

Berichte des Deutschen Ausschusses für Stahlbau

Ausgabe B

(Fortsetzung der vom Deutschen Stahlbau-Verband, Berlin, herausgegebenen Berichte
des früheren Ausschusses für Versuche im Stahlbau)

Heft 7

Über das Verhalten geschweißter Träger bei Dauerbeanspruchung unter besonderer Berücksichtigung der Schweißspannungen

Von

Prof. Dr.-Ing. G. Bierett

Staatliches Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem

Mit 31 Textabbildungen



Berlin

Verlag von Julius Springer

1937

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung
in fremde Sprachen, vorbehalten.

Copyright 1937 by Julius Springer in Berlin.

ISBN 978-3-7091-5266-9 ISBN 978-3-7091-5414-4 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-7091-5414-4

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
I. Vorliegende Aufgabe	1
A. Grundformen des geschweißten Trägers	1
B. Schema der maßgebenden Schweißspannungszustände	1
1. Maßgebende Schweißspannungen für die Trägergrundformen	1
2. Die Querspannungen der Stumpfnahht	2
3. Die Längsspannungen infolge einer Naht	2
4. Die Schrumpfspannungszustände bei sich kreuzenden Nähten	2
5. Schweißspannungen und Festigkeit	4
II. Untersuchungen über die Schweißspannungen und das Dauerfestigkeitsverhalten von Trägern	4
A. Übersicht über die Untersuchung	4
1. Die verschiedenen Versuchsreihen	4
2. Die Versuchsträger	5
a) Ausbildung der Träger	5
b) Werkstoff und Schweißdrähte	5
c) Schweißung	5
d) Bearbeitung der Versuchsstücke	7
B. Schweißspannungszustand und Dauerfestigkeitsverhalten	7
1. Versuchsdurchführung	7
2. Verhalten von Stumpfstoßen mit ungedeckten Nahtenden bei Biegung in der Nahtebene (Versuchsreihe 1)	7
a) Schweißspannungszustand	7
b) Dauerfestigkeitsverhalten	8
c) Einfluß der Nahtbeschaffenheit und von sonstigen Umständen auf die Dauerfestigkeit	10
3. Einfluß von Längsnähten in der Zugzone auf die Dauerfestigkeit von Trägern (Versuchsreihe 2—5)	13
a) Schweißspannungszustand	13
b) Dauerfestigkeitsverhalten	14
III. Zusammenfassung und Versuchsfolgerungen	20

Vorwort.

Noch im „Ausschuß für Versuche im Stahlbau“, dem Vorgänger des heutigen „Deutschen Ausschusses für Stahlbau“, wurde die Durchführung grundsätzlicher Versuche zur Erforschung der Dauerfestigkeit I- und T-förmiger geschweißter Träger mit und ohne Stegblechstumpfstoß beschlossen. Hierbei sollte möglichst auch Aufschluß über den Einfluß der Schweißspannungen auf die Dauerfestigkeit der Schweißverbindungen erzielt werden.

Die vorliegenden Ergebnisse haben zur Klärung wichtiger Einzelfragen beigetragen. Sie rechtfertigen das in die Widerstandsfähigkeit geschweißter Träger gesetzte Vertrauen; denn die gefundenen Dauerfestigkeiten geschweißter Träger lagen höher als diejenigen vergleichbarer genieteter Träger. Die Untersuchungen haben auch erkennen lassen, daß die Schweißspannungen die Dauerzug- und Dauerbiegefestigkeit unverspannt geschweißter Stumpfnähte sogar erhöhen, da sie an den Nahtenden, wo infolge Betriebsbeanspruchung Zugspannungen herrschen, Druckspannungen erzeugen. Ferner hat sich gezeigt, daß mitunter die Dauerfestigkeit geschweißter I-Träger mit Stegblechstumpfstoß nicht durch dessen Widerstandsfähigkeit sondern durch diejenige der Halsnähte begrenzt ist. Aus dieser Erkenntnis ergaben sich neue, der Beanspruchungsart der Halsnähte angepaßte Abnahmeversuche für Schweißdrähte. Schließlich bestätigten die Versuche auch den festigkeitserhöhenden Einfluß der Oberflächenbearbeitung hochbeanspruchter Nahtzonen.

Die Versuchsergebnisse bildeten einen wichtigen Beitrag für die abgeschlossene Neubearbeitung der „Vorläufigen Vorschriften für geschweißte vollwandige Eisenbahnbrücken“.

Dem Bearbeiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Bierett, und der Verlagsbuchhandlung Julius Springer gilt bei der Herausgabe des Berichtes unser besonderer Dank.

