text{S nach rechts} & t \quad t(1 - \beta t) \quad t(1 - 2\beta t) \quad \dots \quad t(1 - n\beta t) \\ \text{S nach links} & t \quad t(1 + \beta t) \quad t(1 + 2\beta t) \quad \dots \quad t(1 + m\beta t) \end{aligned} \quad (8)$$

$$t(1 - m\alpha t) = t(1 - n\beta t) = 0 \quad (8a)$$

Wir nehmen jedoch kein Interesse an der weitem Entwicklung dieser Gleichungen. Abb. 3 gibt an, wie die Verschiebungsgröße Δa_1 verläuft, sie hat in der Bezugsebene den Wert 0.

Zu den bis jetzt betrachteten innern rel. Verschiebungen treten noch solche anderer Art, man wird sich ihrer bewußt, wenn die Böden der Bürsten unseres Gleichnisses nicht mehr elastisch sind, sondern starr, z. B.

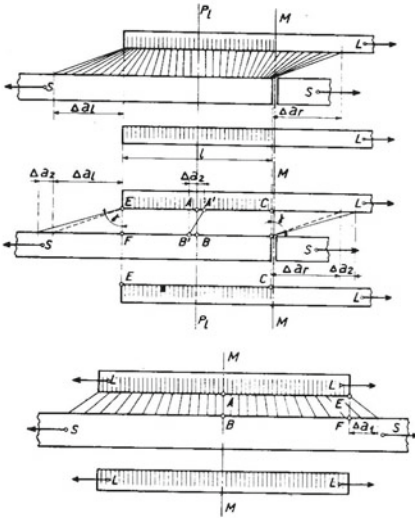


Abb. 4. Schema der Beanspruchung von Flankennähten durch innere rel. Verschiebungen (Δa_1 bzw. Δa_1 und Δa_1) für Stäbe mit Trennfugen (Bürstengleichnis).

Abb. 5. Schema der Beanspruchung durch innere und äußere rel. Verschiebungen Δa_1 bzw. Δa_2 , Stäbe mit Trennfugen.

Abb. 6. Schema der Beanspruchung von Flankennähten durch innere rel. Verschiebungen Δa_1 für vollwandige Bleche.

von Glas. Die mit S bezeichneten Stabhälften (Abb. 5), werden nach außen gezogen. Dabei bleibt die Länge l konstant, ebenso bei den Laschen L. Die Flankennähte sind elastisch, wie die Borsten voneinandergelegten Bürsten. Die Borsten werden sich infolge der Zugwirkung alle in die nämliche Schräge einstellen, A'B' von Abb. 5. Die Projektion von A'B' hat die Länge Δa_2 , dies gilt für alle Punkte. Der Verfasser hat diese Art der Verschiebung früher äußere rel. Verschiebung genannt, sie ist durch die Konstanz ihres Wertes (Δa_2) gekennzeichnet. Es ist diejenige Verschiebung, die bei Vernietungen mit „Gleiten“ bezeichnet wird. Wie wir noch sehen werden, können

rel. Verschiebungen und Schubspannungen als proportionale Größen aufgefaßt werden. Die (mittlere) Schubspannung $\bar{\tau}$ die der äußern rel. Verschiebung Δa_2 entspricht, kann berechnet werden, es ist die Schubspannung, die vom Konstrukteur als Quotient aus Belastung und Haftfläche ermittelt wird (Gleichung 13).

Die gesamte rel. Verschiebung ergibt sich bei Stäben mit Trennfuge aus der Superposition

$$\Delta a = \Delta a_1 + \Delta a_2 \tag{9}$$

d. h. aus der Summe der innern und äußern rel. Verschiebungen.

Zur Erläuterung dient Abb. 5. Punkt A des Schnittes P_1 rückt nach A', Punkt B nach B'. Die äußerere rel. Verschiebung A'B' hat den Wert Δa_2 . Um soviel verschieben sich auch die Punkte C und E der Lasche nach rechts über entsprechenden Punkten des Stabes. Die durch die innern rel. Verschiebungen Δa_1 (Höchstwerte Δa_{1l} und Δa_{1r} in Abb. 5) gegebenen Winkeländerungen sind gestrichelt angedeutet. Die (ausgezogenen) Endlagen entsprechen der gesamten Winkeländerung γ (obwohl sich E nach rechts verschiebt, ist Δa_2 links an Δa_1 anzufügen).

Das Schema des Verlaufs der gesamten rel. Verschiebung Δa ist in Abb. 3 gezeigt. In der Bezugsebene (P_1) erreicht Δa ein Minimum, hier ist $\Delta a = \Delta a_2$ ³⁾. Für die Verhältnisse rechts von der Fuge müßte das Spiegelbild gezeichnet werden.

Der bisher betrachtete Fall des Stabes mit Trennfuge ist auf Knotenbleche anwendbar, wenn Streben so an diese angeschweißt werden, daß die Flankennähte der Streben bis an die Ränder der Knotenbleche reichen.

Der Fall der

b) Flacheisen, die an volles Blech angeschweißt sind, der in Abb. 7 dargestellt ist, eignet sich hauptsächlich bei der Sicherung geschweißter Nähte von zylindrischen Hohlkörpern durch Laschen, kommt auch bei Knotenblechen vor. Beim Versuchsstab, der der

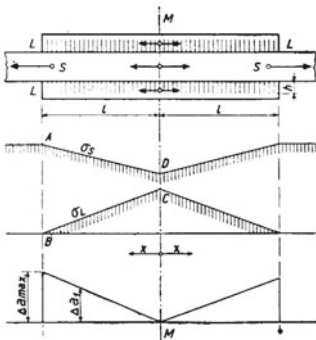


Abb. 7. Stab mit durch Flankennähte aufgeschweißten Laschen. Das Blech ist voll.

Abb. 8. Schematischer Spannungsverlauf bei Blech und Laschen.

Abb. 9. Innere relative Verschiebungen Δa_1 schematisch.

Abb. 7 entspricht, fehlt zwar die durch die Laschen überbrückte Naht, man kann aber das Vorhandensein einer Naht voraussetzen; ihr Material wäre das nämliche wie dasjenige des Stabes. Der Spannungszustand ist in Abb. 8 dargestellt, und wir haben zunächst zu untersuchen, ob dieses Schema zutrifft. Die Höchstspannung der Lasche $\sigma_{L \max}$ bei C erreicht den Mindestwert der Blechspannung $\sigma_{S \min}$ bei D nicht. Die Überlegung sagt, daß die Spannung der Laschen wegen örtlicher Querschnittsvermehrung an keiner Stelle diejenige des Stabes überschreiten kann. Daher ist $\sigma_{L \max} \leq \sigma_{S \min}$. Wäre $\sigma_L > \sigma_S$ und

käme D unter C zu liegen, so hätten wir zwei Schnittpunkte, in denen $\sigma_L = \sigma_S$, d. h. zwei Bezugsebenen wären vorhanden. Mit dem Zusammenfallen von C und D würde es noch eine Stelle mit gleicher Spannung geben, in diesem Fall wären beide Bezugsebenen in eine einzige verschmolzen. Weil C in Wirklichkeit unter D liegt, fehlt dem Begriff „Bezugsebene“ die Anwendung. Zur Beurteilung des Spannungszustandes geht man von der Mittelebene aus, die Spannungen und die rel. Verschiebungen verlaufen symmetrisch.

Der Spannungszustand gemäß Abb. 8 ist viel einfacher als gemäß Abb. 2, dies trifft auch für den Mechanismus der Verschiebungen zu. Die äußere rel. Verschiebung (Δa_2) fällt wegen Fehlens einer Trennfuge dahin, die Verschiebungen (Δa_1) erfolgen nur nach Maßgabe der Dehnungsunterschiede, dem Hooekschen Gesetz entsprechend nach Gl. (6).

Für den Fall: Stäbe oder Laschen über Vollblech geschweißt, gilt

$$\Delta a = \Delta a_1. \quad (10)$$

In der Mittelebene M sind die rel. Verschiebungen wegen des Gleichgewichtszustandes links und rechts = 0. Das Schema ist in Abb. 9 angegeben, von M aus wächst Δa_1 symmetrisch.

Auf das Gleichnis der ineinandergelegten Bürsten bezieht sich Abb. 6. Stab und Laschen sind in gedehntem Zustand angegeben; der Stab dehnt sich, wie früher bewiesen, mehr als die Laschen, Δa_1 erreicht den Höchstwert am Laschenende.

3. Experimentelle Untersuchungen über den Spannungszustand der Flankennähte in Längsrichtung.

1. Bleche mit Trennfugen.

Der für den Versuch bestimmte Stab 12 ist in Abb. 12 und 13 dargestellt. Der Stab wird mit 15 t belastet, bei $1/4$ t werden die Dehnungsmesser aufgesetzt, für die Dehnungsmessungen ist $Q = 14,75$ t. Zunächst sind durch Messung die Werte der Dehnungen von Stab und Laschen festzustellen⁴). Man muß von der Symmetrieebene M ausgehen, im Schnittpunkt von M und C wird die eine Schneide des Dehnungsmessers aufgesetzt. Die Dehnungen der Laschen ergeben sich, wenn die zweite Schneide des Dehnungsmessers auf Punkten der Lasche aufgesetzt wird, die Werte Δa_1 in Abb. 10 über der Abszissenachse aufgetragen, ergeben den Linienzug L_C . Um die Bewegung des Stabes zu analysieren, beschränkt man sich auf

einige Punkte, in welchen Stifte im Stab festgeschraubt werden. Die Doppelkreise in Abb. 13 besagen, daß ein gewisses Spiel zwischen

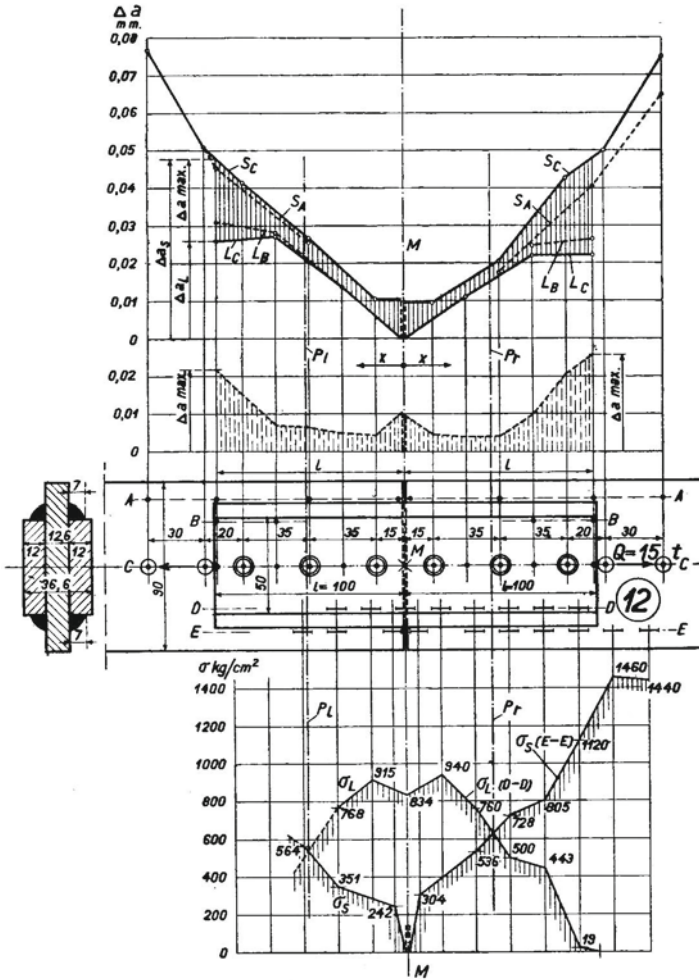


Abb. 10. Feststellung der gesamten rel. Verschiebungen bzw. der Schubspannungen der Flankennähte bei Stab 12 (mit Fuge).

Abb. 11. Gesamte rel. Verschiebungen, Δa , herausgezeichnet.

Abb. 12 und 13. Probestab.

Abb. 14. Spannungen von Stab und Lasche.

