

# DER STAHLBAU

Schriftleitung:

Dr.-Ing. A. Hertwig, Geh. Regierungsrat, Professor an der Technischen Hochschule Berlin, Berlin-Charlottenburg 2, Technische Hochschule  
Fernsprecher: C 1 Steinplatz 0011

Professor W. Rein, Breslau, Technische Hochschule. — Fernsprecher: Breslau 421 61

Beilage  
zur Zeitschrift

## DIE BAUTECHNIK

Fachschrift für das ge-  
samte Bauingenieurwesen

Preis des Jahrganges 10 RM und Postgeld

6. Jahrgang

BERLIN, 27. Oktober 1933

Heft 22

Alle Rechte vorbehalten.

### Spannungszustand und Festigkeit von Stirnkehlnahtverbindungen.

Von Dr.-Ing. G. Bierett und Dr.-Ing. G. Grüning.

(Mitteilung aus dem Staatlichen Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem.)

#### A. Einleitung.

Die Verbindung von Elementen des Stahlbaues zu Konstruktionen führt in der Regel zu Spannungshäufungen an den Stellen, an denen die Kräfte von dem einen Teil auf den anderen übergeleitet werden. Die Erfahrung und später auch die wissenschaftliche Durchdringung der Vorgänge, die zwangsläufig mit Kraftübertragungen verbunden sind, hat gezeigt, daß das Verhältnis der Spitzenspannung an den Stellen starker Spannungsstörung zur mittleren herrschenden Spannung, zahlenmäßig mit der Streckgrenze oder Bruchfestigkeit des Werkstoffes verglichen, allein keinen Aufschluß über die Sicherheit gibt.

Bekannt ist, daß der Eintritt plastischer Verformungen an Spannungsspitzen von den benachbarten und weniger beanspruchten Teilen behindert wird. Einer Spannungsspitze steht also entgegenwirkend eine Erhöhung des Formänderungswiderstandes gegenüber. Der Versuch, diese Erhöhung rechnerisch zu ermitteln<sup>1)</sup>, ist jedoch für ebene und räumliche Spannungszustände noch nicht als abgeschlossen anzusehen. Diese Erhöhung kann bei kerbempfindlichen Stoffen so groß werden, daß die Trennfestigkeit des Werkstoffes erreicht und dadurch ein Bruch herbeigeführt wird.

Bei Zerreißversuchen mit Stirnkehlnahtproben werden bei Verwendung blanken Zusatzstoffes in dem maßgebenden Bruchquerschnitt der Nähte kaum größere mittlere Festigkeiten als 80% der Festigkeit des Nahtwerkstoffes erreicht. Bei Modellen derartiger Verbindungen, die einschließlich der Nahtdreiecke vollständig aus Kesselblech hergestellt waren, betrug die mittlere Bruchfestigkeit im maßgebenden Kehlschnitt dagegen etwa 100% der Festigkeit des Werkstoffes<sup>2)</sup>. Während also die mechanischen Eigenschaften der Stähle auch sehr große Spannungsspitzen praktisch unwirksam machen, ist dies bei geschweißten Verbindungen infolge der mechanischen Eigenschaften des Schweißgutes nicht ohne weiteres der Fall. Wenn in diesen Verbindungen durch Verwendung von geeigneten Drähten größere Festigkeiten bis zur vollen Ausnutzung erreicht werden sollten, kann die Kenntnis der Spannungsgesetze in diesen Verbindungen für die statische Festigkeit als unwesentlich angesehen werden. Die Beurteilung der Schweißverbindungen für dynamische Belastungen erfordert aber auch dann die Kenntnis der Spannungsgesetze und weiterhin die Auswirkung der jeweilig vorhandenen Spannungsspitze und des Spannungsgesetzes auf die örtliche Dauerfestigkeit an den Stellen großer Spannungen.

Die nachfolgend erläuterten Versuche befassen sich mit der Ermittlung der Spannungszustände in der Kreuznaht und in den Stirnkehlnähten der Laschenverbindungen. Die Ergebnisse einiger gleichzeitig ausgeführter Dauerversuche mit diesen Verbindungen erhärten die Bedeutung der Spannungsverhältnisse für dynamische Belastung.

#### B. Allgemeines über den Spannungszustand der Stirnkehlnähte.

Von Olsson<sup>3)</sup> ist der Versuch gemacht worden, auf theoretischer Grundlage eine mathematisch exakte Lösung für die Spannungsverteilung in einer Stirnkehlnaht zu finden. Diese Arbeit betrachtet das Nahtdreieck für sich ohne Rücksicht auf die Verträglichkeit mit den durch das Nahtdreieck verbundenen Teilen und gelangt deshalb zu Ergebnissen, die teilweise nicht befriedigen. Durch Abänderung der Randbedingungen und rechnerische Verfolgung auf dem von Olsson eingeschlagenen Wege

<sup>1)</sup> W. Kuntze, Ermittlung des Einflusses ungleichförmiger Spannungen und Querschnitte auf die Streckgrenze. Stahlbau 1933, Heft 7.

<sup>2)</sup> Prof. Dr. D. Rosenthal, Einfluß der Dehnung auf die Sicherheit geschweißter Verbindungen. Arcos-Zeitschrift 1932, Nr. 52, S. 769.

<sup>3)</sup> Dipl.-Ing. Rolf Gran Olsson, Der ebene Spannungszustand der Schweißnaht. Bauing. 1932, S. 294.

ließe sich auf diese Weise eine den praktischen Verhältnissen Rechnung tragende Lösung finden.

Folgende Überlegungen ergeben einen Überblick über die zu erwartende Verteilung der Spannungen. Wenn alle Kräfte nur durch das Nahtdreieck übertragen werden sollen (Abb. 1, links), so muß zunächst im Schnitt  $B-C$  die Summe der Schubspannungen  $\tau_{xy}$  gleich der Kraft  $Z$  sein. Infolge der Kerbwirkung bei  $B$  und  $C$  wird die Schubspannung in der Nähe dieser Punkte größer sein als in der Mitte zwischen ihnen. Es ergibt sich der in Abb. 1 skizzierte Verlauf der Schubspannungen. Außerdem muß im Schnitt  $B-C$  das Moment  $Z \cdot h$  durch Spannungen  $\sigma_y$  aufgenommen werden. Infolge der Anpassungsfähigkeit statisch unbestimmter Systeme wird sich die Kraft  $Z$  so einstellen, daß das Moment  $Z \cdot h$  möglichst klein wird. Daraus ergibt sich, daß die Spannungen  $\sigma_x$  im Schnitt  $A-B$  bei  $B$  groß und bei  $A$  klein sein müssen. Ihre Summe ist gleich der Zugkraft  $Z$ .

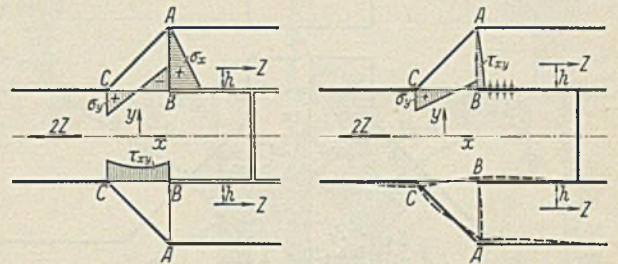


Abb. 1. Kräftepiel im Laschenstoß.

Soweit im Schnitt  $A-B$  Schubspannungen  $\tau_{xy}$  vorhanden sind, muß ihre Summe von  $A$  bis  $B$  aus Symmetriegründen verschwinden. Dies wird jedoch anders, wenn im Falle der gezogenen Lasche ( $Z$  positiv) im Längsschlitz Druckkräfte übertragen werden können (Abb. 1, rechts). Aus der in Abb. 1, rechts, gestrichelt eingetragenen Biegelinie des Stoßquerschnitts geht hervor, daß bei geschlossenem Schlitz die Lasche mit großer Kraft auf das gestoßene Blech drückt bzw. umgekehrt. Die Summe dieser Druckkräfte muß gleich der Summe der Schubspannungen  $\tau_{xy}$  sein, die am Nahtdreieck im Schnitt  $A-B$  von  $B$  auf  $A$  zu schieben. Die Druckspannung  $\sigma_y$  bei  $B$  muß dann bedeutend kleiner werden. In beiden Fällen sind bei  $B$  und  $C$  große Spannungsspitzen zu erwarten.

Sämtliche Spannungsspitzen werden gemildert, wenn die Naht statt unter  $45^\circ$  unter  $30^\circ$  abgeschrägt wird (Abb. 2, Probe 3). Die Basis  $B-C$  ist zur Aufnahme des Momentes  $Z \cdot h$  stärker, so daß die Höhe  $h$  wachsen kann und die Spannungen  $\sigma_x$  sich gleichmäßiger über  $AB$  verteilen.

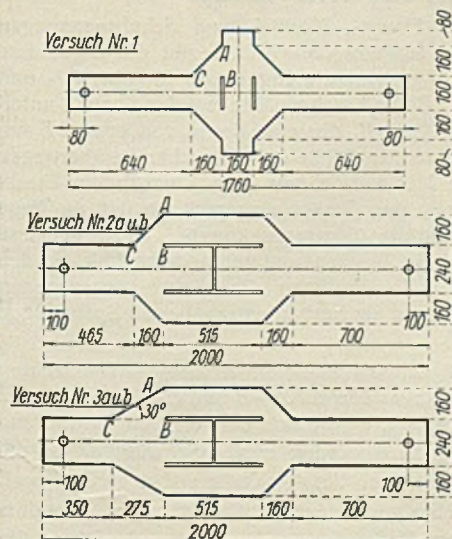


Abb. 2. Versuchskörper.



Wenn statt einer Laschennaht eine Kreuznaht angewendet wird, so stößt der Trennungsschlitz bei *B* senkrecht zur Krafrichtung in den Kraftstrom. Dann sind dort noch größere Spannungsspitzen zu erwarten (Abb. 2, Probe 1). Andererseits wird hier die Aufnahme der vorbeschriebenen Druckkräfte in der *y*-Richtung erleichtert, da zwischen den vier Nähten ein senkrecht Blech ohne Stoß hindurchgeht. Die Schubspannung im Schnitt *A—B* wird daher etwas größer werden, wodurch die Spannungsspitzen entlastet werden.