Deutscher Ausschuß für Stahlbau
S c h a p e r.

I. Vorliegende Aufgabe.

A. Grundformen der geschweißten Träger.

Die Grundform des geschweißten Trägers besteht aus Stegblech und beiderseitigen Gurtplatten, die miteinander durch längs durchlaufende Halsnähte verschweißt sind (Abb. 1 a). Bei kurzen Trägern können sowohl Gurtplatten wie auch das Stegblech ungestoßen durchgeführt werden. Die zur Verfügung stehenden Walzlängen der Bleche machen jedoch auch bereits bei mäßigen Längen die Anordnung eines Stegblechstoßes notwendig. Die Entwicklung hat allgemein dazu geführt, den Stegblechstoß als Stumpfstoß auszubilden. Als eine Grundform des geschweißten Trägers kann deshalb der Träger aus Stegblech mit Stegblechstumpfstoß und durchlaufenden ungestoßenen Gurtplatten angesehen werden (Abb. 1 b).

Bei längeren Trägern größerer Querschnittsabmessungen ist zwar bei den heutigen Walzmöglichkeiten die Durchführung der Gurtplatten ohne Stoß auf große Längen möglich. Zur Anpassung der Gurtplattendicke an den Momentenverlauf zur Gewichtsersparung und zur Vermeidung zu großer Blockgewichte, die beim Walzen schwerer und langer Gurtprofile notwendig sind, ist die Anordnung von Gurtplattenstößen zweckmäßig (Abb. 1 c). Die Herstellung der Stöße in der Werkstatt kann in der Regel so vorgenommen werden, daß zuerst die Stöße des Stegbleches und die Stöße der Gurtplatten hergestellt werden und zuletzt das Stegblech mit den Gurtplatten in Montagelängen durch die Halsnähte verbunden wird. Sowohl bei Herstellung der Stegblechstöße wie auch der Gurtstöße liegt in diesem Fall keine äußere Einspannwirkung vor, die eine verbleibende Schrumpfkraft (zu unterscheiden von Schrumpfspannungen) in den später zusammensetzenden Konstruktionselementen hervorrufen könnte. Derartige Verbindungen der Trägerelemente mit Stumpfstoßen sind bei guter Schweißarbeit und nachträglicher Veredelung durch Bearbeitung einer Nietverbindung der spezifischen Festigkeit nach mindestens gleichwertig, der absoluten Festigkeit nach überlegen (fehlende Nietlöcher). Der so hergestellte Träger aus Stegblech mit Stegblechstumpfstoß und Gurtplatten mit Gurtplattenstumpfstoßen ist ebenfalls eine Grundform, die wegen ihrer großen Vollkommenheit in die Betrachtung einbezogen wird.

Bei dem ganzen folgenden Bericht ist also zu beachten, daß es sich immer um Träger handelt, bei denen die Stumpfstoße der Trägerelemente zuerst hergestellt sind und die verschweißten Stegbleche mit den Gurtplatten, bei denen gegebenenfalls ebenfalls ein Stoß vorhanden ist, hinterher durch Halsnähte verschweißt sind. Die Verhältnisse der Baustellen-schweißung, bei der Gurtstoß oder Stegblechstoß oder beide nicht ohne Einspannwirkung hergestellt werden können, werden nicht berührt.

Bei dem ganzen folgenden Bericht ist also zu beachten, daß es sich immer um Träger handelt, bei denen die Stumpfstoße der Trägerelemente zuerst hergestellt sind und die verschweißten Stegbleche mit den Gurtplatten, bei denen gegebenenfalls ebenfalls ein Stoß vorhanden ist, hinterher durch Halsnähte verschweißt sind. Die Verhältnisse der Baustellen-schweißung, bei der Gurtstoß oder Stegblechstoß oder beide nicht ohne Einspannwirkung hergestellt werden können, werden nicht berührt.

B. Schema der maßgebenden Schweißspannungszustände.

1. Maßgebende Schweißspannungen für die Trägergrundformen.

Als besonders wesentlich sind zunächst die Spannungen aus dem Schweißvorgang anzusehen, deren Richtung mit den Richtungen der Maximalbeanspruchungen aus der Belastung zusammenfällt. Bei Dauerbeanspruchung sind maßgeblich vor allem die Spannungen, die im

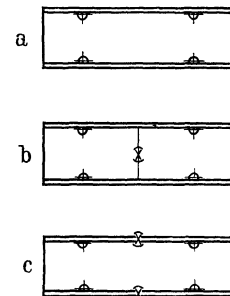


Abb. 1. Grundformen des geschweißten Trägers.