Stiften und Löchern der Laschen vorhanden ist. Durch Aufsetzen der zweiten Dehnungsmesserschneide auf den Stiften und Abtragen der Verlängerungen Δa_s ergibt sich der Linienzug S_C . Mit dieser

Messung wird nicht nur die elastische Dehnung, sondern auch die rel. Verschiebung des Stabes festgehalten, sodaß die Unterschiede der Ordinaten Δa_S und Δa_L die gesamten rel. Verschiebungen des Stabes gegen die Laschen, beziehungsweise umgekehrt, ergeben, d. h. $\Delta a_S - \Delta a_L = \Delta a$. In Abb. 11 ist Δa herausgezeichnet.⁵⁾

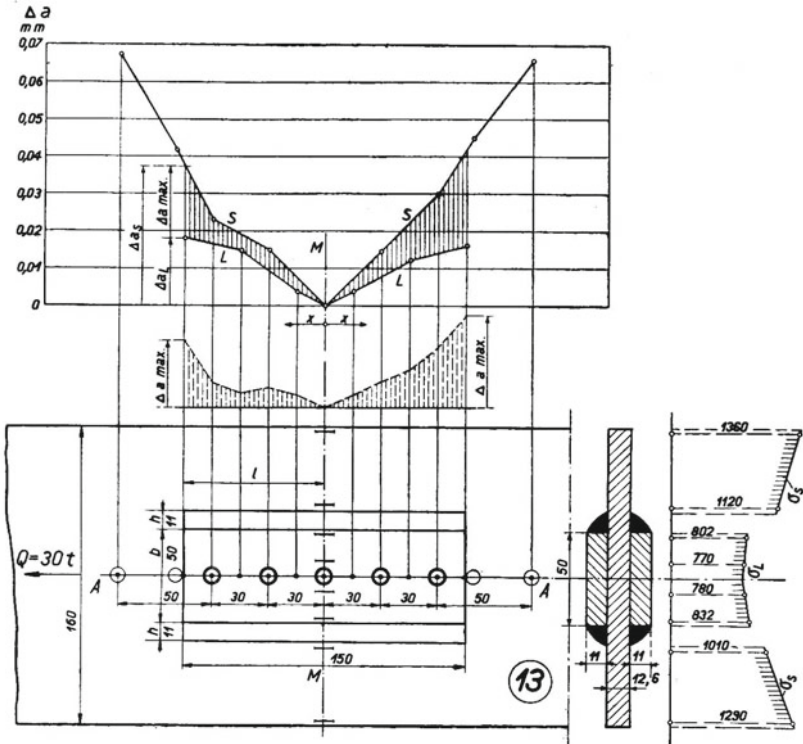


Abb 15 Experimentelle Feststellung der rel. Verschiebungen bzw. der Schubspannungen, in den Flankennähten beim vollwandigen Stab 13.

Abb. 16. Gesamte rel. Verschiebung Δa , herausgezeichnet.

Abb. 17 und 18. Art des Probstabes.

Abb. 19. Spannungen in Stab und Lasche (Bestimmung von $\bar{\sigma}_S$ und $\bar{\sigma}_L$).

Das Experiment bestätigt die vorausgehenden Erwägungen. In den Bezugsebenen P_l und P_r erreicht Δa minimale Werte, gegen die Enden der Bezugsstrecke l maximale, ähnlich wie bei Abb. 3. Mit Bezug auf kleine Unstimmigkeiten ist darauf hinzuweisen, daß mit der Dehnungsmessung nur einzelne Punkte erfaßt werden können, zwischen ihnen ist der genaue Verlauf unbekannt. Zu einer Fehler-

quelle führt auch die Messung in der Längs-Mittelebene C. In dieser finden bei Stab und Laschen kleine Durchbiegungen statt, weil beide in den Flankennähten zusammengespannt sind, nicht in C. Deswegen sind noch die Verschiebungen $\Delta a'$ zwischen Lasche in der Meße ebene B und Stab in der Meße ebene A festgestellt worden. Die entsprechenden Linienzüge S_A und L_B sind in Abb. 11 gestrichelt gezeichnet. Der Unterschied Δa und $\Delta a'$ ist gering. Der Wert der rel. Verschiebung Δa_s bei der Fuge ist aus der Erweiterung der letztern ermittelt worden.

2. Voller Stab.

Die analogen Meßergebnisse sind hinsichtlich des vollen Stabes 13 in den Abb. 15 und 16 wiedergegeben. Aus Symmetrierücksichten ist die Verschiebung $\Delta a = 0$ in der Mittelebene M. Art und Abmessungen des Versuchsstabes 13 sind in Abb. 17 und 18 gezeigt. In Abb. 19 sind die Spannungen, die in Stab und Laschen in der Mittelebene M auftreten, aufgezeichnet, hieraus ergeben sich die mittleren Spannungen $\bar{\sigma}_S$ und $\bar{\sigma}_L$ in Gleichung (17). Die angeschriebenen Spannungen entsprechen Mittelwerten von beidseitigen Stabmessungen.

Abb. 16 trägt durchaus den Charakter der schematischen Abb. 9. Frühere Ueberlegungen finden sich auch hier bestätigt.

4. Bestimmung der Werte der Schubspannungen der Flankennähte.

Die rel. Verschiebungen erzeugen in den Flankennähten zur Hauptsache Schubspannungen. Der Wert hängt von der Winkeländerung γ und vom Abstand q der verschobenen Teile ab.

$$\Delta a = \gamma q \quad (11)$$

wobei bekanntlich

$$\gamma = \beta \tau = \frac{\tau}{G}$$

Gleichung (11) läßt weiter keine Rechnung zu, weil die Unbekannte q nicht bestimmbar ist. Dagegen bieten uns die rel. Verschiebungen einen Anhaltspunkt, ihre Größe ist durch Messung bekannt. Die Annahme kann getroffen werden

$$\tau = c \Delta a \quad (12)$$

d. h. relative Verschiebung und Schubspannung sind Verhältniszerte. In dieser Gleichung sind τ und c unbekannt.

Nach Gl. (9) und (10) ist für Blech mit Fuge $\Delta a = \Delta a_1 + \Delta a_2$
für Vollblech $\Delta a = \Delta a_1$

Die Verschiebungsgröße Δa_1 ist veränderlich (Abb. 11 und 16).

Beim Blech mit Fuge kann der konstante Betrag für die äußere rel. Verschiebung Δa_2 in Zusammenhang mit der Schubspannung $\bar{\tau}_2$ gebracht und diese Größe berechnet werden

$$\bar{\tau}_2 = \frac{Q}{F_N} = \frac{Q}{4 l \cdot h} \quad (13)$$

Q ist die Last, F_N die Haftfläche, ihr Inhalt entspricht der Fläche eines Schnittes, der zwischen Laschen und Blech auf der einen Hälfte der Verbindung geführt wird. Dieser Schnitt ist genau genug $4 l \cdot h$, worin h die Nahthöhe. Der Faktor 4 im Nenner besagt, daß die Last Q von 4 Nähten von der Länge l übernommen wird. Nach Gleichung (13) legt sich jeder Konstrukteur die Nahtbeanspruchung so zurecht (ähnlich wie bei Vernietungen, wo die Rechnung ebensowenig zutrifft). l ist halbe Laschenlänge.

Die Werte Δa_2 entsprechen den Ordinaten in den Schnitten P_l und P_r in Abb. 11 (analog Abb. 3), wir vereinigen dieselben zu einem Mittelwert. Der Höchstwert der Schubspannung und τ_2 stehen im Verhältnis

$$\tau_{\max} : \Delta a_{\max} = \bar{\tau}_2 : \Delta a_2 \quad (14)$$

Gegenüber dieser zwar richtigen aber etwas unsichern Methode (man stellt nur auf die Messungen bei P_l und P_r ab), zieht der Verfasser vor, in der Proportion (14), an Stelle von Δa_2 die mittlere Höhe $\overline{\Delta a}$ einer der schraffierten Flächen von Abb. 11 einzusetzen, gemäß

$$\overline{\Delta a} = \frac{J}{l} \quad (15)$$

worin J der Flächeninhalt bedeutet. Wegen ungleicher Größe von J rechts und links wird man auch hier den Mittelwert nehmen. Die Flächen sollten allerdings kongruent sein. Wenn dies nicht zutrifft, liegt es an Ungenauigkeiten in der Form der Verbindung und an Schweißspannungen. In den Gleichungen (13) und (14) schreiben wir $\bar{\tau}$ an Stelle von $\bar{\tau}_2$, so daß

$$\tau_{\max} = \frac{\bar{\tau} \Delta a_{\max}}{\overline{\Delta a}} \quad (16)$$

Damit ist die Aufgabe hinsichtlich des Stabes mit Trennfuge gelöst, Zahlenwerte folgen noch.

Auf den Vollwandstab ist Gleichung (17) anwendbar, nicht (13). Die Kraft, die auf die Flankennähte einer Laschenhälfte wirkt, ist

durch $F_L \bar{\sigma}_L$ gegeben, nicht durch Q (Q nur beim Vorhandensein einer Trennfuge). F_L ist der Querschnitt beider Laschen und $\bar{\sigma}_L$ die innewohnende Mittelspannung. Aus dem Verlauf von σ_L in Abb. 19 folgt $\bar{\sigma}_L$.

Der Mittelwert der Schubspannung ist

$$\bar{\tau} = \frac{F_L \bar{\sigma}_L}{F_N} = \frac{F_L \bar{\sigma}_L}{4 h l} \quad (17)$$

und die Maximalwerte (rechts und links von Abb. 16) erfolgen aus Gl. (16).

Die Ausrechnung ergibt folgende Werte:

Abb. 11	Abb. 16
Stab 12, mit Trennfuge	Stab 13, vollwandig
$Q = 14,750 \text{ kg}$	$F_L \bar{\sigma}_L = 8500 \text{ kg}$
$\bar{\tau} = \frac{Q}{4 h l} = 527 \text{ kg/cm}^2$	$\bar{\tau} = \frac{F_L \bar{\sigma}_L}{4 h l} = 258 \text{ kg/cm}^2$
links $\tau_{\max} = 1266 \text{ kg/cm}^2$	links $\tau_{\max} = 645 \text{ kg/cm}^2$
rechts $\tau_{\max} = 1435 \text{ kg/cm}^2$	rechts $\tau_{\max} = 826 \text{ kg/cm}^2$
$\tau_{\max} : \bar{\tau} = 2,40 \text{ bzw. } 2,72$	$\tau_{\max} : \bar{\tau} = 2,50 \text{ bzw. } 3,20 \text{ fach}$

τ_{\max} ist also ein Vielfaches des Mittelwertes $\bar{\tau}$, desjenigen, den der Konstrukteur in der Regel allein kennt. Das muß man sich stets vor Augen halten, es ist das wichtigste Ergebnis der Versuche.

5. Über den Spannungszustand von Flankennähten in Querschnitten. Beitrag zur Theorie.

Die bisherigen Betrachtungen und Versuche betreffen den Spannungszustand von Flankennähten in der Längsrichtung. Über den Spannungszustand im Querschnitt läßt sich die nachfolgende Betrachtung anstellen. (Messungen sind bis jetzt nicht gemacht worden, sind wohl auch schwer oder überhaupt nicht durchführbar).

Aus einer Flankennaht mit dem Profil ABC (Abb. 20) soll durch zwei benachbarte parallel geführte Querschnitte ein Stück herausgeschnitten werden; es ist in Abb. 20 links in der Ansicht von oben dargestellt, der Länge nach schraffiert. Das Flacheisen, dessen Längsspannungen andere sind, als die der Unterlage, dehnt sich oder verkürzt sich relativ zu dieser, wobei Spannungen in dem betrachteten Stück wachgerufen werden. Um zu einem Urteil über die Art derselben zu gelangen, wollen wir den Querschnitt ABC

in der Weise verändern, daß von der Kante BC Material weggenommen wird, so daß nur noch solches bei A verbleibt. Ein kleiner Rest ist ausschließlich auf Schub beansprucht. Nehmen wir umgekehrt Material bei A weg, so daß eine Brücke bei BC übrig bleibt, so wird diese auf Biegung und Schub beansprucht nach Art eines eingespannten Trägers. Die Brücke BC ist in höherm Maß federnd als das Element bei A. Mit großer Wahrscheinlichkeit kann der Spannungszustand hinsichtlich der x-Richtung durch ein Trapez ABDE mit der Resultierenden R dargestellt werden. Der Sachverhalt bleibt hinsichtlich der Unterlage AB, also nach Drehung des Naht-Elementes ABC um 90° der nämliche, vgl. rechte Seite der Abb. 20. Die Resultierende R ist für AB von nämlicher Größe wie für AC, aber entgegengesetzt gerichtet. Der Hebelarm r' des Kräftepaars erscheint in Projektion; der wirkliche Abstand ist $r = r' \sqrt{2}$. Dies scheinen dem Verfasser die Gründe für die im Kap. 9 bekanntgegebene Feststellung, daß die durch die Naht übertragenen Kräfte nicht proportional mit der Größe des Nahtquerschnittes wachsen.

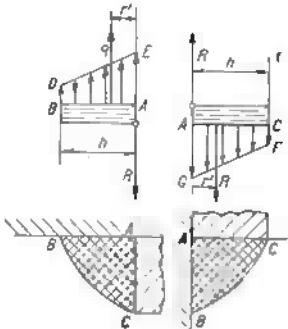


Abb. 20. Beanspruchung der Flankennaht.

6. Über den Spannungszustand von Stirnnahten in Querschnitten.
Beitrag zur Theorie.

Verschiebt man bei den in Abb. 21 gezeichneten Flacheisen die Stirn AC parallel sich selbst, so entstehen Spannungen in der Naht

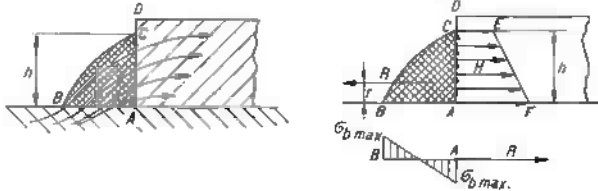


Abb. 21. Mutmaßlicher Verlauf der Kraftlinien in einer Stirnnaht.
Abb. 22 Mutmaßliche Verteilung der Spannungen in einer Stirnnaht.