**C. Ermittlung der Spannungsverteilung durch den Versuch.**

Zur Ermittlung der genauen Verteilung der Spannungen wurden Versuche an Modellen einer Kreuznaht und zweier Laschennähte durchgeführt. Die Modelle wurden in großem Maßstab aus einem 10,8 mm starken Blech ausgeschnitten (Abb. 2).

Die Spannungsermittlung wurde unter Anwendung des bekannten Verfahrens der Bestimmung der Formänderungen in jeweils drei Richtungen um einen Punkt durchgeführt. Zur Kontrolle wurde eine Messung in einer vierten Richtung vorgenommen. Die Meßlänge betrug 20 bzw. 10 mm. Die auf beiden Oberflächen des Bleches festgestellten Formänderungen wurden gemittelt.

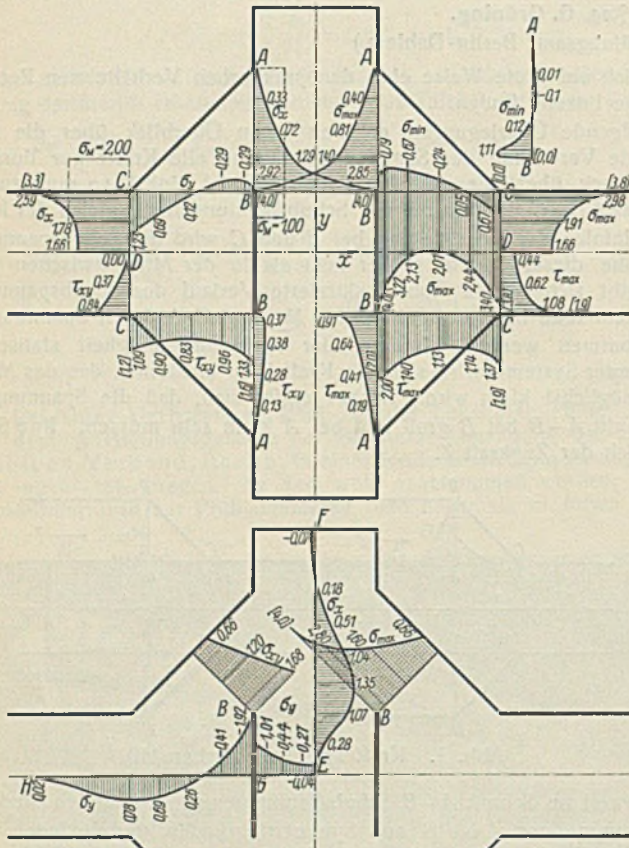


Abb. 3. Spannungsverteilung im Kreuzstoß.

Die mittlere Spannung betrug im Schnitt *AB* beim Versuch etwa 750 kg/cm<sup>2</sup>. Im folgenden sind die angegebenen Spannungen alle auf die mittlere Spannung *I* für den Schnitt *AB* reduziert.

In Abb. 3 bis 7 sind die Haupt-, Normal- und Schubspannungen in verschiedenen Schnittflächen aufgetragen. Abb. 3 gibt die Ergebnisse für den Kreuzstoß, Abb. 4 bis 7 zeigen die Ergebnisse für die 45°- und 30°-Stirnkehlnahtlaschenstöße. Beide Laschennähte wurden doppelt untersucht. Einmal wurde der Schlitz *B—B*, der eine Breite von etwa 2,5 mm aufwies, vollkommen offen gelassen, so daß keinerlei Druckkräfte übertragen werden konnten. Das zweite Mal wurde vor dem Versuch ein Blechstreifen unter leichtem Zwang in den Schlitz eingepaßt, so daß die Fuge Druckkräfte und auch Reibungskräfte übertragen konnte. Die Ergebnisse beider Versuche sind in Abb. 4, 6 u. 7 oben und unten dargestellt. In den Abbildungen sind die gemessenen Werte an die stärker ausgezogenen Ordinaten angeschrieben und die auf die Kerben extrapolierten Spannungen eckig geklammert.

Bei der Kreuznaht (Abb. 3) ist die starke Kerbwirkung der senkrechten Trennfuge bei *B* besonders groß. Aus den auf *A—B* und *C—B* gemessenen Punkten auf die Kerbe extrapoliert, ergibt sich dort  $\sigma_{max}$  zu 4, während die zweite Hauptspannung  $\sigma_{min}$  zu 0 werden muß. Schwieriger ist die Angabe der größten Schubspannungen. An der Kerbe selbst muß  $\tau_{xy} = 0$  und  $\tau_{max} = 2$  werden. Die größte gemessene Schubspannung  $\tau_{max}$  in dem 1 cm neben der Kerbe liegenden Meßpunkt auf *B—C* ist = 2. Die größte Schubspannung liegt also in dem Bereich zwischen dem letzten Meßpunkt

und der Kerbe. Die Schubspannungen fallen kurz vor der Kerbe auf 0 ( $\tau_{xy}$ ) bzw. auf  $\frac{\sigma_{max}}{2}$  ( $\tau_{max}$ ) ab. In den Abbildungen ist dieser Abfall z. T. nicht dargestellt. Trotz der milderen Kerbe wird auch bei *C* durch Extrapolation  $\sigma_{max}$  zu 3,8 gefunden. Die größte gemessene Hauptschubspannung  $\tau_{max}$  im danebenliegenden Meßpunkt auf *B—C* beträgt hier nur 1,37.

Im Schnitt *E—G* treten Druckspannungen auf (Abb. 3, unten). Diesem stehen im Schnitt *A—B* Schubspannungen  $\tau_{xy}$  gegenüber, die zusammen mit den Spannungen  $\sigma_y$  im Schnitt *B—C* das Momentengleichgewicht gegenüber dem Moment  $Z \cdot h$  am Nahtdreieck herstellen. Im Schnitt *G—H* treten bei *G* ebenfalls Druckspannungen auf. Bei *B* herrscht am Rande des Schlitzes die Zugspannung  $\sigma_x = \sigma_{max} = 4$ . Nahe *B* muß es also auf dem Umfang des Schlitzes auf beiden Seiten je einen Punkt geben, an dem die Spannung  $\sigma_x = \sigma_y = 0$  wird. Es ist anzunehmen, daß diese beiden singulären Punkte sehr nahe bei dem Schlitzscheitel *B* zu suchen sind.

Bei der Laschennaht unter 45° in Abb. 4 stößt die Trennfuge bei *B* nicht senkrecht, sondern in Richtung des Kraftstromes in diesen hinein. Demzufolge ergibt sich für den Fall des nicht ausgefüllten Schlitzes (Abb. 4a)

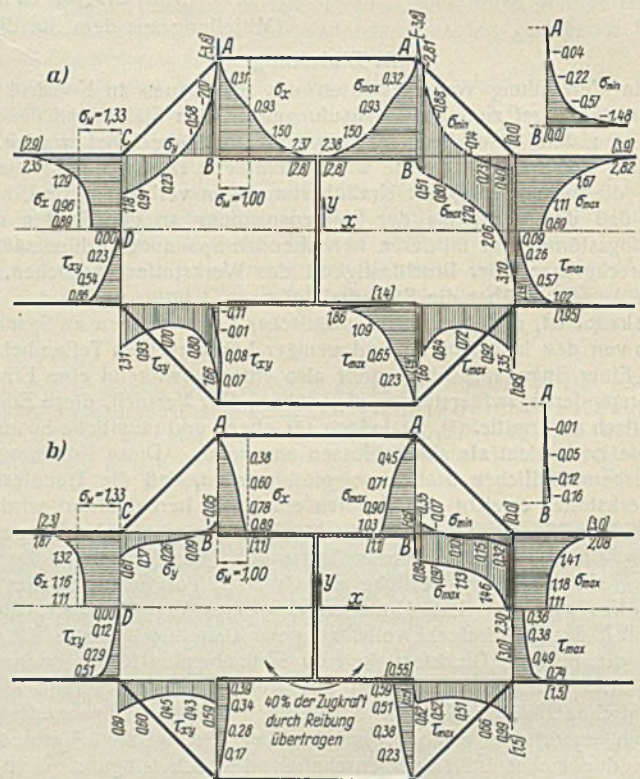


Abb. 4a u. b. Spannungsverteilung im Laschenstoß, 45°-Naht.  
a) Schlitz offen. b) Schlitz ausgefüllt.

(Die Lasche ist gegenüber den anderen Abmessungen verkürzt gezeichnet.)

durch Extrapolation aus den Messungen längs *AB* bei *B* nur eine Hauptnormalspannung  $\sigma_{max} = 2,8$ . Sehr groß ist dagegen die durch Extrapolation längs *C—B* gefundene Druckspannung  $\sigma_y = -3,8 = \sigma_{min}$ , die sich daraus ergibt, daß das ganze Moment  $Z \cdot h$  hier nur durch die Spannungen  $\sigma_y$  im Schnitt *B—C* aufgenommen werden kann. Bei *B* wurde von *A* her-

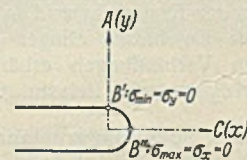


Abb. 5. Erläuterung zur Spannungsermittlung am Punkt *B* des Laschenstoßes.

kommend auf den Punkt *B'* und von *C* herkommend auf den Punkt *B''* extrapoliert (s. Abb. 5). Danach wird bei *B'*  $\sigma_{min} = 0$  und  $\tau_{max} = 1,4$ , bei *B''*  $\sigma_{max} = 0$  und  $\tau_{max} = 1,9$ . Läßt man nun beide Punkte *B'* und *B''* ineinander übergehen und nimmt einmal als Grenzspannungen  $\sigma_{max} = 2,8$  und  $\sigma_{min} = -3,8$  an, so errechnet man ein  $\tau_{max}$  von  $\frac{2,8 + 3,8}{2} = 3,3$ , wie dies in den in Abb. 6 dargestellten Kehlschnitt eingezeichnet ist. Obwohl dieser hohe Schubspannungswert infolge der Unsicherheit der Extrapolation nicht eindeutig belegt ist, kann man doch sagen, daß die Schubspannungen bei *B* besonders groß werden. Aus Symmetriegründen muß die Schub-



Zahlentafel 1. Übersicht über die ermittelten Größtspannungen<sup>1)</sup>.