Bereich größerer Zugspannungen aus der Betriebsbelastung auftreten. Die Betrachtung erstreckt sich im folgenden nur auf diese Spannungen, also auf die in der Trägerlängsrichtung auftretenden Schweißspannungen, die durch die Halsnähte verursacht werden, auf die in gleicher Richtung wirkenden Spannungen senkrecht zu den Stumpfnähten und auf die gleichgerichteten Schweißspannungen in den Kreuzungsstellen der Längsnähte und der Stoßnähte.

2. Die Querspannungen der Stumpfnahht.

Über diesen Schweißspannungszustand liegen die eingehendsten Untersuchungen vor. Bei nicht zu großen Nahtlängen (kleiner als etwa 600 mm, eine genaue Grenze kann nicht angegeben werden) kann bei jedem Herstellungsvorgehen durchlaufend, von den Enden nach innen, von der Mitte nach außen oder bei schrittweisem Vorgehen mit großen Druckvorspannungen an den Enden gerechnet werden (Abb. 2a). Für die Regelbreiten der Gurtplatten besteht somit immer Gewähr, daß die Nahtenden durch hohe Druckvorspannungen gesichert sind. Auch bei den noch längeren Stumpfnähten der Stegbleche kann ein Spannungszustand mit hohen Druckvorspannungen an beiden Nahtenden mit Sicherheit dadurch erreicht werden, daß die Nähte von beiden Enden nach innen geschweißt werden oder die Pilgerschrittschweißung angewendet wird (Abb. 2b). (Bei anderem Vorgehen treten wohl meistens auch Druckvorspannungen an den Nahtenden auf, ohne daß jedoch ihr Vorhandensein so sicher ist wie bei der genannten Schweißfolge.)

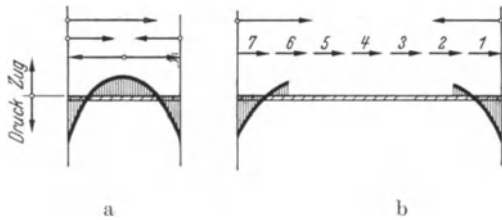


Abb. 2. Querschweißspannungen der Stumpfnahht.

Die Querspannungen bei freier Schweißung sind im wesentlichen eine Folge der behinderten Schrumpfung in Nahtichtung. Diese Tatsache ist von Bedeutung für die Ausbildung der Schrumpfspannungszustände bei sich kreuzenden Nähten (Absatz 4), die im Trägerbau und auch sonst so häufig auftreten. (Beispiel: Halsnähte und Stoßnähte.)

3. Die Längsspannungen infolge einer Naht.

Die Nahtzonen sind immer Bereiche hoher Zugspannungen parallel zur Nahtichtung; diese Zugspannungen rufen außerhalb der Nahtzonen Druckspannungen hervor. Die Grundfälle zeigt Abb. 3a bis c. Die Darstellungen geben die Spannungsverhältnisse schematisch wieder und zwar die vorherrschende Spannungsrichtung und etwa das Verhältnis der Größenordnung von Zug- und Druckspannungen zueinander. Der genaue Verlauf hängt stark von den jeweiligen Verhältnissen ab, also von Abmessungen und Schweißbedingungen. Beispielsweise kann in Abb. 3a der Größtwert der Druckspannungen bei schmalen Platten unmittelbar an den Plattenkanten liegen.

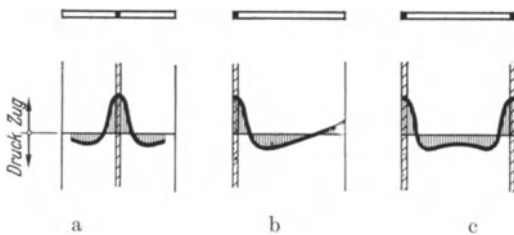


Abb. 3. Längsschweißspannungen infolge von Längsnähten.

4. Die Schrumpfspannungszustände bei sich kreuzenden Nähten.

Untersuchungen hierüber liegen bisher nicht vor. Einige experimentelle Feststellungen, die hierzu bei der vorliegenden Untersuchung gemacht worden sind, werden im folgenden Kapitel behandelt, das die Untersuchungen umfaßt. Für die Aufstellung des Versuchsprogramms war eine allgemeine Klarstellung der zu erwartenden Spannungszustände unumgänglich, soweit diese sich nach sonstigen Erkenntnissen damals übersehen ließen.