ABC. Um diese nach Richtung und Größe zu kennen, müßte der Verlauf und die Zahl der durch die Naht durchtretenden Kraftlinien

bekannt sein. Leider sind Messungen hinsichtlich solcher Nahtschnitte noch nie gemacht worden. Dagegen kennt man im allgemeinen den Verlauf der Kraftlinien bei Vollwandstäben mit Doppellaschen (vgl. Abb. 35)⁶⁾.

Den Durchtritt der Kraftlinien durch die Naht kann man sich vorstellen, wie in Abb. 21 angegeben. Mit großer Wahrscheinlichkeit sind sie bei A dichter als bei C. Wie sie sich im Flacheisen verteilen, ist im allgemeinen auch nicht bekannt, auf einen Spezialfall werden wir zurückkommen (Abb. 36).

Die Frage des Kraftlinienverlaufs veranlaßt zunächst einige Bemerkungen über die Profilform. Wir erkennen, daß ein Profil gemäß Abb. 21 oder 24 für den Fluß der Kraftlinien günstiger ist als ein solches gemäß Abb. 23; noch besser geeignet ist dasjenige gemäß Abb. 25, wobei das Flacheisen abgegratet wird. Profile gemäß Abb. 23 werden heute nur noch selten in Zeichnungen angetroffen, dagegen finden solche gemäß Abb. 24 allgemeine Verwendung⁷⁾, sie haben auch in den Normalien Eingang gefunden⁸⁾.

In Abb. 22 sei BA als x- und AC als z-Richtung bezeichnet. Die Hauptspannungen zerlegen wir, obwohl dieselben nach Größe und Richtung bloß supponiert sind, in die Komponenten H und V in den bezeichneten Richtungen. Für die Kenntnis des wahren Verlaufs der Spannungen H gibt es zwei Anhaltspunkte; der eine ist

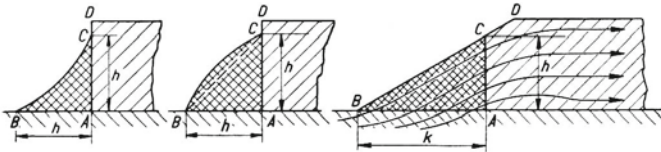


Abb. 23, 24 und 25. Verschiedene Formen des Stirnnahtprofils.

bereits genannt: bei A sind die Hauptspannungen größer als bei C, daher auch die Komponenten. Der zweite Beweis ergibt sich aus den Versuchen bzw. aus den Zahlentafeln 1 und 3, S. 21/23. Das Flacheisen erzeugt durch relative Verschiebung ein Biegemoment in der Stirnfläche AC der Naht, welches durch ein Kräftepaar R mit dem Hebelarm r darstellbar ist, Abb. 22. Die Rechnung ergibt, daß r in allen Fällen klein ist, jedenfalls $r < h : 2$. Einer gleichmäßigen Spannungs-

verteilung würde $r = h : 2$ entsprechen. Wählen wir als Beispiel die Verhältnisse für den Stab 0 (Laschen durch Stirnnähte angeschweißt) in Zahlentafel 3. In diesem Fall ist $R = Q : 2 = 24,9 t$ und $h = 1,5 \text{ cm}$. Mit $r = h : 2 = 0,75 \text{ cm}$ würde ein Moment $M \approx 18 700 \text{ cm/kg}$ erreicht, so daß $\sigma_b \approx 8300 \text{ kg/cm}^2$, also zu groß. Mit $r = h : 4,6 = 0,326$ wird $\sigma_b \approx 3600 \text{ kg/cm}^2$. Solche Überlegungen zeigen, daß die Begrenzung der Spannungen H durch die Linie FE in Abb. 22 der Richtung nach richtig sein muß.

7. Spannungszustand von Flankennähten bei Mitwirkung von Stirnnähten.

a) Beitrag zur Theorie.

Wenn die Flacheisen nicht nur an den Flanken, sondern üblicherweise auch an den Stirnseiten mit dem Blech verschweißt sind, gemäß Abb. 26, wird der Spannungszustand, Abb. 27, sich gegenüber Abb. 2 ändern, die Stabspannung wird beim Laschenende rasch sinken, die Laschen-
spannung rasch steigen. Die Bezugsebene P_1 rückt infolgedessen nach außen (links), ebenfalls der Mindestwert der Verschiebungsgröße Δa_2 (Abb. 28). Da die Verschiebungsgröße mit dem Abstand der betrachteten Stelle von der Bezugsebene wächst, wird der Höchstwert rechts (gegen die Fuge) größer als derjenige links. Die Stirnnähte schützen somit die Enden der Flankennähte.

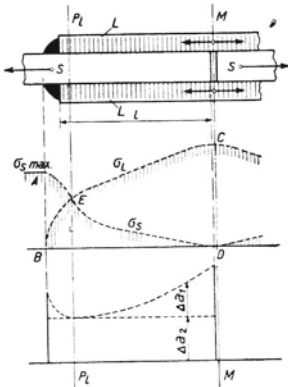


Abb. 26. Stab mit Fuge; das Flacheisen ist in Stirn- und Flankennähten angeschweißt.

Abb. 27. Schematischer Spannungsverlauf.

Abb. 28. Schematischer Verlauf der Verschiebungsgröße bzw. der Schubspannung in den Flankennähten.

b) Experimentelle Untersuchung.

Der Versuch wurde mit Stäben 10 und 11 durchgeführt, (vgl. Abb. 29 und 31). Der Rechnungsvorgang ist der frühere. In den Gleichungen (13) und (17) sind neben den Flankennähten auch die

Stirnnähte hinsichtlich der Haftfläche zu berücksichtigen ($4 l h + 2 b h$). Bei Stab 10 ist das eine Laschenende abgerundet, was weiter nichts auf sich hat. Die Rechnung ergibt

8. Kraftlinienverlauf und Spannungen in den Flacheisen.

a. Der Kraftlinienverlauf.

Die Trajektorien oder Kraftlinien folgen stets den Hauptspannungen ohne Rücksicht auf die Größe der letztern. In der Richtung der Trajektorien verschwinden die Schubspannungen. Es

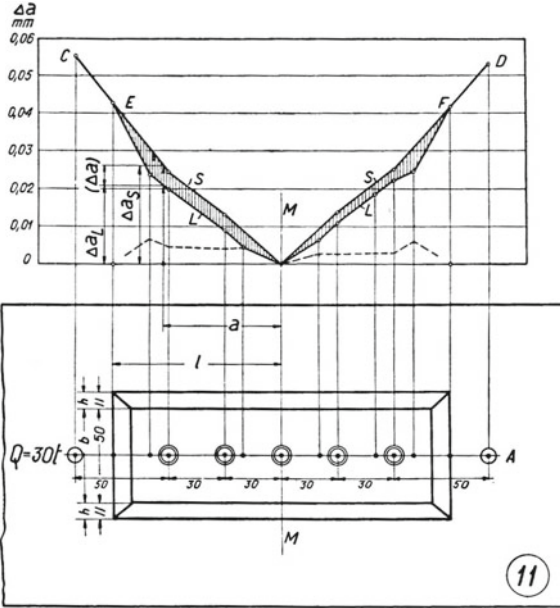


Abb. 31. Rel. Verschiebungen bzw. Schubspannungen in Flankennähten bei einem Vollwandstab, die Stirnnähte wirken mit.

Abb. 32. Beschaffenheit des Probestabes.

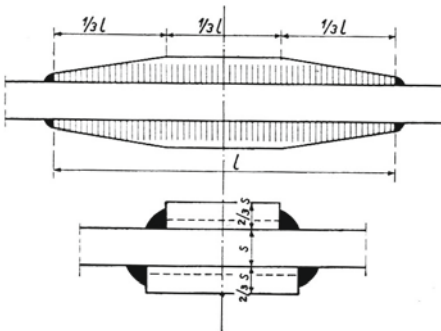


Abb. 33 und 34. Laschen mit ausgespitzten Enden.

ist zweckdienlich, den Spannungszustand von Stirn- und Flankennähten durch den Kraftlinienverlauf darzustellen. Dies geschieht in Abb. 35, S. 19 hinsichtlich des mit Nr. 4 bezeichneten Vollwandstabes (ohne Trennfuge). An das Flacheisen sind zwei

Laschen symmetrisch angeschweißt, unten und oben hinsichtlich des Zeichnungsblattes. Die Stellen, auf denen die Spannungsmesser aufgesetzt

werden, sind durch Striche mit Doppelpfeil bezeichnet. Die Pfeilrichtung fällt mit der Trajektorie zusammen, die Größe der betr. Hauptspannung ist durch die Pfeillänge angedeutet. Die Trajektorien in Querrichtung stehen normal zu den Längstrajektorien.

Die Laschen üben anziehende Wirkung auf die Kraft-

linien aus; diese treten durch die Nähte in die Laschen. In großer Zahl treten die Kraftlinien bei den Stirnnähten ein, in geringerer

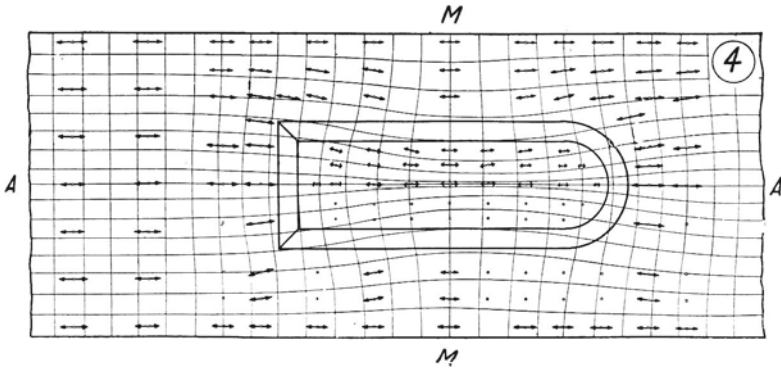


Abb. 35. Verlauf der Spannungstrajektorien in einem Stab mit beidseitig angeschweißten Laschen.

durch die Flankennähte (ein Stab mit Trennfuge würde ein geändertes Bild zeigen). Die Beanspruchung einer Stirnnaht ist nicht auf ihrer ganzen Breite konstant, was sich insbesondere am linken Laschenende zeigt. An den Ecken ist die Beanspruchung größer als in der Mitte.

Am meisten werden die Kraftlinien von Laschen mit abgerundeten Enden angezogen, was sich auf der rechten Seite der Mittellinie M zeigt. An solchen Stellen entstehen örtliche Spannungen bis 128 % der mittleren des Blechs (100 %). Es ist daher zweckmäßig, die Laschen an den Enden rechteckig zu halten⁹⁾.

b. Biegungsspannungen in den Flacheisen.

Wir wollen, als Erweiterung dieses Kapitels, uns noch mit dem Spannungszustand der Laschen im Querschnitt befassen.

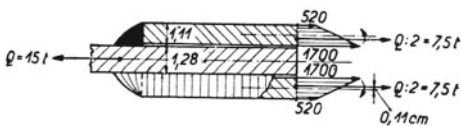


Abb. 36. Verteilung der Spannungen in Laschen, die eine Trennfuge überbrücken.

Wir haben zu unterscheiden, ob die Laschen über volles Blech geschweißt sind oder eine Trennfuge überbrücken. In diesem Fall treten Biegungsspannungen in den

Laschen bei den Trennfugen auf, wie in Abb. 36 gezeigt.

Es ist nicht anzunehmen, daß Biegungsspannungen von nämlicher Größe bei Laschen, die, wie im Fall der Abb. 35 über volles Blech

geschweißt sind, auftreten, weil die Laschen der ganzen Länge nach an die Flacheisen angeheftet sind. In diesem Fall verschwinden die Biegungsspannungen praktisch.

9. Die Festigkeit von Stirn- und Flankennähten.

a. Die Festigkeit von Stirnnähten.

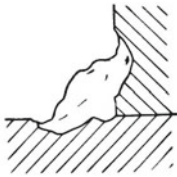


Abb. 37. Schnitt durch eine Stirnnaht mit vertikal abgesetztem Rand.

Abb. 37 zeigt einen Schnitt durch eine Kehlnaht, die eine Stirn- oder Flankennaht sein kann, der Photographie einer Ätzprobe entnommen. Der Blechrand ist senkrecht abgesetzt. Versuche des Verfassers im Jahre 1921 haben ergeben, daß den Nähten die größte Festigkeit zukommt, bei denen die auseinander springenden Schenkel einen Winkel von 90° bilden. Also dürfen die Blechränder nicht schief abgesetzt werden, wie dies hie und da ausgeführt wird.

Seit dem Jahr 1923 hat der Verfasser elektrisch geschweißte Kehlnähte auf ihre Festigkeit untersucht. Die Art der Probestäbe ist in den Abb. 38, 39 und 40 angegeben. Es sind solche mit Trennfugen. Brachen bei der Prüfung die Nähte (nicht die Laschen), so konnte die mittl. Festigkeit der Stirn- und Flankennähte festgestellt werden.