Punkt	Kreuzstoß			45°-Laschennaht						30°-Laschennaht					
				Schlitz nicht ausgefüllt			Schlitz ausgefüllt			Schlitz nicht ausgefüllt			Schlitz ausgefüllt		
	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\tau_{max}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\tau_{max}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\tau_{max}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\tau_{max}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\tau_{max}$
1 cm über B auf A—B	2,92	1,11	0,91	2,38	-1,48	1,86	1,03	-0,16	0,59	1,61	-1,08	1,34	1,26	-0,29	0,77
1 cm neben B auf C—B	3,22	-0,79	2,00	0,51	-2,81	1,66	0,89	-0,35	0,62	0,38	-2,13	1,25	0,98	-0,73	0,86
Extrapoliert auf	—	—	2,8	0,0	1,4	1,1	0,0	0,55	1,8	0,0	0,9	1,4	0,0	0,7	
			B'	0,0	-3,8	1,9	0,0	-0,5	0,25	0,0	-3,2	1,6	0,0	-1,4	0,7
B	4,0	0,0	2,0	2,8	-3,8	3,3	1,1	-0,5	0,8	1,8	-3,2	2,5	1,4	-1,4	1,4
1 cm <sup>2)</sup> neben C auf B—C	3,40	0,67	1,37	3,10	0,40	1,35	2,30	0,32	0,99	1,84	0,14	0,85	1,70	0,12	0,79
1 cm unter C auf D—C	2,98	0,82	1,08	2,82	0,77	1,02	2,08	-0,60	0,74	1,86	0,30	0,78	1,70	0,34	0,68
Extrapoliert auf C	3,8	0,0	1,9	3,9	0,0	1,95	3,0	0,0	1,5	2,1	0,0	1,05	2,0	0,0	1,0

<sup>1)</sup> Die Spannungen beziehen sich auf die mittlere Spannung l in den senkrecht zur Krafrichtung liegenden Kathetenflächen.  
<sup>2)</sup> Bei der 30°-Naht 1,5 cm.

spannungssumme  $\int \tau_{xy}$  im Schnitt A—B verschwinden. Der Versuch hat dies bestätigt, wie aus Abb. 4a ersichtlich ist. Dagegen ergibt sich bei C  $\sigma_{max}$  zu 3,9, also annähernd gleich der Hauptnormalspannung  $\sigma_{max}$  der Kreuznaht. Die Hauptschubspannung bei C ist mit  $\tau_{max} = 1,95$  nahezu gleich der der Kreuznaht. Die am Punkte D im Verhältnis zu den Spannungen  $\sigma_x = \sigma_{max}$  geringen Spannungen  $\tau_{max}$  sind auf dort auftretende größere Spannungen  $\sigma_y$  zurückzuführen.

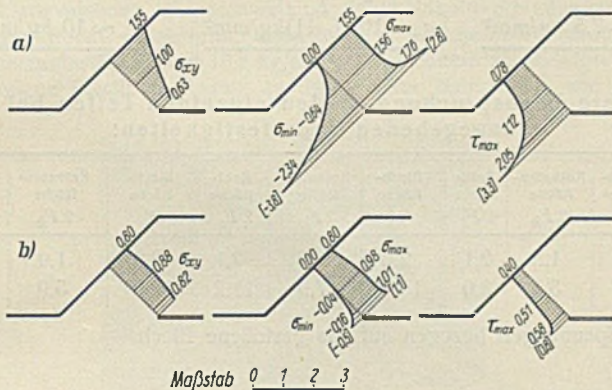


Abb. 6a u. b. Spannungsverteilung im Kehlschnitt der 45°-Naht des Laschenstoßes.  
a) Schlitz offen. b) Schlitz ausgefüllt.

Im Falle der ausgefüllten Fuge B—B (Abb. 4b) verschwindet die hohe Druckspannung bei B. Der Schlitz B—B war durch Sägen hergestellt, also ziemlich rauh, und das ausfüllende Blech unter Zwang eingeführt. Nach den Messungen sind dadurch etwa 40% der Zugkraft durch Reibung in B—B übertragen worden. Die Spannungsfläche  $\int_A^B \sigma_x$  ist deshalb wesentlich kleiner und auch die Spannungsspitze bei B stark herabgesetzt. Entsprechend ergeben sich auch die anderen Spannungen wesentlich günstiger.

Bei einem geschweißten Laschenstoß wird der durch Reibung übertragene Kraftanteil geringer sein als im vorliegenden Fall des unter Zwang ausgefüllten Schlitzes. In Anbetracht der durch den Schrumpfungsvorgang hervorgerufenen Anpressung der Laschen gegen die Bleche kann aber auch praktisch mit günstigeren Verhältnissen, als sie hier für den unausgefüllten Schlitz festgestellt wurden, gerechnet werden. Man geht jedoch sicher, wenn man mit den großen Spannungswerten der unausgefüllten Lasche rechnet. In Abb. 6 sind die Spannungen im Kehlschnitt aufgetragen. Während bei der Kreuznaht die Spannung  $\sigma_{xy}$  (unter 45° gerichtet) bei B am größten wird und nach dem Rande zu langsam abnimmt, ist dies bei der Laschennaht umgekehrt. Hier wird  $\sigma_{xy}$  nach B zu kleiner und ist am Rande am größten.

Im Falle der unter 30° abgeschrägten Naht (Abb. 7) ergibt sich ein ähnlicher Spannungsverlauf, aber mit gemilderten Spannungsspitzen. Man findet bei B:  $\sigma_{max} = 1,8$ ,  $\sigma_{min} = -3,2$  und  $\tau_{max} = 2,5$ ; ebenso bei C  $\sigma_{max} = 2,1$  und  $\tau_{max} = 1,05$ . Bei ausgefüllter Fuge wurden nach den Messungen 24% der Zugkraft durch Reibung übertragen. Die Anordnung der 30°-Naht bewirkt gemeinsam mit der günstigen Wirkung der Reibung sehr befriedigende Spannungsverhältnisse.

In der Zahlentafel 1 sind noch einmal die gemessenen und die extrapolierten Größtspannungen wiedergegeben.

In Abb. 8a u. b sind die Spannungstrajektorien für die Kreuznaht und für die 45°-Laschennaht mit nicht ausgefülltem Schlitz aufgezeichnet, auf der linken Seite die Hauptspannungslinien, auf der rechten Seite die Hauptschubspannungslinien.

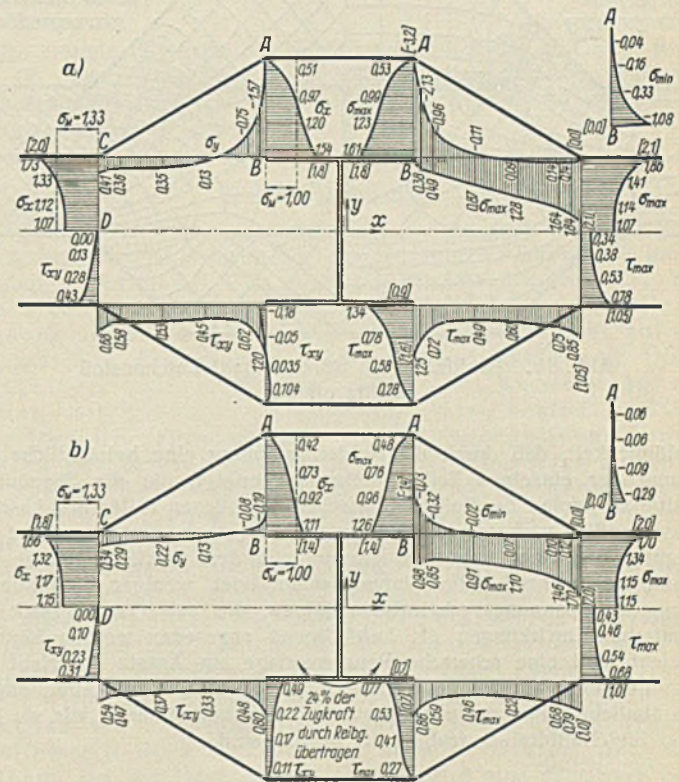


Abb. 7a u. b. Spannungsverteilung im Laschenstoß, 30°-Naht.  
a) Schlitz offen. b) Schlitz ausgefüllt.  
(Die Lasche ist gegenüber den anderen Abmessungen verkürzt gezeichnet.)

Zur Bestimmung der Genauigkeit der Messungen wurden für das Nahtdreieck ABC bei allen Versuchen die Gleichgewichtsbedingungen  $\Sigma H = 0$ ,  $\Sigma V = 0$  und  $\Sigma M = 0$  aufgestellt. Die Gleichungen, bei denen keine Schubspannungen vorkamen, stimmten im allgemeinen mit einer Genauigkeit von etwa 3%. Dort, wo Schubspannungen in den Gleichungen auftraten, war die Genauigkeit etwas geringer. Die Messungen wurden proportional so erweitert, daß die Gleichgewichtsbedingungen erfüllt sind. Eine kleine Abweichung der vorgenommenen Modellmessungen gegenüber der tatsächlichen Stirnkehlnaht kann dadurch auftreten, daß bei dem Modell ein ebener Spannungszustand, bei der Stirnkehlnaht ein ebener Formänderungszustand vorliegt.

Die Spannungsuntersuchung hat zu folgendem Ergebnis geführt. Der Kreuzstoß unterliegt im Scheitel des Nahtdreiecks sehr starken Hauptnormalspannungen und Hauptschubspannungen. Beim Laschenstoß mit 45°-Naht sind die Hauptnormalspannungen hier etwas geringer. Infolge der besonderen Spannungsverhältnisse am Scheitel des Nahtdreiecks können



jedoch bei diesem Stoß hier sehr große Hauptschubspannungen auftreten, wenn eine gute Anlage der Laschen an den Blechen nicht vorhanden ist. Aus den günstigeren Verhältnissen hinsichtlich der Hauptnormalspannung kann deshalb noch nicht geschlossen werden, daß der Laschenstoß günstiger zu bewerten ist als der Kreuzstoß. Bei dem Laschenstoß besteht jedoch

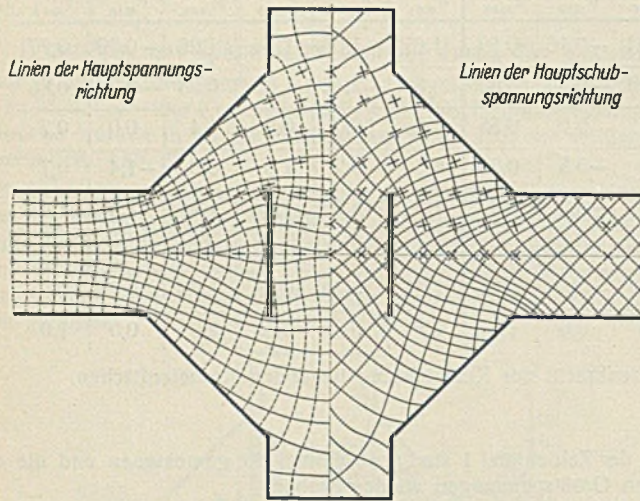


Abb. 8a. Kraftfelder im Kreuzstoß.