Die praktisch wichtigsten Fälle sind in Abb. 4a und c schematisch wiedergegeben. Der Fall in 4a entspricht dem Gurtstoß mit kreuzender Halsnahht, der Fall in 4c dem Stegblechstoß mit kreuzenden Halsnähten. Der in Abb. 4b dargestellte Fall mit einseitiger Längsnahht kann allgemeine praktische Bedeutung gewinnen bei Fortschreiten der Schweißtechnik bei geschweißten Stößen großer T-Profile. (Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen

berechtigten wohl dazu, diesen für den Fachwerkbau wichtigen Konstruktionsfall nicht in den Bereich des auch in Zukunft praktisch Unzulänglichen zu verweisen.) In die durchzuführende Untersuchung mußte dieser Fall einbezogen werden, weil die Auswirkung großer Druckvorspannungen an den Nahtenden von Stumpfnähten bei wechselnden oder schwellenden Biegemomenten nur durch Untersuchung eines im Steg stumpfgestoßenen T-Profiles auf Biegung festgestellt werden konnte. Die Ergebnisse der Untersuchung dieser Form haben also, getrennt von dem Einzelfall, besondere Bedeutung für das Verhalten von Gurtstößen, die infolge exzentrischer Kraftwirkung zusätzlich mehr oder weniger noch auf Biegung beansprucht werden.

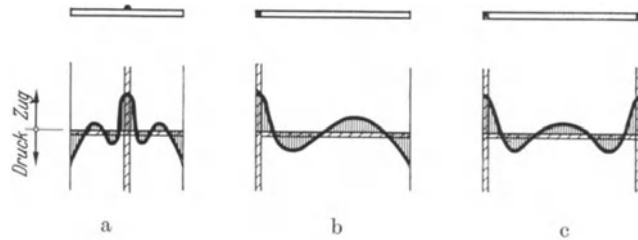


Abb. 4. Schweißspannungen bei sich kreuzenden Nähten.

Die Spannungszustände sind grundsätzlich bedingt durch die Einzelspannungszustände der Abb. 2 und 3. Sie können aber nicht etwa durch Superposition der Einzelspannungszustände gewonnen werden. Durch die an zweiter Stelle gelegten Nähte — in den hier zur Erörterung stehenden Konstruktionen also immer der Halsnähte, die die Stoßnähte kreuzen — wird die bereits vorhandene Naht örtlich an der Kreuzungsstelle aufgeschmolzen, die vorhandenen Spannungen örtlich aufgehoben, um sich in anderer Art wieder zu bilden; in größerer Entfernung von der Kreuzung wird der vorhandene Spannungszustand mehr oder weniger gestört, einmal durch die Anschmelzung einer im Spannungsfeld befindlichen Zone, zweitens durch die Reaktionsspannungsbildung infolge der sich nun neu bildenden Schweißspannungen in den Zonen der zuletzt gelegten Nähte. Die Verhältnisse sind sehr verwickelt, es läßt sich aber folgendes übersehen:

Die Querspannungen der Stumpfnähte sind hauptsächlich eine Folge der behinderten Schrumpfung dieser Nähte in Nahrichtung (s. Absatz 2), die in der Stoßnaht vorhandenen Schrumpfspannungen in Nahrichtung sind als Erzeugende des Spannungsfeldes anzusehen. Da bei der Aufschmelzung eines kleinen Teils durch die Halsnaht die die Querspannungen erzeugenden Längsspannungen der Stumpfnaht nur in einem kleinen Gebiet gestört werden, wird auch der Querspannungszustand in einiger und größerer Entfernung nur wenig gestört. Außerhalb der Kreuzungszone wird man also den verbleibenden Spannungszustand etwa durch Superposition der Reaktionsspannungen der Einzelwirkungen erhalten, soweit nicht die Spannungen so groß werden, daß ein Spannungsausgleich durch Fließen eintritt. Das ist z.B. wahrscheinlich bei den großen Kantendruckspannungen der Stumpfnaht.

An der Kreuzungsstelle wird die zuletzt gelegte Naht für Spannungsrichtung und Spannungsgröße von überwiegendem Einfluß sein. Hier wird sich demnach quer zur Stumpfnaht, das ist gleich längs zur Halsnaht eine Zugspannung ausbilden, gleichgültig ob anfänglich eine Zugspannung oder eine große Druckspannung wie an den Stumpfnahtenden vorhanden gewesen ist. Ob mit einem Einfluß einer solchen großen, anfänglichen Druckspannung auf die Größe der später verbleibenden Zugspannung zu rechnen ist, ist ohne Versuche nicht zu übersehen (s. Kapitel II, B. 3). Auf Grund dieser Überlegungen ergaben sich die Schema der Spannungszustände in den Abb. 4a bis c. Der Zustand der Abb. 4a ist entstanden (nicht durch Superposition) aus dem Schema der Abb. 2 und 3a. Der Zustand in Abb. 4b aus dem Schema der Abb. 2 und 3b und der Zustand in Abb. 4c aus Abb. 2 und 3c. Es läßt sich natürlich nicht übersehen, ob z. B. in der Mitte der Abb. 4c eine kleine Zugspannung oder eine kleine Druckspannung verbleibt; das wird von den jeweiligen Verhältnissen abhängen und ist im übrigen für die Festigkeitsfrage unerheblich.