Die Stirnnaht ist, wie schon in Kap. 6 erwähnt, auf Biegung und Schub beansprucht. Die Kraft sucht die Naht von der Unterlage abzureißen. Die zusammengesetzte

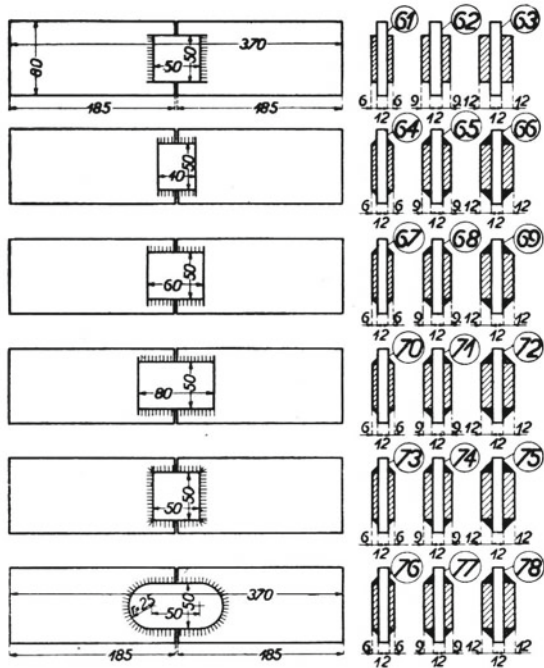


Abb 38. Probestäbe mit angeschweißten Doppellaschen (Versuche 1923).

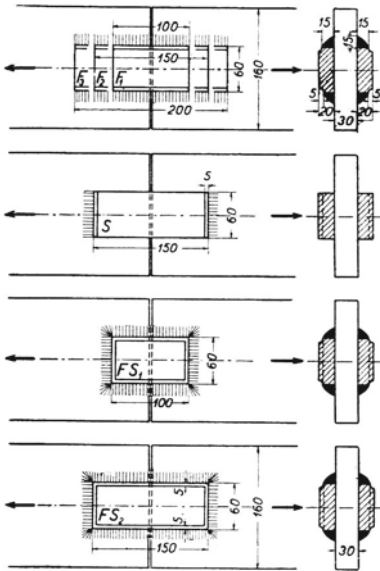


Abb. 39 Schwere Probestäbe mit angeschweißten Doppellaschen (Versuche 1924).

(spezifische) Festigkeit der Stirnnaht sei mit „Abreißfestigkeit“ (K_{δ}) bezeichnet; die in Zahlentafel 1 angegebenen Werte stellen Mittelwerte dieser Festigkeit dar. Sämtliche Nähte wurden mit Quasi-Arc-Elektroden geschweißt.

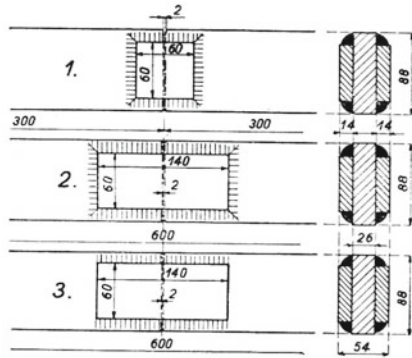


Abb. 40 Probestäbe mit angeschweißten Doppellaschen (Versuche 1927).

Zahlentafel 1.
Mittelwerte der Abreißfestigkeit K_{δ} (t/cm^2) der Stirnnahte.

Nahthöhe h	K_{δ}
0,6 cm	2,7 bis 3,3 t/cm^2
0,9 cm	2,2 bis 3,1 t/cm^2
1,2 cm	2,0 bis 2,5 t/cm^2
1,5 cm (unterer Wert extrapoliert)	1,4 bis 2,6 t/cm^2

Die Abreißkraft ist ermittelt worden

$$K_{\delta} = Q : 2 F_s = Q : 2 h b$$

worin Q die Kraft und F_s die Größe der Haftfläche einer Naht an der Stirnfläche bedeutet (nicht die Größe der Bruchfläche, man vergleiche die spätere Begründung). Die Nahthöhe ist h (siehe Abb. 21), ihre Breite b.

Die mittlere Abreißfestigkeit K_{δ} der Stirnnahte ist in Abb. 41, S. 24, dargestellt.

b) Die Festigkeit von Flankennähten.

Die Flankennähte sind zur Hauptsache auf Schub beansprucht, die Festigkeit (spezifische Festigkeit) sei mit K_T bezeichnet. Die Mittelwerte sind in Zahlentafel 2 zusammengestellt.

Zahlentafel 2.

Mittelwerte der Schubfestigkeit K_T (t/cm²) bei Flankennähten.

Nahthöhe h	Halbe Laschenlänge l		
	l = 2,0 cm	l = 3,0 cm	l = 4,0 cm
0,6 cm . .	2,04 bis 2,86	2,12 bis 2,83	> 1,92 bis > 2,23
0,9 cm . .	1,60 bis 2,29	1,78 bis 2,22	> 1,67 bis > 2,18
1,2 cm . .	1,52 bis 2,24	1,34 bis 2,09	1,64 bis 1,92
1,5 cm*) .	1,2 bis 1,95	1,2 bis 1,74	1,2 bis 1,72

*) Untere Werte extrapoliert.

Die Werte von K_T berechnen sich

$$K_T = Q : 4 F_F = Q : 4 h l$$

worin F_F die Haftfläche der Naht bedeutet. Die Kraft Q wird durch vier Nähte von halber Flankenlänge aufgenommen mit der Gesamtfläche $4 h l$ ($2 l = L$, die ganze Laschenlänge). Es ist zu beachten, daß die mit > versehenen Werte nicht der Naht-Festigkeit entsprechen; in diesen Fällen sind die Laschen vor den Nähten gebrochen.

Die Festigkeit der Nähte ringsum geschweißter Laschen kann mit „Haftvermögen“ bezeichnet werden; dieses setzt sich zusammen aus Abreiß- und Schubfestigkeit. Es sei beiläufig erwähnt, daß bei den Mustern 73 bis 78 (Abb. 38) der Bruch quer durch die Laschen erfolgte, die Nähte brachen nicht.

Diese Versuche wurden später mit schweren Probestäben wiederholt, ihre Beschaffenheit zeigt Abb. 39, S. 21. Die Laschen waren 2,0 cm dick, die Nahthöhe h jedoch nur 1,5 cm. Zwei Serien solcher Stäbe wurden geprüft. Die Ergebnisse sind in Zahlentafel 3 zusammengestellt.

Zahlentafel 3.
Abreißfestigkeit K_δ und Schubfestigkeit K_τ der Kehlnte
schwerer Versuchsstbe. Nahthöhe $h = 1,5$ cm.

Laschen durch Stirnte angeschweißt:	Stäbe O			Stäbe E		
Abreiflche $F_S = 2 b h$ cm ²	18,0			18,0		
Abreißkraft Q t	49,8			43,0		
$K_\delta = Q : F_S$ kg/cm ²	2770			2390		
Laschen durch Flanken- te angeschweißt:						
Flankenflche $F_F = 4 l h$ cm ²	30	45	60	30	45	60
Bruchlast Q t	60,7	84,5	(100)	57,5	83,0	91,0
$K_\tau = Q : F_F$ kg/cm ²	2030	1870	> 1670	1910	> 1840	> 1520
Laschen ringsum an- geschweißt:						
Haftfläche $F_S + F_F$ cm ²	48	63		48	63	
Bruchlast t	100	(89)		88	94	
Haftfestigkeit kg/cm ²	2080	?		> 1840	> 1490	

Mit den mit > gekennzeichneten Werten hat es die nämliche Bewandnis wie oben angedeutet, die Nahtfestigkeit ist höher als diese Werte.

Die Probestäbe eines weiteren, kleinen Versuches sind in Abb.40 dargestellt. Nahthöhe ungefähr 1,4 cm. Je zwei Stäbe wurden geprüft. Die Werte sind im Mittel folgende:

Zahlentafel 4.
Haftvermögen der Nte des Versuches 1927.

Stäbe 1 Haftvermögen $K_\delta + K_\tau$ je 1 Lasche wurde abgerissen, die andere brach mitten durch, Bruchlast 63 t.	1880 kg/cm ²
Stäbe 2 Haftvermögen $K_\delta + K_\tau$ Die Laschen brachen mitten durch, Bruchlast 68 t.	> 1210 kg/cm ²
Stäbe 3 Schubfestigkeit K_τ Die Laschen brachen mitten durch, Bruchlast 62 t.	> 1580 kg/cm ²

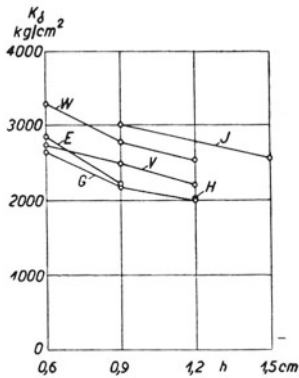


Abb. 41. Mittlere Abreißfestigkeit K_d der Stirnnahte in Abhängigkeit von der Nahthöhe.

In den Abb. 41 bis 44 sind die Ergebnisse der Versuche mit Stäben gemäß Abb. 38 graphisch aufgetragen. Die Buchstaben W usw. bedeuten einzelne Stabserien, die mit Pfeil versehenen Punkte deuten darauf hin, daß die Laschen brachen, nicht die Nähte, so daß die Festigkeit der letztgenannten höher einzuschätzen ist.

Die Linienzüge dieser ersten Darstellungen lassen erkennen, daß die Festigkeit von Stirn- und Flankenähten mit zunehmendem Nahtquerschnitt bzw. zunehmender Nahthöhe (h) abnimmt.

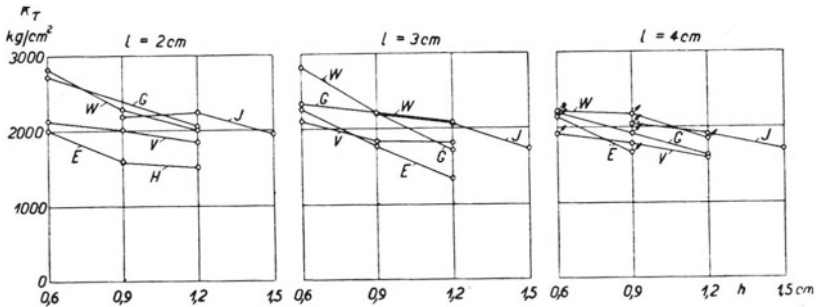


Abb. 42—44. Mittlere Schubfestigkeit K_T der Flankenähte in Abhängigkeit von der Nahthöhe.

10. Die Berechnung von Kehlnähten auf Festigkeit.

a) Die Berechnung von Stirnnahten.

Wirken Normalspannungen in einer Richtung und gleichzeitig Schubspannungen, so ist die bekannte Gleichung der Festigkeitslehre

$$K = 0,35 \sigma + 0,65 \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \quad (18)$$

anwendbar. Hierauf kann man sich leider nicht stützen, weil der Spannungszustand in einer Stirnnaht, im Querschnitt (Abb. 21) betrachtet, zweiachsig ist; die Richtungen sind x und z . Genau genommen ist er, im Hinblick auf Abb. 35, dreiachsig (Richtung $MM = y$ -Richtung). Dies gilt schon für die Stirnnahte von Flach-

eisenkonstruktionen. Im Behälterbau müssen wir erst recht mit dem dreiachsigen Spannungszustand rechnen. Bis derjenige der Stirnnaht besser abgeklärt ist, z. B. durch Messungen, kann die Festigkeit nur auf empirischem Weg eingeschätzt werden. Weil die Abreißfestigkeit (K_{δ}) der Naht mit zunehmender Nahthöhe (h) abnimmt, stellen wir, wie schon in Abb. 41 geschehen, beide in gegenseitiger Abhängigkeit dar, diesmal unter Benützung aller bekannten Werte (Abb. 45). Durch die Mittelwerte legen wir einen Bogen, er enthält für $h = 0$ den Punkt $K_{\delta} = 4000 \text{ kg/cm}^2$. Für die Naht mit $h = 0$ verschwindet das Biegemoment R_r (Abb. 22). Als Mittelwert für reine Zugspannung kann nach vielen Feststellungen für die elektrische Schweißung die bezeichnete (4000 kg/cm^2) angenommen werden. Der Bogen ist ein Teil einer gleichseitigen Hyperbel. Ihre Gleichung, die auf verschobene Achsen zu beziehen ist, lautet

$$\left. \begin{aligned} K_{\delta} &= 100 \frac{15 h + 40}{h + 1} \text{ kg/cm}^2 \text{ (h in cm)} \\ K_{\delta} &= \frac{15 h + 400}{h + 10} \text{ kg/mm}^2 \text{ (h in mm)} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Mit den Formeln (19) kann die Bruchfestigkeit, die von einer Stirnnaht zu erwarten ist, eingeschätzt werden. Für die zulässige

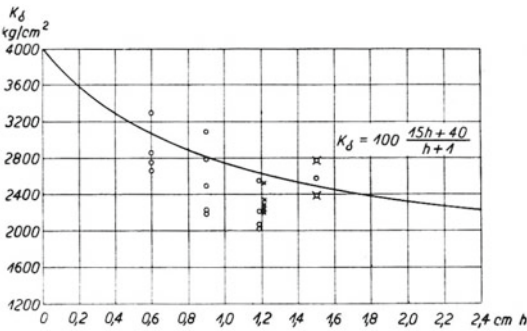


Abb. 45. Abreißfestigkeit K_{δ} der Stirnnähte in Funktion der Nahthöhe h bei symmetrischer Anordnung der Flacheisen (Laschen) hinsichtlich der Unterlage.