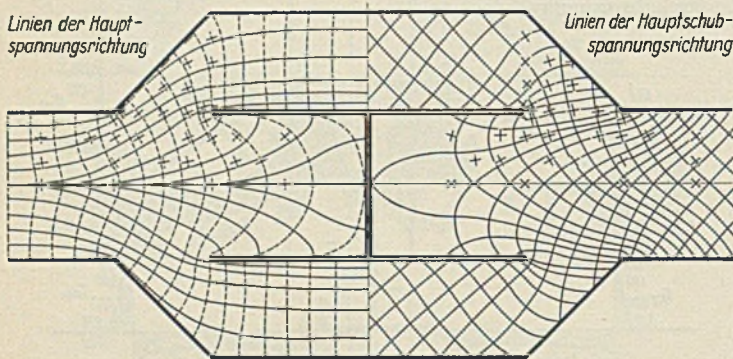


Abb. 8b. Kraftfelder im Stirnkehlnaht-Laschenstoß (Schlitz offen).

die Möglichkeit, daß durch die Nahtschumpfung eine beträchtliche Anpressung der einzelnen Teile aufeinander erfolgt, die die Spannungsverhältnisse infolge der Reibung zwischen gestoßenen Teilen und Laschen ganz wesentlich verbessern. Eine außerdem vorgenommene größere Abschragung der Naht kann gemeinsam mit der praktisch infolge der Schumpfung wahrscheinlich immer mehr oder weniger vorhandenen Reibung zu Spannungsverhältnissen führen, die auch im Hinblick auf dynamische Einwirkungen als befriedigend angesehen werden können. Vielleicht wird eine schwache Raupenvorlage am Ansatz der Naht des etwa unter 45° geschweißten Nahtdreiecks (am Punkt C der Abbildungen) schon ähnliche günstige Spannungsverhältnisse herbeiführen, wie sie hier für das 30°-Nahtdreieck festgestellt worden sind.

**D. Die Dauerzugfestigkeit der Stirnkehlnahtverbindungen.**

Zur Klärung der Bedeutung der Spannungsverhältnisse für die Dauerzugfestigkeit bei oftmals wiederholter Belastung wurden Dauerzugversuche mit Kehlnahtverbindungen ausgeführt, die ebenfalls wie die zur Spannungsermittlung verwendeten Versuchskörper aus Blechen St 37, also ohne Anwendung der Schweißung herausgearbeitet wurden. Die Proben waren mit Rücksicht auf die Maschinenleistung und Herstellungskosten viel kleiner als die früheren Proben, doch wurden die maßgebenden Hauptabmessungen verhältnismäßig vermindert.

Untersucht wurde der Kreuzstoß und der Laschenstoß mit 45° Nahtdreieck, der letztere mit offenen und ausgefüllten Längsschlitz. Das Verhältnis der senkrecht zur Zugrichtung liegenden Kathetenflächen der beiden Nahtdreiecke zur Fläche des gestoßenen Teiles  $2F_k : F$  betrug wie vordem bei der Laschenprobe 1,33, bei der Kreuzprobe 2,00; das Verhältnis der Kehlflächen zur Fläche des gestoßenen Teiles  $2F_s : F$  war 0,94 bzw. 1,40.

Bestimmt wurde die Dauerzugfestigkeit als die Spannung, bei der nach  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln noch kein Bruch der Verbindung eintritt. Die angegebenen Dauerfestigkeiten sind hier im Gegensatz zu den vorher

beschriebenen Versuchen auf die Fläche des gestoßenen Teiles bezogen. Die untere Spannungsgrenze, auf die immer wieder entlastet wurde, wurde in Anlehnung an die bei vielen wichtigen Dauerversuchen der letzten Jahre gewählten Versuchsbedingungen zu  $\sigma_u = 2 \text{ kg/mm}^2$ , bezogen auf die Fläche des gestoßenen Teiles, gewählt. Die Frequenz betrug etwa 6 Hertz entsprechend etwa 360 Lastwechseln in der Minute.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung gehen aus Zahlentafel 2 hervor.

**Zahlentafel 2.**

**Ergebnisse der Dauerzugversuche mit Blechmodellproben.**

Laschenproben, 45°-Naht					Kreuzprobe, 45°-Naht						
Naht, Kathetenlänge $h = 34 \text{ mm}$					$h = 40 \text{ mm}$						
Gestoßenes Blech, Höhe $h = 51 \text{ „}$					$h = 40 \text{ „}$						
Flächenverhältnis $2F_k : F = 1,33 \text{ „}$					$2F_k : F = 2,00 \text{ „}$						
$2F_s : F = 0,94 \text{ „}$					$2F_s : F = 1,40 \text{ „}$						
Schlitz nicht ausgefüllt			Schlitz ausgefüllt								
Probe-Nr.	Spannungsgrenzen $\sigma = P : F^*$		Lastwechselzahl bis zum Bruch $N$ in $10^6$	Probe-Nr.	Spannungsgrenzen $\sigma = P : F$		Lastwechselzahl bis zum Bruch $N$ in $10^6$	Probe-Nr.	Spannungsgrenzen $\sigma = P : F$		Lastwechselzahl bis zum Bruch $N$ in $10^6$
	unten $\sigma_u$	oben $\sigma_o$			unten $\sigma_u$	oben $\sigma_o$			unten $\sigma_u$	oben $\sigma_o$	
1		20,0	0,0224								
2	2,0	13,0	0,114	6	2,0	10,0	> 2,464	4	2,0	14,0	0,179
3		8,0	1,237	6		12,0	+ 0,632	5		11,0	0,797

Daraus Dauerfestigkeit bei  $\sigma_u = 2,0 \text{ kg/mm}^2$  bis  $N = 2 \cdot 10^6$  Lastwechsel:

$\sigma_o = 7,5 \text{ kg/mm}^2$      $\sigma_o = 10,5(-11) \text{ kg/mm}^2$      $\sigma_o \sim 10 \text{ kg/mm}^2$

Mittlere Beanspruchung in den einzelnen Teilen bei den angegebenen Dauerfestigkeiten:

	Blechfläche $F$	Kathetenfläche $2F_k$	Kehlfläche $2F_s$	Blechfläche $F$	Kathetenfläche $2F_k$	Kehlfläche $2F_s$	Blechfläche $F$	Kathetenfläche $2F_k$	Kehlfläche $2F_s$
$\sigma_u$	2,0	1,5	2,1	2,0	1,5	2,1	2,0	1,0	1,4
$\sigma_o$	7,5	5,3	8,0	10,5	7,9	11,2	10,0	5,0	7,1

\*) Spannungen bezogen auf das gestoßene Blech.

Der Stab Nr. 6, belastet zwischen  $\sigma_u = 2$  und  $\sigma_o = 10 \text{ kg/mm}^2$ , war bei  $N = 2,464 \cdot 10^6$  Lastwechseln noch nicht gebrochen. Die obere Spannungsgrenze wurde darauf auf  $12 \text{ kg/mm}^2$  erhöht. Der Dauerbruch trat nach weiteren  $0,632 \cdot 10^6$  Lastwechseln ein. Obwohl dieses Ergebnis durch die Vorbelastung zwischen 2 und  $10 \text{ kg/mm}^2$  etwas beeinflusst sein kann, kann für diese Probeform die Dauerfestigkeit ziemlich sicher mit  $10,5$  bis  $11 \text{ kg/mm}^2$  angegeben werden.

Kennzeichnend für die gefährdeten Stellen der einzelnen Formen ist der Verlauf der Brüche (Abb. 9 u. 10). Die beiden Kreuzproben brachen von dem Scheitel der Nahtdreiecke aus. Der Bruch verlief nahe den Katheten senkrecht zur Krafrichtung. Die Laschenprobe mit offenen Schlitz zeigt Anbrüche am Ansatz der Nahtdreiecke (Punkt C der früheren Abbildungen) und gleichzeitig am Scheitel der Nahtdreiecke. Obwohl nicht sicher festzustellen ist, ob und wie weit die letzten Folgererscheinungen der ersteren sind, weist das Bruchaussehen darauf hin, daß sich an beiden Stellen die Dauerbrüche ziemlich gleichzeitig ausgebildet haben, daß also beide Stellen gleich gefährdet sind. Die Laschenprobe mit ausgefülltem Schlitz brach vom Ansatz des Nahtdreiecks aus.

Die rechnerischen Hauptspannungen an den nach dem Brucheintritt gefährdeten Punkten ergeben sich auf Grund der Spannungsuntersuchung für die festgestellte mittlere Dauerfestigkeit wie folgt:

Art der Verbindung	Mittlere Dauerfestigkeit im gestoßenen Teil $\text{kg/mm}^2$	Hauptnormalspannungen $\text{kg/mm}^2$		
		Nahtansatz $\sigma_{\max}$	Nahtscheitel $\sigma_{\max}$	$\sigma_{\min}$
Kreuzprobe 45° . . . . .	10	19	20	0
Laschenprobe 45°, Schlitz offen . . . . .	7,5	22	16	-21
Laschenprobe 45°, Schlitz ausgefüllt . . . . .	10,5	23	9	4



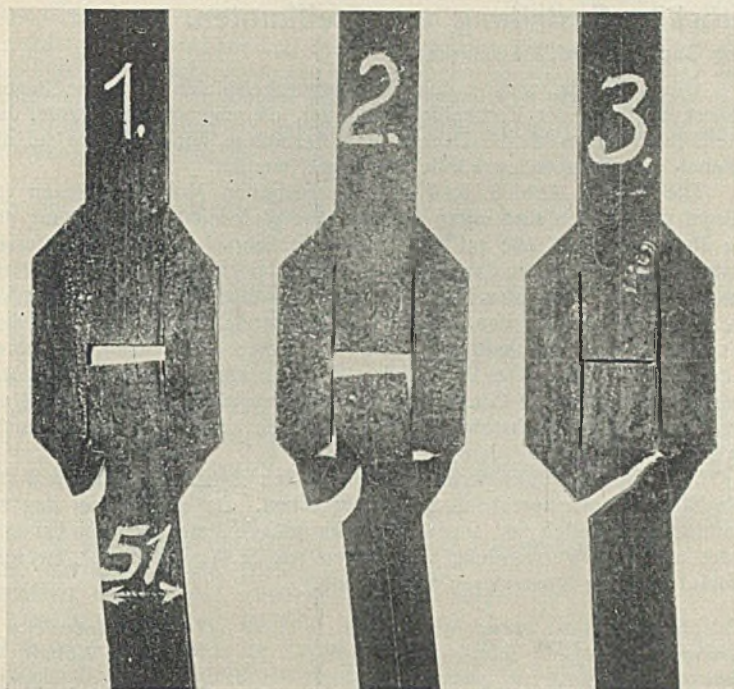


Abb. 9. Dauerbrüche an den Laschenproben mit offenen Schlitzten.