Den gegebenen schematischen Spannungsbildern sind folgende für den Träger praktisch wichtige Feststellungen zu entnehmen.

Bei ungestoßenen Gurtplatten und Stegblech (Abb. 3c) sind die Nahtzonen durch hohe Zugspannungen in der Längsrichtung stark vorbeanspruchte. Das gleiche gilt bei anwesendem Gurtstoß (Abb. 4a) und Stegstoß (Abb. 4c). Die Gurtplattenstöße sind an den Nahtenden durch hohe Druckspannungen gesichert, an der Kreuzung mit den Halsnähten durch hohe Zug-

spannungen gefährdet (Abb. 4a). Die Stegstoßnaht ist durch Zugspannungen an den Enden gefährdet (Abb. 4c).

5. Schweißspannungen und Festigkeit.

Hieraus ergeben sich nachstehende Fragen hinsichtlich des Festigkeitsverhaltens:

- Bedeutet hohe Druckvorspannungen an den Nahtenden von Gurtstößen eine wesentliche Sicherung der Nähte?
- Sind die hohen Längszugspannungen in den Halsnähten von Trägern von stark abminderndem Einfluß auf die Festigkeit?
- Wie liegen die Festigkeitsverhältnisse an den Kreuzungsstellen der quer liegenden Stumpfnahte mit den längsverlaufenden Halsnähten?

II. Untersuchungen über die Schweißspannungen und das Dauerfestigkeitsverhalten von Trägern.

A. Übersicht über die Untersuchung.

1. Die verschiedenen Versuchsreihen.

Innere Spannungen sind bei geeigneten Werkstoffen im allgemeinen ohne praktisch wesentlichen Einfluß auf die statische Festigkeit. (Eine gewisse Einschränkung muß vielleicht betreffs des Einflusses auf die Stabilität gemacht werden.) Deshalb konnte nureine Untersuchung auf Dauerfestigkeit Antwort auf die gestellten Fragen geben. Die Bedeutung des Trägers für den Brückenbau und für andere Stahlkonstruktionen, in denen mit häufig wechselnden Belastungen zu rechnen ist, verwies ohnehin darauf, Dauerversuche vorzunehmen.

Zur Klärung der vorher entwickelten Fragen wurden die in Abb. 5 dargestellten Probekörper untersucht.

Die Probekörper der Reihe 1 dienen dem Studium des Verhaltens von Stumpfstoßen mit ungedeckten Nahtenden bei Biegung in der Nahtenebene. Die Versuche geben Auskunft über die Auswirkung der Druckvorspannungen an den Nahtenden; die Ergebnisse haben somit unabhängige Bedeutung für die Beurteilung von Stumpfstoßen, insbesondere auch für Gurtstöße, die nicht gut mittig beansprucht werden. Wie bereits in Abschnitt I, B. 4 gesagt, verdienen die Ergebnisse auch Beachtung für den T-Stab unter Zug und Biegemomenten