- Stirnnähte von Doppellaschen (1923).
- ⊙ Stirnnähte von Doppellaschen (1924).
- × überlappte Stirnnähte (1923)

Spannung δ ist der Wert K_{δ} durch eine Sicherheitszahl zu teilen. Wir wählen hie-

für zwei Werte, 5 für die doppelseitige Anordnung der Flacheisen bzw. Laschen, diese ist hinsichtlich der Unterlage symmetrisch (Fall A_1 der

Zusammenfassung, Abb. 47) und 6 für einseitige und überlappte Anordnung (Fälle A_2 und A_3). Die Sicher-

heitszahlen sind im Hinblick auf eine gewisse Unzuverlässigkeit bei der Schweißung so hoch gewählt. Dann ist die zulässige Spannung für doppelseitige Anordnung

$$\delta_1 = 100 \frac{15 h + 40}{5 h + 5} \quad \text{kg/cm}^2 \quad (\text{h in cm}) \quad (20)$$

einseitige Anordnung

$$\delta_2 = 100 \frac{15 h + 40}{6 h + 6} \quad \text{kg/cm}^2 \quad (\text{h in cm}) \quad (21)$$

Eine Stirnnaht kann die Kraft übertragen bei doppelseitiger Anordnung der Laschen

$$Q = 2 F_s \delta_1 \quad (\text{Fall A}_1 \quad \text{Abb. 47}) \quad (22)$$

bei einseitiger Anordnung der Lasche

$$Q = F_s \delta_2 \quad (\text{Fall A}_2 \quad \text{Abb. 47}) \quad (23)$$

bei überlappter Anordnung

$$Q = 2 F_s \delta_2 \quad (\text{Fall A}_3 \quad \text{Abb. 47}) \quad (23a)$$

Mit der Nahtbreite b und der Nahthöhe h ist $F_s = b h$. Als maßgebende Größe ist die Stirnfläche der Naht F_s gewählt worden, nicht diejenige der Bruchfläche. Ausführungen hierüber folgen noch¹⁰).

Es hat sich als praktisch erwiesen, die Höhe h nicht größer als 12 mm, höchstens 15 mm zu machen.

b) Die Berechnung von Flankennähten.

Ich trage alle mir bekannten Werte von K_τ , insbesondere diejenigen der Zahlentafeln 2 und 3 in Funktion der Nahthöhe (h) auf (Abb. 46). Mitten durch lege ich einen Bogen $K_\tau = 0,8 K_\delta$, wobei K_δ der Gl. (2) entspricht (Abb. 45). Kurve K_δ ist gestrichelt, K_τ ist ausgezogen in Abb. 46. Dann wird die Beanspruchung mit 5- bzw. 6facher Sicherheit

doppelseitige Anordnung (Fall B₁, Abb. 47, Zusammenfassung)

$$\tau_1 = 100 \frac{15 h + 40}{6,25 h + 6,25} \quad \text{kg/cm}^2 \quad (\text{h in cm}) \quad (24)$$

einseitige Anordnung (Fall B₂, Abb. 47)

$$\tau_2 = 100 \frac{15 h + 40}{7,5 h + 7,5} \quad \text{kg/cm}^2 \quad (\text{h in cm}) \quad (25)$$

Es ist anzunehmen, daß die Flankennähte immer paarweise auftreten, auch wenn sie nur einseitig aufgeschweißten Flacheisen angehören.

Bei doppelseitiger Anordnung der Flacheisen und wenn Stirnnähte fehlen (Fall B₁, Abb. 47) ist

$$Q = 4 F_F \tau_1 = 4 l h \tau_1 \quad (26)$$

bei einseitiger Anordnung (Fall B₂, Abb. 47)

$$Q = 2 F_F \tau_2 = 2 l h \tau_2 \quad (27)$$

wenn unter l die halbe Laschenlänge bei symmetrischer Belastung der Laschen und der Unterlage (Fälle I bis IV, Zusammenfassung,

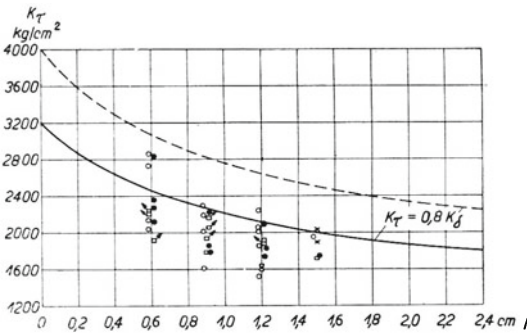


Abb. 46 Bruchfestigkeit der Flankennähte bei doppelseitiger Anordnung der Flacheisen (Laschen). ○ Versuche 1923, $l = 20$ mm, ● $l = 30$ mm, □ $l = 40$ mm, × Versuche 1924, (l ist die halbe Laschenlänge).

Abb. 47) oder die Länge der Flankennähte bei unsymmetrischer Belastung (Fälle V bis VIII, Abb. 47) verstanden wird. Diese Rechnung stützt sich auf die Flankenfläche $F_F = h l$, nicht auf die Bruchfläche. Es hat sich gezeigt, daß die Bruchflächen unregelmäßig im Raum des Winkels B A C,

Abb. 21 verlaufen, sie sind daher nicht geeignet, als Grundlage zu dienen¹⁰).

c. Die Berechnung der Kehlnähte ringsum geschweißter Flacheisen.

Für die Übertragung von Kräften an eine Unterlage wählt man meistens Flach- oder Profileisen mit rechteckig beschnittenen Enden. Wir wollen bloß diese in den Kreis unserer Betrachtung ziehen.

Bei doppelseitig aufgeschweißten Flacheisen werden die Kräfte im allgemeinen durch zwei Stirn- und vier Flankennähte aufgenommen (Fälle I, III, V, VII, Zusammenfassung, Abb. 47). Durch Anwendung der Gleichungen (20) und (24) ist nachzurechnen,

wie hoch die Spannungen δ und τ für die gewählte Nahthöhe ausfallen. Die Stirnbreite ist gewöhnlich gegeben, gesucht ist dann noch die Flankenlänge l , welche bestimmt werden kann aus

$$Q = 2 F_S \delta_1 + 4 F_F \tau_1 = 2 b h \delta_1 + 4 l h \tau_1$$

oder, weil $\tau = 0,8 \delta$

$$Q = 2 \delta_1 h (b + 1,6 l) \quad (28)$$

Bei einseitiger Anordnung (Fälle II, IV, VI, VIII, Zusammenfassung, Abb. 47) ist die zulässige Spannung aus Gleichungen (21) und (25) zu bestimmen. Dann wird

$$Q = F_S \delta_2 + 2 F_F \tau_2 = \delta_2 h (b + 1,6 l) \quad (29)$$

11. Zusammenfassung.

Spannungszustand.

A. Flankennähte von auf Blech geschweißten Flacheisen werden zur Hauptsache auf Schubspannungen beansprucht. Die allgemeine Annahme, die Spannung sei den Nähten entlang konstant, sie sei durch den Quotienten aus Last geteilt durch Haftfläche ausgedrückt

$$\left(\bar{\tau} = \frac{Q}{F_N} \text{ bzw. } \frac{F_L \bar{\sigma}_L}{F_N} \right), \text{ trifft nicht zu, es zeigt sich vielmehr, daß}$$

die Spannungen gegen die Enden der Flankennähte ansteigen, so daß τ_{\max} ein Vielfaches dieses Quotienten erreicht, das 2,4- bis 3,2fache bei den Stäben 12 und 13. (S. 9 und 10). Diese Zahlen werden sich je nach Beschaffenheit der Stäbe und Nähte ändern.

Bei ringsum geschweißten Flacheisen, S. 17 und 18, ist die Zunahme von τ_{\max} geringer, das 2,2- und 1,72fache von $\bar{\tau}$ wurde ermittelt. Die Stirnnähte entlasten in diesen Fällen die Flankennähte an ihren Enden.

B. Die in Flanken- und Stirnnähten auftretenden Schubspannungen sind auf die rel. Verschiebungen von Blech und Flacheisen zurückzuführen. Schubspannungen und Verschiebungsgröße können als Verhältniswerte angenommen werden. Der Verschiebungsmechanismus ist verwickelt; die Fälle, daß die Bleche durch Fugen getrennt sind, wobei die Flacheisen die Fugen überbrücken und diejenigen, daß die Flacheisen über volle Bleche geschweißt sind, sind auseinanderzuhalten. Werden Flacheisen auf Blech aufgeschweißt (z. B. Streben an Knotenbleche) und das ganze belastet, so sind die Normalspannungen im Blech dem Wert nach verschieden von

denjenigen in den Flacheisen. Die Unterschiede der Dehnungen beim einen oder andern Teil infolge des Hookschen Gesetzes haben rel. Verschiebungen zur Folge. Diese, die sog. „innern rel. Verschiebungen“ (a_1) sind veränderlich. Die Verschiebungsgröße (Δa_1) verschwindet in der Symmetrieebene bei Vollwandstäben und in den Bezugsebenen bei Stäben mit Trennfugen. Die Bezugsebene ist der Schnitt durch die Stelle, in der σ_s (Stab) = σ_L (Lasche). Bei Stäben mit Trennfuge (nur bei diesen) kommt die „äußere rel. Verschiebung“ Δa_2 hinzu, so daß die gesamte rel. Verschiebung $\Delta a = \Delta a_1 + \Delta a_2$. Die äußere rel. Verschiebung ist durch konstante Werte Δa_2 gekennzeichnet.

Der Verschiebungsmechanismus läßt sich durch den Vergleich von ineinander gelegten Bürsten überblicken. Innere rel. Verschiebung: Die Böden der Bürsten (Blech und Laschen) sind elastisch, Kautschuk. Die Borsten (Flankennähte) stellen sich außerhalb der Bezugsebene bzw. der Symmetrieebene in zunehmender Schräge ein. Äußere rel. Verschiebung: Die Böden sind starr (Glas). Die Borsten sind alle gleich schräg gerichtet.

Durch die Benützung des Begriffs der „Bezugsebene“ lassen sich die Folgen jeder Aenderung einer Konstruktion hinsichtlich der Nähte (Dicke und Anordnung der Nähte, Dicke der Bleche und Flacheisen) leicht überblicken.

Festigkeit der Kehlnähte und ihre Berechnung.

C. Der Verfasser hat elektrisch geschweißte Stirn- und Flankenähte wiederholt auf ihre Festigkeit geprüft, die Ergebnisse dieser Versuche werden bekanntgegeben. Es hat sich gezeigt, daß die Festigkeit der Kehlnähte (sie wird „Abreißfestigkeit“ genannt und mit $K \delta$ bezeichnet) mit zunehmender Nahthöhe bzw. mit zunehmendem Nahtquerschnitt zurückgeht. Die Gründe hiefür werden besprochen, die Festigkeit in Funktion der Nahthöhe empirisch bestimmt.

D. Für die Bestimmung der zulässigen Beanspruchung δ in Funktion der Nahthöhe h werden die folgenden Formeln vorgeschlagen:

Bei doppelseitiger Anordnung der Flacheisen oder Laschen hinsichtlich der Unterlage (d. h. die zwei Laschen oder Flacheisen eines Paares liegen einander hinsichtlich der Unterlage unmittelbar gegenüber, Fall A_1 , Abb. 47):

$$\delta_1 = 100 \frac{15 h + 40}{5 h + 5} \text{ kg/cm}^2 \quad (h \text{ in cm}) \quad (20)$$

bei einseitiger Anordnung (Fälle A_2 einfache Stirnnaht und A_3 überlappte Stirnnaht):

$$\delta_2 = 100 \frac{15 h + 40}{6 h + 6} \text{ kg/cm}^2 \quad (h \text{ in cm}) \quad (21)$$

h ist die Höhe der Stirnnaht. Bei der ersten Gleichung ist fünf-fache, bei der zweiten sechsfache Sicherheit berücksichtigt, was sich

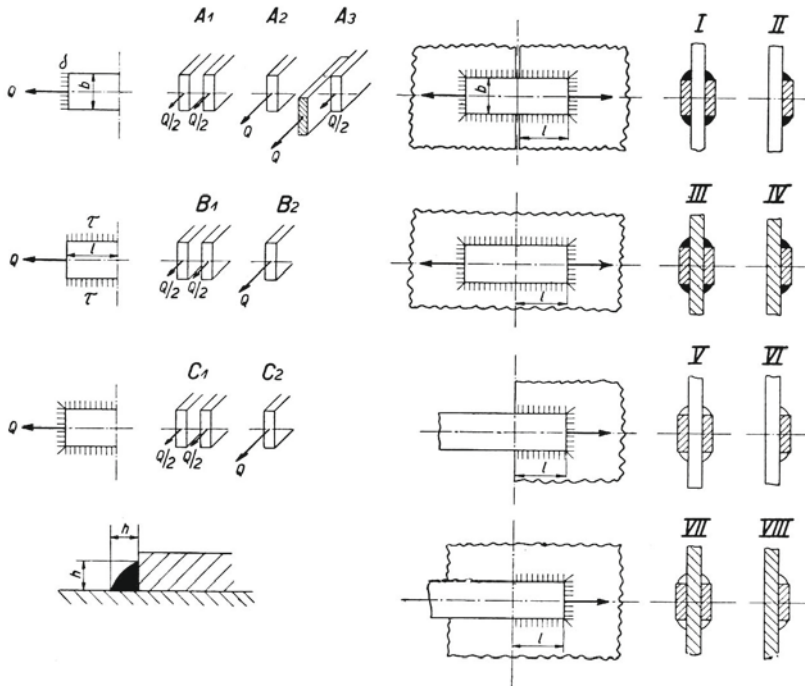


Abb. 47. Verschiedene Anordnungen aufgeschweißter Flacheisen.
A bis C, verschiedene Anordnungen (beidseitige und einseitige) der Nahte.
I bis VIII, verschiedene Fälle der Belastung von Laschen und Flacheisen.

im Hinblick darauf empfiehlt, daß die Güte der Schweißnaht mittelmäßig sein kann.