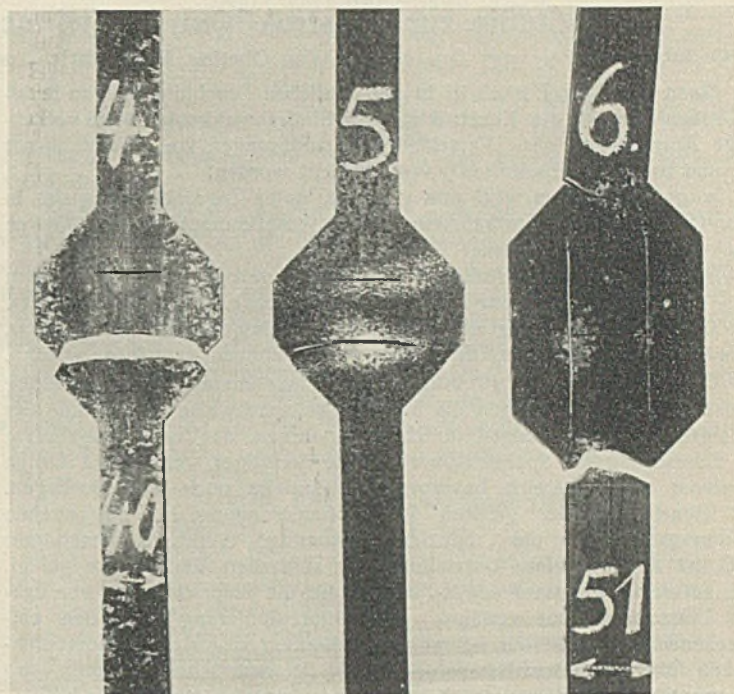


Abb. 10. Dauerbrüche an den Kreuzstoßproben und der Laschenprobe mit ausgefüllten Schlitzten.

Dauerzugversuche an geschweißten Stirnkehlnahtverbindungen, mit blanken Elektroden geschweißt, ergaben unter gleichen Prüfbedingungen eine Dauerzugfestigkeit von 10,8 kg/mm<sup>2</sup>. Der Dauerbruch erfolgte durch das gestoßene Blech am Ansatz der Naht. Der Nahtwinkel war etwas

Anbruch erfolgte im Ansatz des Nahtdreiecks durch das gestoßene Blech (Abb. 12), also etwas anders als bei den Modellproben. Nach der Spannungsuntersuchung sind jedoch der Ansatz der Schweißnaht und die Nahtwurzel als etwa gleich gefährdet anzusehen.

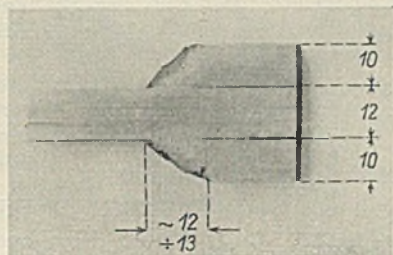


Abb. 11. Längsschnitt durch eine elektrisch geschweißte Stirnkehlnaht-Laschenprobe.

kleiner als 45° (Abb. 11). Zwei im Dauerzugversuch untersuchte, mit blanken Elektroden geschweißte Kreuzproben, belastet zwischen  $\sigma_u = 8$  und  $\sigma_o = 16$  kg/mm<sup>2</sup> für den gestoßenen Teil, ertrugen 1743 000 und 2 120 000 Lastwechsel. Die Dauerfestigkeit für  $N = 2 \cdot 10^6$  Last-

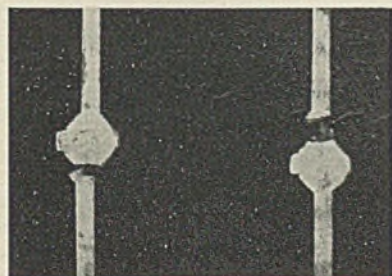


Abb. 12. Dauerbrüche an elektrisch geschweißten Kreuzstoßproben.

wechsel für die Grundspannung  $\sigma_u = 8$  kg/mm<sup>2</sup> beträgt demnach etwa 15,5 bis 16 kg/mm<sup>2</sup>. Da nach Erfahrungen bei Versuchen mit geschweißten Kehlnahtanschlüssen die Schwingungsbreite (Unterschied zwischen  $\sigma_u$  und  $\sigma_o$ ) im Bereich nicht zu großer Grundspannungen nicht stark veränderlich ist, kann für die bei den anderen Versuchen angewendete Grundspannung  $\sigma_u = 2$  kg/mm<sup>2</sup> mit einer Dauerfestigkeit von etwa 10 bis 11 kg/mm<sup>2</sup> für diesen geschweißten Kreuzstoß gerechnet werden. Der

#### E. Schlußfolgerung.

Die Ergebnisse mit den geschweißten Proben sind im Vergleich zu den Ergebnissen der Versuche mit den Modellverbindungen von großer Bedeutung. Auch für die geschweißte Verbindung ist der Dauerbruch bei der verhältnismäßig kleinen mittleren Spannung nur auf die geometrische Form, nicht aber auf die mechanischen Eigenschaften des Schweißgutes und Übergangsgefüges zurückzuführen. Selbst für Verwendung von Drähten mit größerer Dehnfähigkeit, im besten Fall bis zur vollen Übereinstimmung mit den mechanischen Eigenschaften des Grundwerkstoffes, ist kein besseres Ergebnis zu erwarten, wenn die hier zugrunde gelegte geometrische Form der Verbindung, insbesondere die des Nahtdreiecks, vorliegt. Wohl kann sich bei der Elektroschweißung die Verwendung von Mantelelektroden empfehlen, die in der Regel größere Dehnfähigkeit des Schweißgutes gewähren, wenn infolge ihrer Eigenschaften beim Schweißen eine günstigere geometrische Form des Raupenquerschnittes, besonders ein allmählicher Auslauf der Nahtoberfläche in die Blechoberfläche erzielt wird. Die Auswahl der Drähte für diese Verbindung für dynamisch beanspruchte Konstruktionen sollte deshalb vor allem mit Rücksicht auf die erzielte Gestalt der Naht erfolgen. Bei der Gasschmelzschweißung wird eine günstigere Form der Naht im allgemeinen vorliegen. Im Materialprüfungsamt sind mit solchen Verbindungen bereits auch recht günstige Ergebnisse erzielt worden. Die Notwendigkeit vollkommener Verschweißung an der Nahtwurzel geht aus der Spannungsuntersuchung deutlich hervor.

Starke Verbesserungsmöglichkeiten für die Stirnkehlnahtverbindungen durch Abänderung der geometrischen Form des Nahtquerschnittes sind also vorhanden.

Die Bedeutung der mechanischen Eigenschaften für derartige Beanspruchungen, auch die Bedeutung eines zu tiefen Einbrandes, der von manchen Seiten als mögliche Ursache für den Bruch dieser Verbindungen angesehen wird, tritt gegenüber der Bedeutung der geometrischen Form zurück. Bei entsprechender Gestaltung der Raupen muß deshalb die Stirnkehlnaht auch ohne anschließende Flankennähte, vielleicht aber in Verbindung mit Stumpfnähten, als ein wichtiges und hochwertiges Konstruktionselement der geschweißten Konstruktionen angesehen werden.



## Studie zur konstruktiven und wirtschaftlichen Gestaltung von Steifknoten.

Alle Rechte vorbehalten.

Von Obering. Rud. Ulbricht und Ing. Jac. Labonté, Düsseldorf.

Einen wichtigen Fortschritt in der baulichen Durchbildung von Stahl-skelettbauten stellt die Konstruktion von Steifrahmenknoten ohne vouten-artige Abschragung dar. Verschiedene Ausführungen von Knoten dieser Art sind in den Fachschriften<sup>1)</sup> veröffentlicht worden.

In nachstehendem wird nun versucht, unter Zugrundelegung des in Abb. 1 dargestellten Steifrahmens einige Ausbildungsarten der Knoten miteinander zu vergleichen.

Die Abb. 3, 6, 7 u. 9 stellen die in Betracht gezogenen Konstruktionen dar. In allen Fällen ist auf gute Montagemöglichkeit besonders geachtet, und Baustellenschweißung ist, abgesehen von einigen Heftschweißungen, die elektrisch oder autogen ausgeführt werden können, vermieden worden.

Die Abschnitte I bis IV bringen nach einer kurzen Charakterisierung der einzelnen Ausführungen die Tragfähigkeitsnachweise im Rahmen der für Festigkeitsberechnungen üblichen Annahmen, da Versuchsergebnisse zur Erforschung der Spannungsverhältnisse derartiger, von großen Lasten in einem engen Bereich beanspruchter Bauteile noch nicht vorliegen. Zur Beurteilung der größten Werkstoffanstrengung ist bei ebenen Spannungszuständen die „reduzierte Spannung“ ermittelt. Besonderer Wert ist auf die klare Darstellung der statischen Verhältnisse gelegt. Hier sei nur der Verlauf der  $M$ -Flächen und die Unterscheidung von Eck- und Einspannmoment erwähnt. Die Dimensionierung nach den entsprechend den Niet- und Schraubenanschlüssen abgestuften Momentenflächen führt zu Gewichtsparsnissen, die bei dem scharfen Wettbewerb der verschiedenen Bauweisen heute nicht zu unterschätzen sind.