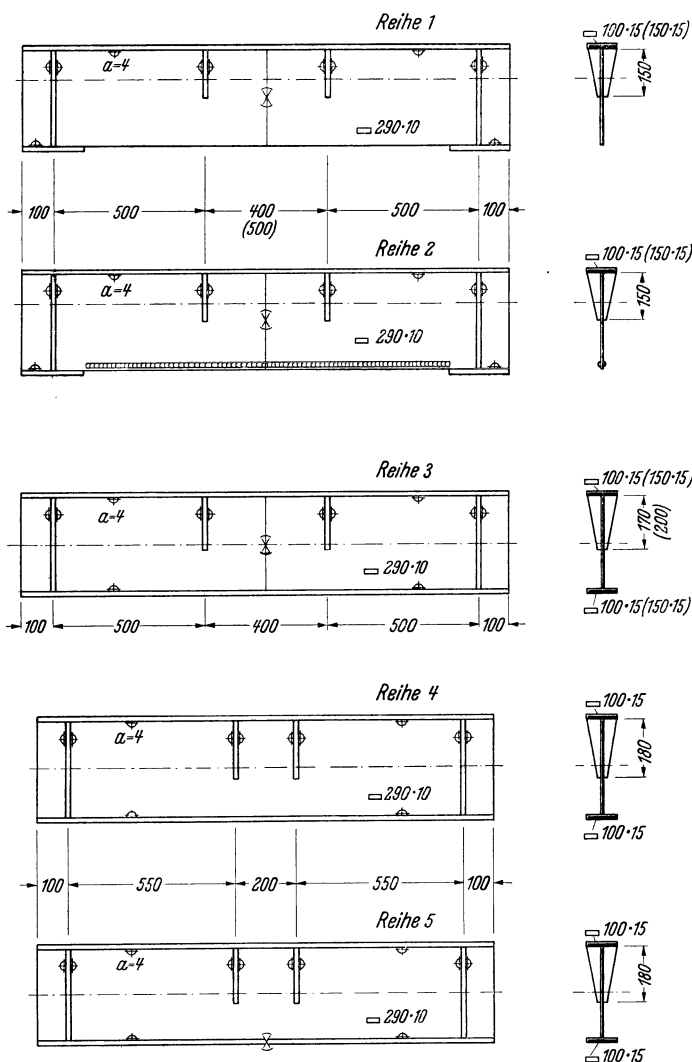


Abb. 5. Probeträger für Dauerbiegeversuche.

(Nebenspannungen). Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe ermöglichen im Vergleich zu den Ergebnissen der Reihen 2 und 3 besonders eine Aussage über die Auswirkung der Schweißspannungen für die Festigkeit.

Die Probekörper der Reihe 3 entsprechen dem normalen Träger mit Stegstumpfstoß. Im Gegensatz zur Reihe 1 sind hier große Schrumpfungsspannungen in der Zugzone vorhanden. Die Reihe 2 mit aufgelegten Längsraupen in der Zugzone entspricht den Schweißspannungsverhältnissen nach grundsätzlich der Reihe 3, der äußeren Ausbildung nach der Reihe 1. Die beiden mit dieser Studienprobe unternommenen Versuche gaben das klarste Bild über die Wirkung der Längsnähte.

Die Reihen 4 und 5 waren bei der Aufstellung des Versuchsprogramms nicht vorgesehen. Die Reihe 4, bei der weder Steg noch Gurt gestoßen sind, wurde mit Rücksicht auf die Feststellungen bei der Reihe 2 und 3 über die Wirkung der Längsnähte aufgenommen. Die Reihe 5 ist eine Ergänzungsreihe mit Gurtstoß, bei der nur zwei Versuche durchgeführt wurden.

2. Die Versuchsträger.

a) Ausbildung der Träger. Die Größe der Träger war gegeben durch die Leistung der Pulsatormaschine hinsichtlich Kraft und Schwinghub. Zur Zeit der Versuchsdurchführung war es nicht möglich, größere Träger im Dauerversuch zu prüfen, während heute im Staatlichen Materialprüfungsamt Berlin-Dahlem hierfür eine durch einen Schwinger betriebene Trägerversuchsanlage zur Verfügung steht, mit der wesentlich größere Träger untersucht werden können. Die Träger der Reihen 1 und 2 hätten an sich größer ausgebildet werden können, wovon naturgemäß mit Rücksicht auf die Abmessungen in Reihe 3—5 abgesehen wurde.

Die zuerst hergestellten Träger hatten Gurtplatten 150 · 15 mm. Wegen unerwarteter Schwierigkeiten bei der Untersuchung der ersten Träger der Reihe 3 wurden die Gurtplatten der vorhandenen Träger dieser Reihe im mittleren Teil auf 100 mm Breite gemäß Abb. 25 ausgekehlt und sämtliche später hergestellten Träger mit 100 mm breiten Gurtplatten hergestellt.

Für die Gurtplatten wurden einfache Breitstähle gewählt. Die aus Blechen geschnittenen Stege wurden ohne Zuschärfung der Kanten mit den Gurtplatten verschweißt. Diese Ausbildung wurde durch den Berichtersteller vorgeschlagen in der Erwägung, daß die Schweißfuge zwischen Steg und Gurtplatte bei der Beanspruchung eines Trägers unbedenklich ist und daß Sonderprofile erst bei größeren Abmessungen ihre Bedeutung mit Rücksicht auf die Schrumpfwirkungen gewinnen.