Ist b die Nahtbreite, so kann die durch Stirnnahte allein zu übertragende Kraft gerechnet werden

bei doppelseitiger Anordnung (Fall A_1 , Abb. 47)

$$Q = 2 F_s \delta_1 = 2 b h \delta_1 \quad (22)$$

bei einseitiger Anordnung (Fall A₂)

$$Q = F_s \delta_2 = b h \delta_2 \quad (23)$$

bei überlappter Anordnung (Fall A₃)

$$Q = 2 F_s \delta_2 = 2 b h \delta_2 \quad (23a)$$

E. Die Flankennähte sind zumeist auf Schub beansprucht. Die Festigkeit der Flankennähte (K_τ) ist kleiner als die Abreißfestigkeit (K_δ) der Stirnnähte, man kann annehmen $K_\tau \approx 0,8 K_\delta$. Für die Bestimmung der zulässigen Festigkeit der Flankennähte wird vorgeschlagen

bei doppelseitiger Anordnung (Fall B₁, Abb. 47)

$$\tau_1 = 0,8 \delta_1 = 100 \frac{15 h + 40}{6,25 h + 6,25} \text{ kg/cm}^2 \quad (h \text{ in cm}) \quad (24)$$

bei einseitiger Anordnung (Fall B₂)

$$\tau_2 = 0,8 \delta_2 = 100 \frac{15 h + 40}{7,5 h + 7,5} \text{ kg/cm}^2 \quad (h \text{ in cm}) \quad (25)$$

F. Auf Flacheisen (Laschen) mit Flankennähten können folgende Kräfte übertragen werden:

bei doppelseitiger Anordnung (Fall B₁)

$$Q = 4 F_F \tau_1 = 4 l h \tau_1 \quad (26)$$

bei einseitiger Anordnung (Fall B₂)

$$Q = 2 F_F \tau_2 = 2 l h \tau_2 \quad (27)$$

wenn unter l die halbe Laschenlänge bei symmetrischer Belastung der Lasche und der Unterlage (Fälle I bis IV), oder die Länge der Flankennähte bei unsymmetrischer Belastung (Fälle V bis VIII) verstanden wird.

Sind doppelseitige Laschen ringsum geschweißt (Fälle I, III, V, VII sowie C₁, Abb. 47), so ist

$$Q = 2 \delta_1 h (b + 1,6 l) \quad (28)$$

Sind einseitige Laschen ringsum geschweißt (Fälle II, IV, VI, VIII sowie C₂), so ist

$$Q = \delta_2 h (b + 1,6 l) \quad (29)$$

G. Die Beanspruchung δ einer Stirnnaht ihrer Breite b entlang ist ziemlich, jedoch nicht ganz gleichmäßig; sie ist am geringsten in der Längs-Symmetrielinie eines Flacheisens. Die Beanspruchung τ

einer Flankennaht ist sehr ungleichförmig. Werte sind im ersten Teil der Zusammenfassung angegeben. An den vorgeschlagenen Gleichungen (20—29) kann man trotz den Feststellungen hinsichtlich der Flankennähte festhalten. Bei einer vorsichtigen Bewertung der Festigkeit der Schweißnähte eines aufgeschweißten Flacheisens wird man die Stirnnähte, auch wenn sie vorhanden sind, in der Rechnung meistens außer acht lassen. Den Flankennähten ist größere Bedeutung beizumessen. Ein Verhältnis $l = 1,25 b$ bis $1,5 b$ ist im allgemeinen zweckmässig (l ist halbe Laschenlänge).

Fußnoten.

1) Druckschrift: Höhn, «Ueber die Festigkeit elektrisch geschweißter Hohlkörper», 1923.

2) Höhn, «Nieten und Schweißen der Dampfkessel».

3) In früheren Ausführungen nahm der Verfasser an, die äußere rel. Verschiebung Δa_2 komme nur bei genieteten Nähten vor, sie sei = 0 bei geschweißten. Im Hinblick auf die neuesten Versuche mußte diese Anschauung geändert werden.

4) Die Messungen sind an der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt Zürich durchgeführt worden. Ich bin hiefür Herrn Prof. Dr. Roš und für exakte Arbeit den Herren Dr. Th. Wyß und Theiler verbunden.

5) Diese vom Verfasser erstmals in der Schrift «Nieten und Schweißen der Dampfkessel» 1924 angegebene Methode der Feststellung der rel. Verschiebungen ist seither von andern Autoren angewendet worden, z. B. von Herrn D. Rosenthal: «Comparaison entre l'assemblage rivé et soudé».

6) Höhn, «Sicherung geschweißter Nähte» (Abb. 84, S. 53). Berlin, Julius Springer.

7) Untersuchungen über die Form des Profils von Kehlnähten finden sich in der unter 1. angegebenen Druckschrift.

8) Normalien des Vereins Schweizerischer Maschinen-Industrieller (VSM 10335).

9) Diese Fragen sind ausführlich in der Druckschrift «Die Sicherung geschweißter Nähte» behandelt.

10) In Abb. 48—50 sind drei Kehlnähte mit verschiedenem Profil gezeigt. Die Vorschläge, bei der Berechnung der Kehlnähte die Dicke a als

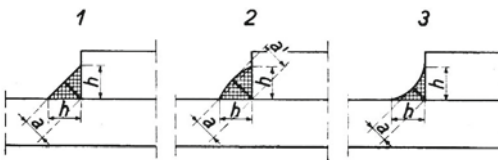


Abb. 48 bis 50 Kehlnähte mit verschiedenem Profil.

Bestimmungsgröße zu wählen, erscheint unzulässig, weil der Bruch nicht mit Sicherheit in der Richtung von a verläuft. Der Hauptgrund ist aber, daß am Stück die Höhe h gut, die Breite a jedoch nur schlecht gemessen oder geschätzt werden kann. Es

erscheint richtig, auf die Höhe h einer Kehlnaht abzustellen. Vgl. Ausführungen des Verfassers in Z. des bayer. Rev. Ver., 1930, S. 327.

Über die Wirkung von Blasen und Kerben von autogen und elektrisch geschweißten Nähten

von **E. Höhn**, Oberingenieur des
Schweizerischen Vereins von
Dampfkessel-Besitzern
Zürich.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung	3
Blasen	3
Kerben auf einer Seite der Naht	4
Neue Versuche	5
Die Wirkung der Querkontraktion	12
Neue Vorschläge zur Vermeidung von Kerben	13
Zusammenfassung	14
Fußnoten	15

Anmerkung.

Dieser Aufsatz ist zuerst in der anlässlich des 50jährigen Bestehens der Eidg. Materialprüfungsanstalt in Zürich (1931) herausgegebenen Festschrift erschienen.

Einleitung.

Soll eine autogen oder elektrisch geschweißte Naht die der heutigen Erfahrung entsprechende Festigkeit aufweisen, so müssen bei der Herstellung alle Faktoren richtig zusammen spielen. Man kennt heute die Bedingungen, unter welchen eine Naht genügende Festigkeit erhält. Wissenschaft und Praxis haben in diesem Gebiet zusammengearbeitet.

Von den Bedingungen für das Entstehen guter Nähte wollen wir hier bloß die eine behandeln: Das vollständige Durchschweißen einer Naht innerhalb ihres Profils. Blasen und Kerben müssen verhütet werden. Es ist noch darauf hinzuweisen, daß die Naht beim Schweißen verdickt werden muß. Fehlt die Verdickung, so ist dies als ein Fehler anzusehen.

Blasen.

Es hat sich gezeigt, daß kleine Blasen nur von geringer Bedeutung sind. Man hat feststellen können, daß ein blasiges Gefüge bei der Kerbschlagprobe eine größere Kerbzähigkeit und einen größeren Biegewinkel ergibt als ein kompaktes.¹⁾ Diese Feststellung bildet einen Grund dafür, die Kerbschlagprobe als Mittel zur Prüfung autogen und elektrisch geschweißter Nähte auszuschalten. Blasen, die in einem Zugprobestab vorkommen, werden stets die Ursache seiner Verschwächung bilden. Erfahrungsgemäß brechen die Probestäbe gegossener Metalle bei den blasigen Stellen durch.

Ziehen wir den Vergleich — obwohl dieser nicht in allen Teilen zutrifft, — zwischen einer Blase und einem kreisrunden Loch eines flachen Zugprobestabes, so können wir uns auf die Versuche von Preuß stützen.²⁾ Die Probestäbe dieses Autors haben 120 mm Breite und 470 mm Einspannlänge. Er gelangt zum Ergebnis, daß die Höchstspannung am Lochrand etwa 2,1 bis 2,3 mal größer als derjenige Wert ist, den man in der Annahme gleichmäßiger Verteilung der Spannung über den am meisten geschwächten Querschnitt erhält. Die Mindestspannung an den Außenrändern der

Stäbe nimmt mit wachsendem Lochdurchmesser ab. Die Höchstspannung ist nicht wesentlich durch den Lochdurchmesser beeinflusst.

Die Prof. Kirsch und Föppl haben das Problem auf dem Weg der Rechnung gelöst. Für eine unendlich große Stabbreite ist die Spannung am Lochrand gleich dem dreifachen Betrag des Wertes, den man bei der Annahme gleichmäßiger Spannungsverteilung über den ganzen Querschnitt erhält.

Auch die Kraftfelderforschung hat sich der Frage angenommen, man vergleiche die Ausführungen von Dr. Th. Wyß in seinem Buch: „Die Kraftfelder in festen elastischen Körpern und ihre praktischen Anwendungen.“³⁾

Alle diese Ausführungen deuten darauf hin, daß Blasen eine Naht verschwächen. Die Schwächung ist größer als durch den Ausfall an Material bzw. an Querschnitt bedingt. Mit der Größe der Blasen wächst die Bruchgefahr, insbesondere, wenn die von den Blasen gebildeten Flächen nicht kugelig sind, sondern scharfe Ecken und Kanten aufweisen.

Kerben auf einer Seite der Naht.

Es gibt Kerben im Innern einer Naht, — sie werden manchmal auch als Schlitze bezeichnet, — und solche an der Außenseite. Diese letztgenannten entstehen sehr häufig, wenn eine Naht nur von einer Seite her geschweißt wird. Bei engen Behältern, Röhren usw. ist das Schweißen von innen her überhaupt nicht möglich. Der Schweizerische Verein von Dampfkessel-Besitzern hat die Wirkung von Kerben schon im Jahr 1923 untersucht (Druckschrift: Festigkeit elektrisch geschweißter Hohlkörper). Zur Untersuchung dienten 264 elektrisch geschweißte Probestäbe. Sie waren mit Quasi-Arc-Elektroden geschweißt. Die in nächfolgender Tafel mit V bezeichneten Probestäbe haben V-förmige Fugen, V (1) bedeutet die einseitig geschweißte Naht, V (2) die wurzelseitig nachgeschweißte. Die X-Bezeichnung deutet das entsprechende Profil an. Die Dicke der Stäbe ist 1,0 cm, 1,7 und 2,5 cm. Die Nähte waren glatt gehobelt, d. h. die Verdickungen entfernt. Die Zerreißfestigkeit ist die folgende bei Angabe von mittleren, größten und kleinsten Werten.

Zerießfestigkeit (t/cm^2). Mittlere, größte und kleinste Werte.

	s = 1,0 cm		s = 1,7 cm			s = 2,5 cm		
	v (1)	v (2)	v (1)	v (2)	X	v (1)	v (2)	X
Mittelwert . . .	> 3,49	> 3,70	> 3,71	> 3,85	3,61	3,45	3,68	3,61
Bruch außerhalb der Naht bei Anzahl Stäben	3	5	2	2	1	—	—	—
Größter Einzelwert	4,04	4,24	4,16	4,18	4,02	4,10	4,19	4,00
Kleinst. Einzelwert	1,90	2,90	2,71	3,34	2,94	2,02	3,28	2,07

Das >-Zeichen bedeutet, daß die Stäbe brachen und die Nahte infolgedessen mehr ausgehalten hätten.

Daraus geht mit aller Deutlichkeit hervor, daß wurzelseitig nachgeschweißte Stäbe fester sind als einseitig geschweißte. Unser damaliger Vorschlag, einseitig geschweißte V-Nähte soviel als möglich wurzelseitig nachzuschweißen, ist rasch von der Industrie übernommen worden.

Neue Versuche.