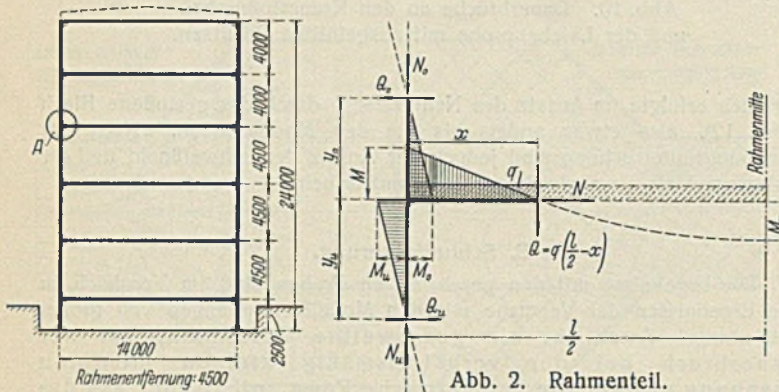


Abb. 1. Steifrahmen.

Im Abschnitt V sind die Formänderungen des in Abb. 2 dargestellten Rahmenteils unter Beachtung der Konstruktion des Steifknotens einer näheren Betrachtung unterzogen. Es ergibt sich, daß sich die aus der Art der Konstruktion bedingten Einflüsse auf die Durchbiegung des Rahmenriegels z. T. gegenseitig aufheben, und daß somit im allgemeinen der Durchbiegungsnachweis ohne Rücksicht auf die gewählte Knotenausbildung anhand der Momentenflächen der statischen Berechnung durchgeführt werden kann.

Nachdem so vom Standpunkt des Konstrukteurs die Brauchbarkeit der verschiedenen Ausführungen dargelegt ist, wird in Abschnitt VI die Frage nach der wirtschaftlichsten Ausführung geprüft. Hier ist besonders zu erkennen, wie sich die Forderung des Architekten nach geringer Deckenhöhe auf die Kosten für das Stahlskelett auswirkt und welche Mehrkosten entstehen, wenn die diesbezügliche Forderung zu weitgehend ist. Nach Abwägen aller Umstände wird der Ausführung des Steifknotens nach Abb. 9 die größte Wirtschaftlichkeit zugesprochen. Dieses Werturteil dürfte auch im Rahmen der Gesamtausführung noch zutreffend sein, da der Mehraufwand an Baustoffen für Decken und Wände gegenüber der Ausführung nach Abb. 7 unter der Voraussetzung gleicher lichter Raummaße nur unbedeutend ist.

Die vier verschiedenen Steifknoten gehören Rahmentragwerken von gleicher Tragfähigkeit an (Abb. 1). Die Belastung des Riegels ist in allen Fällen  $q = 3,6 \text{ t/m}$ . Der Stützdruck im Pfosten, von den oberen Geschossen herrührend, beträgt  $N_0 = 35 \text{ t}$ . Die Lage der Momentennullpunkte für den Pfosten ist für alle Fälle gleich angenommen, und zwar ist  $y_0 = 2,00 \text{ m}$  und  $y_u = 2,25 \text{ m}$ . Die übrigen in der Abb. 2 eingetragenen Größen ändern sich von Fall zu Fall entsprechend den Steifigkeitsverhältnissen zwischen Riegel und Pfosten.

Die Abb. 2 stellt einen Rahmenteil dar, der an den Stellen der Momentennullpunkte aus dem Zusammenhang mit dem Rahmen herausgeschnitten ist. An den Schnittstellen sind die zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichtes erforderlichen Kräfte eingetragen.

<sup>1)</sup> Stahlbau 1928, Heft 15, S. 177 bis 180. — P-Träger 1930, Heft 1, S. 4 bis 13. — Ebenda 1932, Heft 1, S. 7 bis 9. — Stahlbau 1932, Heft 10, S. 73 bis 76. — Ebenda 1933, Heft 9, S. 68 bis 70.

Die Momente, welche den Berechnungsbeispielen zugrunde liegen, rühren nur von der Vertikalbelastung her, da angenommen wurde, daß die Windkräfte durch die Decken bzw. besondere Windverbände auf die Giebel- und Treppenhauswände übertragen werden.

Die in den Abb. 3, 6, 7 u. 9 dargestellten Momentenflächen für Riegel und Pfosten sind unter der Annahme gleichmäßiger Verteilung der zu übertragenden Kräfte auf die Nieten bzw. Schrauben eines Anschlusses entwickelt. Sie bergen daher die aus der ungleichmäßigen Kraftverteilung auf die einzelnen Nieten bzw. Schrauben herrührenden Ungenauigkeiten in sich. Hiervon werden jedoch nur die Bereiche der  $M$ -Flächen beeinflusst, welche innerhalb der äußersten Nieten bzw. Schrauben eines Anschlusses liegen. Der Verlauf der  $M$ -Linien kann in diesen Bereichen erforderlichenfalls auf Grund von Formänderungsüberlegungen korrigiert werden. Für die nachstehenden Berechnungen kommt dies jedoch nicht in Frage.

Als Konstruktionsmaterial wurde in allen Beispielen St 37 und für die Nieten dementsprechend St 34 vorgesehen. Da es sich bei den zu verbindenden Teilen fast ausnahmslos um größere Materialstärken handelt, wäre auch die Verwendung von Nieten aus St 44 vorteilhaft gewesen, worauf hier nur hingewiesen werden soll.

### I. Rahmenecke nach Abb. 3.

Diese Ausführung nimmt, abgesehen von der Charakteristik, die allen hier beschriebenen Konstruktionen eigen ist — Überspannung breiter Räume ohne Zwischenstützen und Fortfall von Vouten — weniger Rücksicht auf bauliche als auf statische Erfordernisse. Sie ist hervorgegangen aus der früher allein üblichen Ausführungsart von Träger- und Stützenkonstruktionen. Die Stütze ist aus zwei Einzelprofilen zusammengesetzt, zwischen denen der Träger gelagert ist.

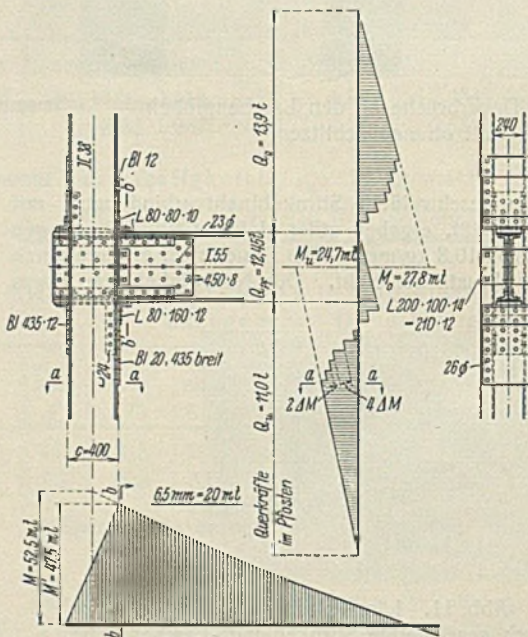


Abb. 3. Steifknoten I.

Die Einspannung des Trägers (Rahmenriegels) wird durch Zusammenwirken der unteren rechten Auflagerung mit der oberen linken Verkeilung bewirkt. Die untere, linke Auflagerung und die obere rechte Verkeilung sind lediglich zum Zwecke der Montageversteifung vorgesehen. Nur für den Fall, daß der Rahmen auch Windkräfte zu übertragen hätte, und somit in der Ecke negative Momente aufzunehmen wären, käme auch diesen statische Bedeutung zu. Die Anordnung der Auflagerplatte — 210 · 12, welche mit den Auflagerwinkeln versenkt vernietet ist, hat sich bei größeren Bauten wegen der damit verbundenen besseren Verkeilungsmöglichkeit als zweckmäßig erwiesen<sup>2)</sup>.

Die Ausführung der oberen Verkeilung ist in Abb. 4 verdeutlicht. Das Anziehen der Kelle darf nur mit dem Handhammer vorgenommen werden, da anderenfalls mit einem Ausoder Einbiegen des Stützentails oberhalb des betrachteten Eckpunktes zu rechnen ist, wodurch die Montage der höher liegenden Stockwerksriegel erschwert oder gar unmöglich wird.

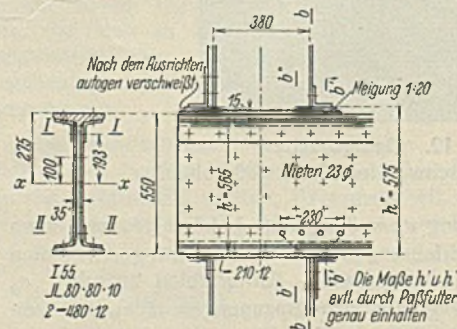


Abb. 4. Einzelheiten zu Steifknoten I.

Das Einspannmoment  $M'$  (Abb. 3) wird in ein Kräftepaar mit den lotrechten Kräften  $P_0$  und  $P_u$  —  $A$  zerlegt (Abb. 5) und so durch die

<sup>2)</sup> Stahlbau 1932, Heft 21, S. 163 bis 165.



oben beschriebene Einspannkonstruktion aufgenommen (Abb. 3 u. 4). Der Auflagerdruck  $A = Q + q \cdot x'$  gelangt direkt in das rechte Auflager.

Infolge der Formänderung des eingespannten Trägerendes durch die Biegungs- und Schubspannungen tritt eine horizontale Verschiebung der Berührungspunkte des Trägers gegenüber denen der Stützenauflager ein.

Dadurch entstehen am unteren und oberen Auflagerpunkt des Riegels Reibungskräfte, welche die Größe

$$R = f P_o$$

erreichen können und das Moment

$$M'' = R h = f P_o h$$

ausüben. Hierin ist  $f$  der Reibungskoeffizient und  $h$  die Trägerhöhe.  $M''$  stellt einen Anteil des Einspannmomentes  $M'$  dar.  $P_o$  ist somit ebenfalls von  $f$  abhängig. Es ist

$$M' = P_o c + M'' = P_o (c + f h)$$

und somit  $P_o = \frac{M'}{c + f h}$ .

Mit  $f=0$ , bei Vernachlässigung

der Reibung, ist  $P_o = \frac{M'}{c}$ .

$P_o$  und  $P_u$  werden demnach durch die Mitwirkung der Reibung verringert. Die Nietanschlüsse könnten also schwächer gehalten werden.