Die Versteifungen unter den Lastangriffspunkten wurden zur Vermeidung von Anbrüchen nur bis kurz unter die neutrale Faser herabgeführt. Es handelt sich hier nur um eine Maßnahme aus versuchstechnischen Gründen, weil im Versuch in der Regel gegenüber praktischen Verhältnissen unverhältnismäßig große Einzellasten übertragen werden müssen.

b) Werkstoff und Schweißdrähte. Als Werkstoff wurde durchweg Stahl 37.12 gewählt. Die Träger wurden mit verschiedenen Manteldrähten und einem Seelendraht geschweißt. Einen großen Teil der Träger stellte die Brückenbauanstalt J. Dörnen, Dortmund-Derne, kostenlos her. Aus grundsätzlichen Erwägungen wurde ein größerer Teil der Träger von den Schweißdraht erzeugenden Firmen geschweißt. Eine Übersicht über Hersteller und die verschiedenen verwendeten Drähte gibt die Zusammenstellung 1.

Die mechanischen Eigenschaften des Schweißgutes der verschiedenen Drähte sind in Zusammenstellung 2 gegeben.

Die Schweißung wird zwar durch diese Angaben nicht genügend gekennzeichnet. Es erwies sich aber durch die Untersuchung, daß auch größere Unterschiede in dieser Hinsicht sich für die Festigkeit von Konstruktionsteilen nicht deutlich ausprägen, sofern Qualitätsdrähte gemäß DIN 1913 oder gemäß den Lieferungsbedingungen der Deutschen Reichsbahn verwendet werden.

c) Schweißung. Bei allen Trägern mit Stumpfstoßen wurden zunächst diese hergestellt und darauf Steg und Gurtplatten verschweißt. In dem Bestreben, jedem Hersteller die Möglichkeit zu geben, die nach seinem Ermessen nach der Art des Drahtes und den Betriebs-

Zusammenstellung 1. Übersicht über die untersuchten Träger.

Lfd. Nr.	Reihe	Hersteller	Träger Nr.	Schweißdraht		Herstellung im
				Stumpfstoß	Kehlnähte bzw. Längsraupen im Zuggurt	
1 bis 8	1	Brückenbauanstalt J. Dörnen	A 11, A 12 B 13, B 14 B 15, B 16 B 17, B 18	a	—	} Oktober 1934 } Februar 1935
9 bis 12			Schweißdraht-firma X	K 11, K 12 F 11, F 12	c d	
13 bis 15	2	J. Dörnen	A 21, A 22, A 23	a	a	Oktober 1934
16 bis 19	3	J. Dörnen	A 31, A 32 B 33, B 34	a	a	Oktober 1934 Februar 1935
20 bis 23	4	Schweißdraht-firma Y	C 1, C 2 C 3, C 4	—	a a	April 1935
24 bis 25		Schweißdraht-firma Z	D 1, D 2	—	e	August 1935
26 bis 27	5	Schweißdraht-firma Y	C 5, C 6	a	a	April 1935

Zusammenstellung 2. Mechanische Eigenschaften des Schweißgutes (nach Angaben der Drahtfirmen).

Draht	Art des Schweißdrahtes	Streckgrenze kg/mm ²	Zugfestigkeit kg/mm ²	Dehnung (l = 5d) %	Kerbzähigkeit mkg/cm ²
a	Manteldraht	36—40	48—52	26—30	9—12
b	„	32—36	44—48	22—25	7—10
c	Seelendraht	nicht angegeben	48—54	18—25	5—8
d	Manteldraht	„	50—56	18—26	8—11
e	„	38—41	48—52	24—28	8—11

gepflogenheiten günstigsten Verfahren anzuwenden, wurde davon abgesehen, die Schweißbedingungen im einzelnen vorzuschreiben. Es wurden nur folgende Bedingungen gestellt:

Stumpfstöße als X-Stöße, beste Wurzelverschweißung, ohne daß Drahtdurchmesser, Wurzelabstand und Öffnungswinkel vorgeschrieben waren. Wurzellagen mit beliebigem Schweißweg, sämtliche anderen Lagen durchlaufend in der gleichen Richtung zur Herstellung gleicher Bedingungen für die Schweißspannungen.

Bei den Kehlnähten war nur gute Wurzelverschweißung gefordert, eine besondere Vor-schweißbedingung war nicht gestellt. Die meisten Kehlnähte wurden mit Drähten 4 mm \varnothing in einer Lage geschweißt, die Träger 24 und 25 in zwei Lagen mit 3 und 4 mm-Drähten, die Träger 20 bis 23 und 26 bis 27 in einer Lage mit 5 mm-Drähten. Gute Wurzelverschweißung wurde in allen Fällen erreicht. Außerdem war gefordert, daß die Kehlnähte, soweit sie Stumpfnähte kreuzten, so hergestellt wurden, daß etwa eine halbe Drahtlänge vor der Stumpfnäht und die andere hinter der Stumpfnäht abzuschmelzen war.