Einige Versuche, vor kurzem vorgenommen⁴⁾ mit Stäben, deren Nähte Kerben aufweisen, haben Einblick in den Spannungszustand gewährt. Das Zahlenmäßige ist zunächst zwei Beispielen zu entnehmen.

Beispiel 1. Ein Stab von 9,02 cm Breite und 1,29 cm Dicke (Abb. 1 und 2) ist durch eine elektrische Naht in der Mitte zusammengefügt. Die Naht hat eine Kerbe von 0,50 cm oder rd. $\frac{1}{3}$

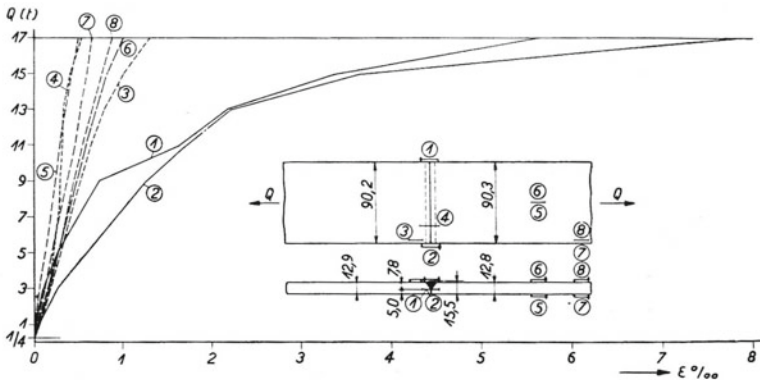


Abb. 1 und 2. Probstab mit Meßstellen.

Abb. 3. Zugdehnungsdiagramm für den Probstab.

der Stabdicke, sie ist auf der obern Stabseite etwas verdickt, die Überhöhung beträgt 0,26 cm, Dicke der Naht 1,05 cm. Der Schwerpunkt der Naht liegt somit außerhalb der Krafrichtung des auf Zug beanspruchten Stabes, infolgedessen entsteht ein Biegemoment.

Querschnitt des Stabes	$F = 11,64 \text{ cm}^2$
„ der Naht	$N \approx 9,46 \text{ cm}^2$
Bruchbelastung	18,7 t

Der Bruch erfolgte, wie vorausszusehen war, in der Schweißnaht (am Übergang).

Mittlere Spannung im Stab	$\sigma_F = 1606 \text{ kg/cm}^2$
Mittlere Spannung in der Naht	$\sigma_N \approx 1970 \text{ kg/cm}^2$

als Zugspannung berechnet.

Ist eine Naht gut geschweißt und wird sie bloß auf Zug beansprucht, nicht gleichzeitig auf Biegung, so wird normalerweise eine Festigkeit von 4000 kg/cm^2 erreicht.

Abb. 3 gibt in der Richtung der Abszisse die Dehnungen ϵ (‰), in Ordinateurichtung die Belastung Q (t) für verschiedene Stabstellen. Diejenigen, welche dicht bei der Kerbe liegen, und die mit 1 und 2 bezeichnet sind (Abb. 2) fließen zuerst, erheblich vor vor den andern.

Beispiel 2. Der Stab ist von fast genau gleicher Größe wie derjenige von Beispiel 1 (siehe Abb. 4 und 5). Die Kerbe ist jedoch tiefer, 0,83 cm oder rd. $\frac{2}{3}$ der Stabdicke (1,27 cm). Die Naht ist etwas überhöht, ihre Dicke $\approx 0,69$ cm.

Stabquerschnitt	$F = 11,45 \text{ cm}^2$
Nahtquerschnitt	$N = \approx 6,22 \text{ cm}^2$
Bruchbelastung	14,6 t
Mittlere Spannung im Stab	$\sigma_F = 1275 \text{ kg/cm}^2$
Mittlere Spannung in der Naht, als Zugspannung berechnet	$\sigma_N \approx 2350 \text{ kg/cm}^2$

Der Wert σ_N ist hier etwas größer als beim Stab der Abb. 1 und 2, weil die dünnere Naht sich leichter biegen ließ. Abb. 6 gibt wie Abb. 3 die bleibenden Dehnungen ϵ ‰ mit zunehmender Belastung. Die dicht bei der Kerbe liegenden Meßstellen 1 und 2 fließen, wie beim Stab Beispiel 1 zuerst.

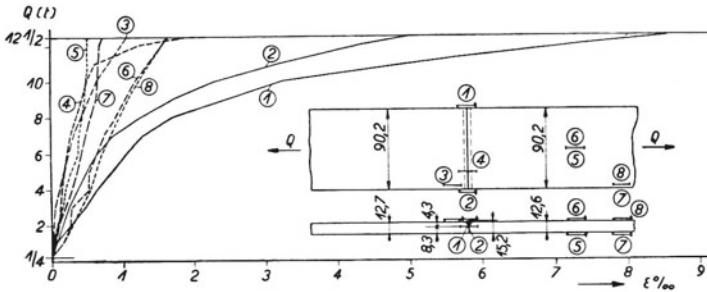


Abb. 4 und 5. Probestab mit Meßstellen.

Abb. 6. Belastungs-Dehnungsdiagramm für den Probestab.

Tiefere Einsicht in die Wirkung äußerer Kerben gewährt der Stab gemäß Abb. 7, in dessen Wand eine Kerbe eingesägt worden ist. Dieser Stab ist mit demjenigen von Abb. 1 vergleichbar, die Abmessungen sind proportional vergrößert.

Der Querschnitt im Vollen ist $F = 11,36 \text{ cm}^2$

Tiefe der Kerbe $\frac{1}{3}$ der Stabbreite

Der Stabquerschnitt bei der Kerbe ist $F' = 7,58 \text{ cm}^2$

d. h. $66,7\%$ oder $\frac{2}{3}$ des vollen Querschnittes. Der Schwerpunkt des verminderten Querschnittes liegt im Abstand $a = 4,51 - 3,01 = 1,50 \text{ cm}$ von der Krafrichtung (Q). Die ausgelenkte Zugkraft

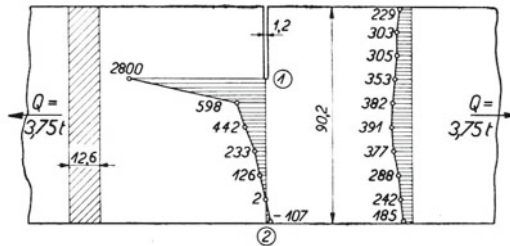


Abb. 7. Spannungen σ (kg/cm^2) des mit einer Kerbe behafteten Stabes.

verursacht ein Biegemoment $Qa = M$. Nach der Festigkeitslehre sind die Spannungen zu erwarten

auf der Seite der Kerbe
$$\sigma_{\max} = \frac{Q}{F'} + \frac{M}{W}$$

auf der Stabaußenseite
$$\sigma_{\min} = \frac{Q}{F'} - \frac{M}{W}$$

Ein paar gerechnete Spannungswerte, die wir mit gemessenen vergleichen wollen, verschaffen uns rasch den gewünschten Einblick.

$$W = \frac{b h^2}{6} = 7,61 \text{ cm}^3. \text{ Mit } Q = 3750 \text{ kg wird}$$

$$M = Q a = 5625 \text{ kg}\cdot\text{cm}$$

$$\sigma_{\max} = 494 + 740 = 1234 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\min} = 494 - 740 = -246 \text{ kg/cm}^2.$$

Die Lage der neutralen Faser kann durch die Anwendung einer einfachen Proportion ermittelt werden.

Die Ausmessung der Dehnungen am Stab bei der Kerbe ergab jedoch ganz andere Spannungswerte, nämlich

$$\sigma'_{\max} = 2800 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma'_{\min} = -107 \text{ kg/cm}^2$$

Der Unterschied von gemessenen und gerechneten Spannungen $\sigma' - \sigma$ ist einer besondern Wirkung der Kerbe zuzuschreiben. Durch diesen Unterschied kann der Begriff der Kerbwirkung definiert werden. Es beträgt im Beispiel

$$\text{gezogene Seite } \sigma'_{\max} - \sigma_{\max} = 2800 - 1234 \approx 1550 \text{ kg/cm}^2$$

(mehr als 100 % des gerechneten σ'_{\max}),

$$\text{gedrückte Seite } \sigma'_{\min} - \sigma_{\min} = -107 + 246 \approx 140 \text{ kg/cm}^2.$$

Die Annahme, daß die Normalspannungen σ , die im Querschnitt eines gebogenen Stabes übertragen werden, ihrem Abstand von der neutralen Achse verhältnismäßig zu setzen sind, ist von Bernoulli und Navier in die Festigkeitslehre eingeführt worden. Die oben angestellte Überlegung weist darauf hin, daß diese Annahme beim Vorhandensein einer Kerbe dahinfällt. Abb. 7 zeigt auch, daß die Spannung, die von -107 kg/cm^2 bis $+2800 \text{ kg/cm}^2$ ansteigt, durch einen Bogen, nicht durch eine gerade Linie begrenzt wird. Im letzten Teil ist der Verlauf asymptotisch. Der Zustand parallelen Kraftflusses, auf den die Bernoulli-Navier'sche Annahme sich stützt, wird durch die Wirkung von Kerben gestört, die Trajektorien werden ausgelenkt, sie verdichten sich in der Nähe der Kerbe.

Abb. 10 zeigt das Verhalten verschiedener Stellen des Stabes bei zunehmender Belastung. Die Dehnung ϵ in ‰ ist in Richtung der Abszisse angegeben. Der Linienzug 1 entspricht der Stelle unmittelbar bei der Kerbe. Schon bei geringen Belastungen, man kann sagen von allem Anbeginn, entstehen bleibende Verformungen. Diese Feststellung muß vorerst beunruhigen. Die Stelle 2 des Stabes wird zusammengedrückt, bei 14 t Belastung bleibend, von da an

wieder gedehnt. Die Meßlängen am Dehnungsmesser sind 2 cm für die Stellen 1 und 2 jedoch 1 cm.

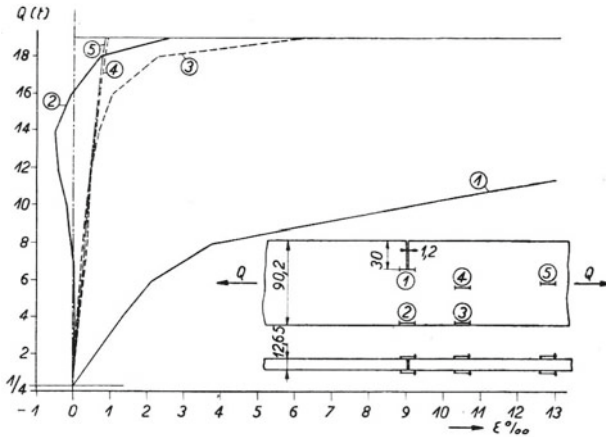


Abb. 8—10. Belastungs-Dehnungsdiagramm des eingekerbten Stabes.

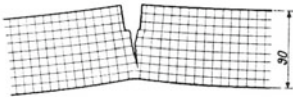


Abb. 11. Der eingekerbte Stab beim Bruch.

Abb. 11 zeigt den deformierten Stab unmittelbar vor dem Bruch. Seine Veränderung ist weit verschieden von derjenigen eines glatten Stabes. Die Einwirkung der Biegung ist deutlich sichtbar.

Der Bruch erfolgte bei 22,5 t oder 2970 kg/cm², als Zugspannung berechnet. Die hohe Festigkeit wurde erreicht, weil infolge der Stabverformung die Biegungsspannungen sich mehr und mehr ausgeglichen haben.

Innere Kerben (Schlitze).

Die Naht ist im Innern nicht durchgeschweißt. Die im Querschnitt als Schlitz erscheinende ungeschweißte Stelle läuft weite Strecken mit der Naht. Zwei Typen solcher Ritzen oder Kerben sind in Abb. 12 und 13 dargestellt.

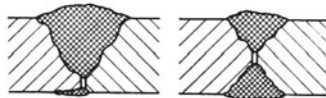


Abb. 12 und 13. V- und X-Naht mit innerer Kerbe.

Der Verfasser hat mehrfach Nähte gesehen, die solche Schlitzte aufwiesen; sie kamen jeweils nach dem Bruch zum Vorschein. Die Frage entsteht, wie hoch die Schwächung zahlenmäßig einzuschätzen ist. Der Verfasser ließ an einem Probestab, beschaffen gemäß Abb. 14, die Dehnungen vermessen⁵⁾.

Querschnitt des Stabes $F = 11,0 \cdot 1,23 = 13,50 \text{ cm}^2$
 Belastung $Q = 7,75 \text{ t}$
 Mittlere Zugspannung $\sigma_m = 573 \text{ kg/cm}^2$
 Symmetrisch zur Mittellinie ist ein Schlitz
 von $\frac{1}{3}$ der Stabbreite bzw. 3,66 cm
 Schlitzlänge eingesägt.
 Verbleibender Querschnitt $F' = 9,0 \text{ cm}^2$
 Mittlere Spannung des verbleibenden
 Querschnittes $\sigma'_m = 861 \text{ kg/cm}^2$

Die wahren, durch Messung an den Schlitzenden festgestellten Spannungen sind $\sigma' = 1740 \text{ kg/cm}^2$ bzw. 2093 kg/cm^2 , somit das Doppelte bis Dreifache der mittleren Spannung. An den Stabenden sinken die Spannungen dagegen auf $\sigma = 529 \text{ kg/cm}^2$ bzw. 612 kg/cm^2 .