Die Mitwirkung der Reibung ist von dem Grade der Nachgiebigkeit der Auflagerkonstruktion in waagerechter Richtung abhängig. Welches Größenmaß die rechnerische Verschiebung mindestens erreichen muß, um ein sicheres Auftreten der Reibungskräfte zu gewährleisten, läßt sich nur durch Versuche feststellen. Während bei der vorliegenden Konstruktion die Verschiebung gegenüber den Auflagern 0,5 mm beträgt, erreicht sie z. B. bei einem in gleicher Weise eingespannten Träger im Profil I 28 unter Zugrundelegung von  $c = 40$  cm und  $\max \sigma_{red} = 1400$  kg/cm<sup>2</sup> nur das Maß 0,25 mm. Man bewegt sich also auf der sicheren Seite, wenn man von der Mitwirkung der Reibung absieht, bis spezielle Versuche Klärung der Frage bringen. Zu beachten ist dabei, daß nur bei Eckverbindungen, wo beiderseitige Keile verwendet werden (Abb. 3), die obigen Betrachtungen in Frage kommen, während bei einseitiger Keilanordnung (Abb. 7) keine nennenswerten Reibungskräfte auftreten können. Die Untersuchung des Eckpunktes ist in dem ersten Berechnungsbeispiel durchgeführt.

Die Verstärkung des Steges am eingespannten Trägerende hätte auch durch Aufschweißen der Beibleche vorgenommen werden können, wie es die Riegelverstärkung im dritten Beispiel (Abb. 7) zeigt.

### 1. Berechnungsbeispiel.

Aus der besonderen statischen Berechnung<sup>3)</sup> sind folgende Werte entnommen:

Eckmoment:  $M = 52,5$  tm     $M_o = 27,8$  tm     $M_u = 24,7$  tm

$x = 2,5$  m     $y_o = 2,0$  m     $y_u = 2,25$  m.

Auflagerdruck des Riegels:  $A = Q + q x = 25,0$  t.

Mit diesen Werten erhält man:

$$N_u = N_o + Q + q x = 35,0 + 25,0 = 60,0 \text{ t}$$

$$Q_o = \frac{M_o}{y_o} = \frac{27,8}{2,0} = 13,9 \text{ t}$$

$$Q_u = \frac{M_u}{y_u} = \frac{24,7}{2,25} = 11,0 \text{ t}$$

$$N = Q_o - Q_u = 13,9 - 11,0 = + 2,9 \text{ t}$$

$$c = 0,38 + 2 \cdot \frac{0,02}{2} = 0,40 \text{ m (Abb. 3 u. 5).}$$

Einspannmoment:  $M' = M - A \cdot \frac{c}{2} = 52,5 - 25,0 \cdot \frac{0,40}{2} = 47,5$  tm

$$P_o = \frac{M'}{c} = \frac{47,5}{0,40} = 119 \text{ t, } P_u = P_o + A = 119 + 25 = 144 \text{ t.}$$

$P_o$  ist gleichzeitig die Querkraft im eingespannten Teil des Riegels:  $Q_R = P_o = 119$  t.

$P_o$  wird in 7 Querschnitten durch 20 Nieten  $26 \phi$  von je 6,20 t Tragfähigkeit auf den Pfosten übertragen. Jeder Niet überträgt einen Momentenanteil von

$$\Delta M_o = \frac{119,0}{20} \cdot 0,20 = 1,19 \text{ tm.}$$

$P_u$  wird in 8 Querschnitten durch 24 Niete  $26 \phi$  übertragen

$$\Delta M_u = \frac{144,0}{24} \cdot 0,20 = 1,20 \text{ tm.}$$

Mit diesen Werten ist die  $M$ -Fläche für den Pfosten (Abb. 3) aufgetragen.

<sup>3)</sup> Vgl. G. Unold: Angenäherte und genaue Berechnung der Stahlskelettrahmen. „Der Stahlbau“ 1931, Heft 9.

### Nachweis der Spannungen.

Pfosten. Die größte Beanspruchung tritt im Schnitt  $a-a$  auf:

$$M_{a-a} = 15,0 \text{ tm, Profil: } \square \square 38.$$

$$\max \sigma = \frac{M_{a-a}}{W} + \omega \cdot \frac{N_u}{F} = \frac{1500}{2 \cdot 826} + 1,07 \cdot \frac{600}{159,4} = 1,31 \text{ t/cm}^2.$$

Nietabzug ist nicht erforderlich, da in der Zugzone keine Bohrungen vorhanden sind.

Riegel. Hier ist zu beachten, daß außer  $M'$  noch die Querkraft  $Q_R$  erheblichen Einfluß auf die Größe der Spannungen hat. Für den Grundquerschnitt I 55 würden sich infolge der hohen Schubspannungen (1,34 t/cm<sup>2</sup>) reduzierte Spannungen ergeben, welche die zulässigen weit überschreiten. Deshalb wird eine Verstärkung des Querschnittes erforderlich. Sie muß unter besonderer Beachtung der Schubspannungen vorgenommen werden, da nur mit der Verringerung von  $\tau$  auch eine wesentliche Verringerung von  $\sigma_{red}$  erreicht wird. Weiter machen die Bohrungen in den Querschnitten rechts und links von  $b-b$  eine Vergrößerung des Widerstandsmomentes notwendig. Abb. 4 zeigt den verstärkten Querschnitt.

### Statische Werte des Querschnittes.

$$J_x = 140\,000 \text{ cm}^4 \quad J_{x_n} = 114\,000 \text{ cm}^4$$

$$W_x = 5100 \text{ cm}^3 \quad W_{x_n} = 4150 \text{ cm}^3 \quad F = 345 \text{ cm}^2$$

$$S_x = 3180 \text{ cm}^3 \text{ (statisches Moment des halben Querschnittes, bezogen auf die Nulllinie)}$$

$$S = 2530 \text{ cm}^3 \text{ (statisches Moment der schraffierten Querschnittteile, bezogen auf die Nulllinie).}$$

Nach der Verstärkung erhält man im Schnitt  $b-b$  folgende Beanspruchungen (Abb. 3 u. 4):

in der äußersten Faser aus  $M'$

$$\sigma = \frac{4750}{5100} = 0,93 \text{ t/cm}^2,$$

in der neutralen Faser aus  $Q_R$

$$\max \tau = \frac{119,0}{1,9 + 2 \cdot 0,8} \cdot \frac{3180}{140\,000} = 0,775 \text{ t/cm}^2.$$

Für die Ermittlung der reduzierten Spannung kommt jetzt der Schnitt I-I (Abb. 4), welcher durch den Nietriß geht, in Frage, da die gesamten Schubkräfte des Flansches einschl. der Beiwinkel hier auf den verstärkten Steg wirken. Mit

$$\sigma = 0,93 \cdot \frac{19,3}{27,5} = 0,65 \text{ t/cm}^2$$

und  $\tau = 0,775 \cdot \frac{2530}{3180} = 0,62 \text{ t/cm}^2$

erhält man  $\sigma_{red} = 0,35 \cdot 0,65 + 0,65 \sqrt{4 \cdot 0,62^2 + 0,65^2} = 1,14 \text{ t/cm}^2$ .

In dem durch die Bohrungen geschwächten Querschnitt  $b'-b'$  (Abb. 4) ist mit

$$M = 52,5 - 25,0 \cdot (0,19 + 0,02 + 0,04) \cong 46,3 \text{ tm}$$

$$\sigma = \frac{4630}{4150} = 1,15 \text{ t/cm}^2.$$

Die hier wirkende Querkraft von  $Q_A = A = 25,0$  t überschreitet nicht die normale Grenze, und es ist daher nicht erforderlich, die Schubspannungen und die reduzierten Spannungen besonders nachzuweisen.

Weiter wäre der durch Flansch- und Stegbohrungen geschwächte Querschnitt  $b''-b''$  zu untersuchen. Die Schubspannung  $\tau$  hat hier den gleichen Wert wie im Schnitt  $b-b$ , da die Querkraft  $Q_R$  in dem Trägerstück links von  $b-b$  konstant ist. Mit  $M = 119,0 (0,40 - 0,05) = 41,5$  tm ist

$$\sigma = \frac{4150}{4150} = 1,00 \text{ t/cm}^2.$$

Weiter erhält man mit  $\sigma = 1,00 \cdot \frac{19,3}{27,5} = 0,70 \text{ t/cm}^2$  und  $\tau = 0,62 \text{ t/cm}^2$

$$\sigma_{red} = 0,35 \cdot 0,70 + 0,65 \sqrt{4 \cdot 0,62^2 + 0,70^2} = 1,17 \text{ t/cm}^2.$$

Die vorstehend ermittelten Spannungen gelten für den Schnitt I-I, der in der oberen Querschnittshälfte liegt. Für den symmetrisch liegenden Schnitt II-II der unteren Querschnittshälfte ist bei der Spannungsermittlung die Wirkung des Auflagerdruckes  $P_u$  zu berücksichtigen. Unter der Annahme, daß  $P_u$  sich von der Auflagerfläche aus bis zum Schnitt II-II nach jeder Seite unter einem Winkel von 45° ausbreitet, und wenn man von der ungleichmäßigen Kraftverteilung durch die Niete absieht, erhält man als Druckspannung im Schnitt II-II (Abb. 4)

$$\sigma_y = \frac{144,0}{(1,9 + 2 \cdot 0,8) 23,0} = 1,79 \text{ t/cm}^2$$

und hiermit

$$\sigma_{red} = 0,35(-0,93 - 1,79) \pm 0,65 \sqrt{4 \cdot 0,62^2 + (-0,93 + 1,79)^2} = -1,93 \text{ t/cm}^2.$$

Eine Verringerung der reduzierten Spannung wäre durch den Einbau von unten eingepaßten Aussteifungswinkeln zu erreichen, jedoch kann hier dieser Spannungswert als zulässig angesehen werden, da es sich um eine rein örtliche Überbeanspruchung handelt, d. h. das engbegrenzte Gebiet



hoher Materialbeanspruchung wird von geringer beanspruchtem Material umlagert, welches ein Ausweichen verhindert, da alle Spannungen negatives Vorzeichen haben.