Der Spannungsverlauf ist asymptotisch. Das Material beim Schlitz, in der Längsachse liegend, ist spannungslos. In einem Schnitt II im Abstand von 3 cm steigt die geringste Zugspannung in der Symmetrielinie bereits auf 316 kg/cm^2 an, bei 14 cm Abstand vom Schlitz, Schnitt III, auf 503 kg/cm^2 , d. h. die Spannungen sind schon fast ausgeglichen.

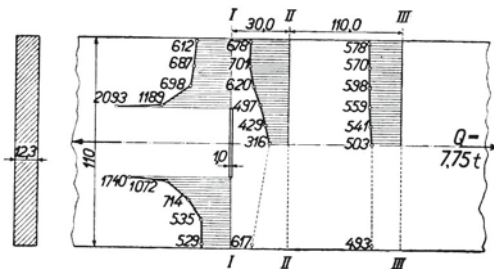


Abb. 14. Spannungen σ eines Stabes mit Querschlitz.

Zu diesen Feststellungen wurden Dehnungsmesser von 1 cm Schneidenabstand benützt. Bei geringerem Abstand wären größere Spannungen feststellbar gewesen, weil die Spannungen im Bereich zwischen den Schneiden veränderlich und beim Reiß

am größten sind. Die sämtlichen im Spannungsbild angegebenen Zahlen sind somit etwas zu klein, am bedeutendsten ist der Unterschied beim Schlitzende.

Schon hat die Kraftfelderforschung in diese Fragen eingegriffen. Die Endpunkte von Kerben und Schlitzten sind singuläre Punkte, diese sind durch gleich große Hauptspannungen ausgezeichnet. Es sind Unendlichkeitspunkte, d. h. die Spannungen sind an den Schlitzenden unendlich groß⁶⁾ (die Angaben in den Abb. 7 bzw. 14 sind, wie übrigens schon angedeutet, zu niedrig). In diesem Fall ist zu erwarten, daß der Stab schon bei geringer Belastung bricht. Daß dies nicht der Fall ist, erklärt man sich so, daß bei der sofortigen Deformation, die bei dehnbarem Metall entsteht, der scharfe Winkel im Kerbengrund sich ausweitet. Außerdem findet infolge der Verstreckung eine Verfestigung des Materiales statt. Von erheblicher Bedeutung ist die Reserve, die im umliegenden Material liegt. Erst nach ihrer Erschöpfung bricht der Stab. Die Hypothese der unendlich großen Spannung am Kerbenrand findet sich im Verhalten des Stabes bei der Verstreckung bestätigt (vgl. Abb. 16).

Es hätte nur beschränkten Wert, das Verhalten von Schlitzten mit verschiedener Länge zu prüfen. Ist der Schlitz kurz, so ist die umliegende Reserve an arbeitsfähigem Material groß und umgekehrt.

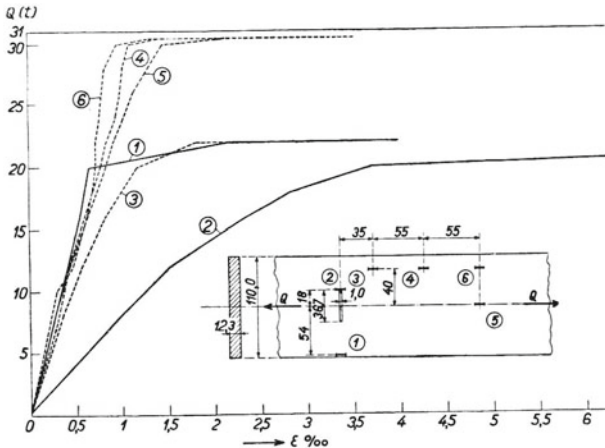


Abb. 15 und 16. Belastungs-Dehnungsdiagramm des Stabes mit Querschlitz.

Wie oben angedeutet, verformen sich die Stellen im Kerbengrund schon bei geringer Belastung sofort, was durch den Linienzug 2 in Abb. 16 nachgewiesen ist. Besonderes Verhalten zeigte auch

die Stelle 1. Der Bruch erfolgte bei 30,5 t oder $\sigma_b = 3390 \text{ kg/cm}^2$ mittlerer Spannung hinsichtlich des beim Schlitz verbleibenden Querschnittes. Im Augenblick des Bruchs hat die Kerbwirkung einen großen Teil ihrer Gefährlichkeit verloren. Abb. 17 zeigt den deformierten Stab vor dem Bruch.

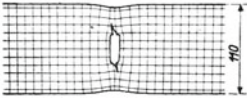


Abb. 17. Stab mit Schlitz vor dem Bruch.

Bei Nähten, die durch Spannungen beansprucht werden, ist zu unterscheiden, ob die auftretenden Temperaturen gewöhnliche oder höhere sind. Mit zunehmender Temperatur hat das Material die Möglichkeit, seine Struktur zu ändern, zu altern, wie man sich ausdrückt. Bei verstrecktem Material ist dies stets der Fall, und solches haben wir im Kerbengrund. Das Gefahrenmoment, das mit Kerben verbunden ist, ist dann gesteigert, was man sich hinsichtlich der Dampfkessel und Dampfgefäße vor Augen halten muß. Dem Verfasser ist übrigens ein Fall bekannt, wo die Temperatur einer Naht bloß zwischen -10^0 und $+50^0 \text{ C}$ schwanken konnte, ein Wechsel, der nur selten eintrat. Nach 18 Jahren brach diese Naht wegen des Vorhandenseins einer Kerbe.

Die Wirkung der Querkontraktion.

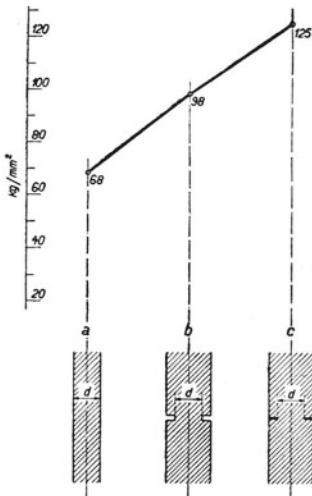


Abb. 18. Einfluß von Kerben auf die Bruchfestigkeit von runden Zugstäben.

Wird die Kontraktion eines Zugprobekörpers durch seitlich wirkende Kräfte erschwert, so nimmt die Festigkeit aus dem nämlichen Grunde zu. Dieser Sachverhalt ist seit langem bekannt⁷⁾, er geht deutlich aus einem neuern Versuche von Ulrich (Stuttgart) hervor⁸⁾. Von den drei runden Zugstäben der Abb. 18 hat a einen glatten Schaft, bei b ist eine Kerbe eingedreht, c hat eine feine, rißartige Kerbe, die durch Stauchen einer ursprünglich V-förmigen Nut in rotwarmem Zustand entstanden ist. Der Werkstoff ist der nämliche, der Durchmesser d im Kerbengrund, bzw. am glatten Schaft, gleich groß. Die Bruchbelastungen sind in Abb. 18 angegeben; es ver-

hält sich

$$a : b : c = 100 : 144 : 184.$$

Die Frage entsteht, ob die Kontraktion bei den Stäben gemäß Abb. 7 bzw. 14 gestört worden sei. Obwohl theoretisch Gründe für eine solche Störung bestehen, konnte praktisch nichts nachgewiesen werden; man beachte das Verhalten der Stellen im Kerbengrund bei den Stäben gemäß Abb. 10 und 16. Diese Stellen begannen bei der Belastung sofort zu fließen.

Die Frage der Hemmung der Fließ-Erscheinung tritt ohne Zweifel bei Flachstäben gegenüber Rundstäben zurück. Wie weit diese Hemmung bei Blechen mit ebenem Spannungszustand und bei den gewölbten Wänden gespannter Hohlkörper berücksichtigt werden muß, ist noch abzuklären.

Neue Vorschläge zur Vermeidung von Kerben.

Wie eingangs erwähnt, ist das wurzelseitige Nachschweißen der V-Nähte, wo die Möglichkeit hierfür besteht, bei den Erstellern von Kesseln und Behältern, wenigstens in der Schweiz, allgemein üblich geworden. Die Erfahrung lehrt jedoch, daß das Schweißen nicht immer so sorgfältig betrieben wird, daß das wurzelseitig aufgebrachte Schweißgut sich mit der früher geschweißten Naht verbindet. Die zwei Schichten

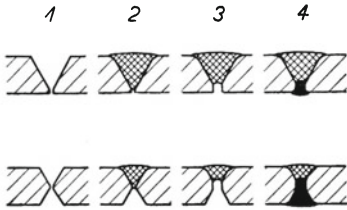


Abb. 19. Herstellung elektrisch und autogen geschweißter Nähte.

bleiben durch Hohlräume und Schlackennester getrennt. Zur Vermeidung von Kerben soll eine V-Naht, vor dem wurzelseitigen Nachschweißen, von der Wurzel her ausgestemmt werden. Durch diesen Arbeitsgang wird die Fuge geöffnet und für das Schweißen der letzten Raupen zugänglich gemacht. Gleichzeitig werden die Schlacken entfernt⁹⁾. Das Verschmelzen ist erleichtert.

Das Ausmeißeln einer Fuge ist weder zeitraubend noch kostspielig, namentlich bei der Verwendung von Lufthämmern. Abb. 19 zeigt den einzuschlagenden Arbeitsgang. 1) stellt das Fugenprofil dar, 2) die von oben (außen) her verschweißte Fuge, 3) die engste Stelle, ausgemeißelt, 4) das wurzelseitig (rückseitig) nachgeschweißte Profil.

Das Ausmeißeln einer Fuge ist weder zeitraubend noch kostspielig, namentlich bei der Verwendung von Lufthämmern. Abb. 19 zeigt den einzuschlagenden Arbeitsgang. 1) stellt das Fugenprofil dar, 2) die von oben (außen) her verschweißte Fuge, 3) die engste Stelle, ausgemeißelt, 4) das wurzelseitig (rückseitig) nachgeschweißte Profil.

Zusammenfassung.

Blasen und Schlackennester sind bei der Herstellung elektrisch und autogen geschweißter Nähte möglichst zu vermeiden, weil die Festigkeit vermindert wird. Die Schwächung ist größer, als die, welche dem Ausfall an Schweißgut wegen des Vorhandenseins der Blasen entsprechen würde.

Gefährlicher als Blasen sind Kerben (an der Außenseite einer Naht) und Schlitze (im Innern). An solchen Stellen wachsen die Spannungen asymptotisch. Der Theorie zufolge nehmen sie unendlich große Werte an. Das Material im Kerbengrund fließt, die Kerbe weitet sich aus, zugleich verfestigen sich die verstreckten Stellen. Ausweitung und Verfestigung tragen anderseits dazu bei, die Bruchgefahr zu vermindern. Mit zunehmender Ver Streckung findet ein gewisser Spannungsausgleich statt. Das Material in unmittelbarer Nähe der Kerben wirkt als Reserve; je größer diese ist, desto mehr schwindet das Gefahrmoment. Bei Nähten, die der Erwärmung ausgesetzt werden, darf man die Veränderung der Materialstruktur, die unter „Altern“ bekannt ist, nicht außer Acht lassen. Daher bilden bei Dampfkesseln und Dampfgefäßen Kerben und Schlitze in den Nähten eine wirkliche Gefahr.

Durch die Wirkung von Kerben wird der parallele Kraftfluß gestört. Der Zusammenhang von Zugspannung, Querschnittsfläche und Belastung kann nicht durch ein einfaches Verhältnis ausgedrückt werden. Die Bernoulli-Navier'sche Annahme, daß bei reiner Biegung die Spannung außerhalb der neutralen Achse sich proportional ändert, wird hinfällig.

Die Kerbwirkung kann als Unterschied der nach der Theorie gerechneten Spannungen und der wirklichen Spannungen definiert werden.

Zur Vermeidung von Blasen, Kerben und Schlitzen in Nähten mit V- und X-Profil wird das wurzelseitige (rückseitige) Ausstemmen vor dem Beginn der letzten Schweißgänge dringend empfohlen.

Fußnoten.

- 1) Höhn, Versuche mit autogen geschweißten Kesselblechen (1914).
- 2) V. D. I.-Zeitschrift. 1912, S. 1780.
- 3) Berlin, Julius Springer.
- 4) Auf Veranlassung der Kraftwerke Oberhasli A.-G., Innertkirchen, unter Mitwirkung des Verfassers.
- 5) An der E. M. P. A. Zürich, die Messungen wurden durch die Herren Dr. Th. Wyß und Theiler ausgeführt. Die Kosten trug der Schweizerische Verein von Dampfkessel-Besitzern.
- 6) Dr. Th. Wyß, Die Krautfelder in festen elastischen Körpern.
- 7) Bach, Elastizität und Festigkeit.
- 8) Z. des bayr. Revisions-Vereins, 1930, Nr. 5.
- 9) Der Verfasser hat festgestellt, daß einige schweizerische Firmen die Nähte in der geschilderten Weise behandeln.