In der untersten Faser ist  $\tau = 0$ . Die Pressung aus  $P_u$  beträgt

$$p = \frac{144,0}{6,5 \cdot 20,0} = 1,11 \text{ t/cm}^2.$$

Mit  $\sigma_x = -0,93 \text{ t/cm}^2$ ,  $\sigma_y = (p) = -1,11 \text{ t/cm}^2$  und  $\tau = 0$  ist  $\sigma_{red} = 0,35(-0,93 - 1,11) \pm 0,65(-0,93 + 1,11) = -0,83 \text{ t/cm}^2$ .

Die reduzierte Spannung ist hier kleiner als die Spannungen  $\sigma_x$  und  $\sigma_y$ . Diese Tatsache ist dadurch zu erklären, daß die aus  $\sigma_y$  resultierende Querdehnung die Hauptdehnung aus der Druckspannung  $\sigma_x$  verringert.

Die Stegglaschen 450 · 8 und die Verstärkungswinkel 80 · 80 · 10 sind nach rechts soweit über den Schnitt  $b-b$  hinaus weiterzuführen, bis die in ihnen herrschenden Spannkkräfte durch die Niete auf das Grundprofil des Riegels, I 55, übertragen sind.

Die Verstärkung des Trägerteiles genügt somit in allen Punkten.

**II. Rahmenecke nach Abb. 6.**

In baulicher Hinsicht entspricht die Konstruktion dem ersten Beispiel. Statisch ist der Unterschied zu beachten, daß das Einspannmoment  $M'$  in ein Kräftepaar mit den waagerechten Kräften  $H_o$  und  $H_u$  aufgelöst ist, was durch die verhältnismäßig große Höhe des Trägerquerschnittes im

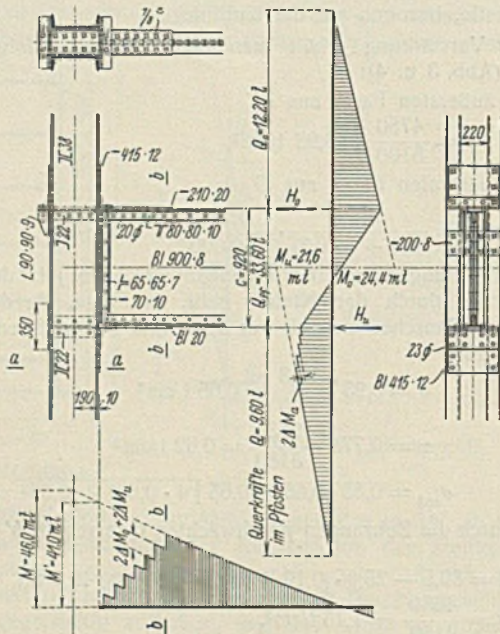


Abb. 6. Steifknoten 2.

Vergleich zu der des Stützenprofils bedingt wurde. Der Träger ist durch die obere Zuglasche und das untere Druckblech mit der Stütze biegungsfest verbunden. Um eine bequeme Montage zu ermöglichen, wurde der Träger nicht in die Stütze hineingeführt. Aus dem gleichen Grunde wurde auch die beiderseitige Verschraubung der Zuglasche sowie der Bindebleche oberhalb des Trägeranschlusses vorgesehen. Erforderlichenfalls sind zwischen dem unteren Druckblech und der Stütze Paßstücke einzuschleiben, die in ihrer endgültigen Lage zweckmäßig durch Verschweißung festgehalten werden.

Auf den Einfluß der seitlichen Trägersauflagerung auf die Momentenfläche des Pfostens sei besonders hingewiesen. Im ersten Beispiel trat er wegen der Vereinnigung von  $A$  in  $P_u$  nicht hervor.

Auch hier sind die Werte  $M$ ,  $M_o$ ,  $M_u$  usw. einer besonderen statischen Berechnung entnommen. Die Verschiedenheit dieser Werte gegenüber denen des ersten Berechnungsbeispiels, trotz gleicher Belastungsannahmen, ergibt sich aus dem veränderten Steifigkeitsverhältnis zwischen Riegel und Pfosten.

**2. Berechnungsbeispiel.**

Eckmoment:  $M = 46,0 \text{ tm}$     $M_o = 24,4 \text{ tm}$     $M_u = 21,6 \text{ tm}$   
 $x = 2,15 \text{ m}$     $y_o = 2,0 \text{ m}$     $y_u = 2,25 \text{ m}$   
 $A = 25,0 \text{ t}$     $N_u = N_o + A = 35,0 + 25,0 = 60,0 \text{ t}$   
 $Q_o = \frac{24,4}{2,0} = 12,20 \text{ t}$     $Q_u = \frac{21,6}{2,25} = 9,60 \text{ t}$   
 $N = Q_o - Q_u = 12,20 - 9,60 = + 2,60 \text{ t}$   
 $c = 0,90 + 2 \cdot \frac{0,02}{2} = 0,92 \text{ m}.$

Einspannmoment:  $M' = 46,0 - 25,0 \cdot \left( \frac{0,38}{2} + 0,01 \right) = 41,0 \text{ tm}$

$$H_o = H_u = \frac{M'}{c} = \frac{41,0}{0,92} = \pm 44,5 \text{ t}.$$

Die Querkraft im Pfosten zwischen den Angriffspunkten von  $H_o$  und  $H_u$  ist

$$Q_{Pf} = Q_o - H_o - \frac{N}{2} = 12,20 - 44,50 - \frac{2,60}{2} = - 33,6 \text{ t}.$$

Die Kraft  $H_o + \frac{N}{2}$  wird durch eine Zuglasche  $-210 \cdot 20$  auf den Pfosten übertragen, während  $H_u - \frac{N}{2}$  durch das Druckblech von 20 mm Stärke auf den Pfosten wirkt. Der Auflagerdruck  $A$  wird dicht vor dem Pfosten auf das Übertragungsblech und den Auflagerwinkel abgesetzt. Die Zuglasche ist mit dem Träger durch 14 einschnittige und mit dem Pfosten durch 10 einschnittige und 2 zweisechnittige Schrauben  $\frac{7}{8}'' \phi$  mit je 3,62 t bzw. 7,24 t Tragfähigkeit verbunden. Das Druckblech zur Aufnahme von  $H_u - \frac{N}{2}$  ist mit 12 Nieten  $20 \phi$  am Träger angeschlossen.

Für die Darstellung der Momentenfläche des Trägers ist der Einfachheit wegen angenommen, daß  $H_u$  sowohl wie auch  $H_o$  gleichmäßig in 7 Querschnitten auf den Träger übertragen wird. In jedem Querschnitt sind oben und unten je 2 Anschlußelemente (Nieten bzw. Schrauben) vorhanden.

$$\Delta M_o = \Delta M_u = \frac{44,5 \cdot 0,92}{7 \cdot 2} = 1,462 \text{ tm}.$$

In einem Querschnitt wird somit übertragen:

$$2 \Delta M_o + 2 \Delta M_u = 4 \cdot 1,462 = 5,85 \text{ tm}.$$

Hiermit ist die Momentenfläche des Trägers in Abb. 6 aufgetragen.

Für die Auftragung der Momentenfläche des Pfostens wurden folgende Werte benutzt:

Querkraft oberhalb  $H_o$ :  $Q_o = 12,20 \text{ t}$   
 unterhalb  $H_u$ :  $Q_u = 9,60 \text{ t}$

Querkraft zwischen  $H_u$  und  $H_o$ :  $Q_{Pf} = 33,6 \text{ t}.$

Die seitlich angreifende Auflagerkraft  $A$  wird in 4 Querschnitten durch 8 Niete  $23 \phi$  auf den Pfosten übertragen. Jeder Niet überträgt einen Momentenanteil von

$$\Delta M_A = \frac{25,0}{8} \cdot 0,20 = 0,625 \text{ tm}.$$

**Nachweis der Spannungen.**

Die größte Beanspruchung erleidet der Pfosten,  $\square \square 38$ , im Schnitt  $a-a$ . Wegen des Fehlens der Bohrungen in der Zugzone ist auch hier die Berücksichtigung des Nietabzuges nicht erforderlich.

$$\max \sigma = \frac{M_{a-a}}{W} + \omega \cdot \frac{N_u}{F} = \frac{1420}{1652} + 1,07 \cdot \frac{60,0}{159,4} = 1,26 \text{ t/cm}^2.$$

Der Nachweis der Schubspannungen aus der Querkraft  $Q_{Pf}$  erübrigt sich aus dem gleichen Grunde, der im Beispiel 1 für  $Q$  genannt wurde.

Im Schnitt  $b-b$  des Riegels tritt nachstehende Beanspruchung auf (Blechträger, bei Abzug der Flanschbohrungen:  $W = 2960 \text{ cm}^3$ )

$$\sigma = \frac{M_{b-b}}{W} = \frac{2850}{2960} = 0,97 \text{ t/cm}^2.$$

In diesem Falle tritt jedoch die größte Beanspruchung des Riegels in Feldmitte auf. Das Feldmoment  $M_m = 42,0 \text{ tm}$  ergibt (Blechträger, bei Abzug der Halsbohrungen:  $W = 3030 \text{ cm}^3$ )

$$\max \sigma = \frac{M_m}{W} = \frac{4200}{3030} = 1,39 \text{ t/cm}^2$$

Spannung in der Zuglasche.

$$F_n = 21,0 \cdot 2,0 - 2 \cdot 2,3 \cdot 2,0 = 32,8 \text{ cm}^2$$

$$\sigma = \frac{H_o + \frac{N}{2}}{F_n} = \frac{44,5 + 1,3}{32,8} = 1,40 \text{ t/cm}^2.$$

Die Pressung zwischen dem unteren Druckblech und den Stegen der  $2 \square 22$ , welche etwa 2 mm über die Stützenkante hinausragen, beträgt:

$$p = \frac{H_u - \frac{N}{2}}{F} = \frac{44,5 - 1,3}{2 \cdot 22,0 \cdot 0,9} = 1,09 \text{ t/cm}^2.$$

Die  $\square \square 22$  sind entsprechend der darauf wirkenden Kraft  $H_u$  an den Pfosten angeschlossen.

Das  $-200 \cdot 8$  zwischen Pfosten und Riegel ist nur gegen Kippen des Blechträgers bei der Montage vorgesehen. (Schluß folgt.)

**INHALT:** Spannungszustand und Festigkeit von Stirnkehlnahtverbindungen. — Studie zur konstruktiven und wirtschaftlichen Gestaltung von Steifknoten.