Sämtliche Nähte wurden in waagerechter Lage geschweißt, die Kehlnähte in abgekanteter Lage der Träger.

Geschweißt wurde mit Gleichstrom, die Drähte am Minuspol, die Träger 24 und 25 mit Wechselstrom. Weitere Einzelheiten der Schweißung der Stumpfnähte sind nachstehend gegeben.

Herstellung der Stumpfnähte

Wurzelabstand: ~ 2 mm

Steghöhe der Fuge: ~ 2 mm

Stegstöße der Reihen 1—3

Fugwinkel:

- ~ 90° bei Träger 1—8 und 13—19 (Manteldrähte)
- 60° bei Träger 9 und 10 (K 11, K 12) (Seelendrähte)
- 70° bei Träger 11 und 12 (F 11, F 12) (Manteldrähte).

Lagenzahl:

je 2 auf beiden Seiten der X-Fuge.

Schweißweg:

Wurzellage beliebig, bei Träger 1—8 und 13—19 von innen nach außen, bei Träger 9—12 von außen nach innen; bei sämtlichen Trägern 2.—4. Lage durchlaufend in der gleichen Richtung.

Schweißdrähte:

- 4 mm \varnothing für alle Lagen bei Träger 1—10 und 13—19
- 3 mm \varnothing für die erste Lage bei Träger 11 und 12,
- 4 mm \varnothing für die übrigen Lagen.

Gurtstoß der Reihe 5

Fugwinkel:

~ 80°

Lagenzahl:

3 in der zuerst geschweißten Öffnung, 4 auf der Gegenseite.

Schweißweg:

durchlaufende Schweißung, mit seitlichen Beilagen geschweißt.

Schweißdrähte:

3 mm \varnothing in der Wurzellage, sonst 4 mm \varnothing .

d) Bearbeitung der Versuchsstücke. Die Untergurtkante der Stegbleche mit Stumpfstößen wurde nach Herstellung der Stumpfnähte noch einmal überhobelt. Die Nahtübergänge der Stegstumpfnähte wurden in den unteren Teilen auf 10—12 cm Länge sauber geschliffen, ebenso die Nahtübergänge der Gurtnaht in Versuchsreihe 5. In den Reihen mit unteren Längsraupen und mit Untergurtplatten wurden erst dann die Längsraupen bzw. die Halsnähte geschweißt.

B. Schweißspannungszustand und Dauerfestigkeitsverhalten.

1. Versuchsdurchführung.

Die Dauerfestigkeitsuntersuchung wurde in einer 50 t-Pulsatormaschine durchgeführt. Die sekundliche Lastwechselzahl betrug in der Regel 8,3 Hertz.

Die Schweißspannungsuntersuchung wurde nicht ins einzelne gehend durchgeführt. Man beschränkte sich auf Feststellung der maßgeblichsten Verhältnisse. Gewisse Aufschlüsse wurden bereits bei der Schweißung durch Dehnungsmessungen erhalten, die weitere Untersuchung wurde durch Zerlegung der Nahtzonen und Ausmessung von kurzen Meßstrecken mit Setzdehnungsmessern ausgeführt. Einige Feststellungen mit Dehnungsmeßgeräten bei der Belastung der Träger vervollständigten die Untersuchung. Soweit die Zerlegung angewandt werden mußte, wurden hierfür nicht vorbelastete, teilweise aber auch bereits untersuchte, aber nicht gebrochene Träger verwendet. Die Ergebnisse sind dementsprechend bewertet.

2. Verhalten von Stumpfstößen mit ungedeckten Nahtenden bei Biegung in der Nahtebene (Versuchsreihe 1).

a) Schweißspannungszustand. Der geschweißte T-Querschnitt ohne Stoß hat den in Abb. 6 dargestellten Schweißspannungszustand. Die Kehlnähte erzeugen an den freien Kanten merkliche Zugspannungen. Der Stumpfstoß im T-Querschnitt (Abb. 7a) hat demgegenüber vollständig abweichende Spannungsverhältnisse. An dem freien Nahtende wurde eine Druckvorspannung von etwa 20 kg/mm² festgestellt. Diese Spannung ist gegenüber der Druckspannung an den Nahtenden der einfachen Platte durch die Wirkung der oberen

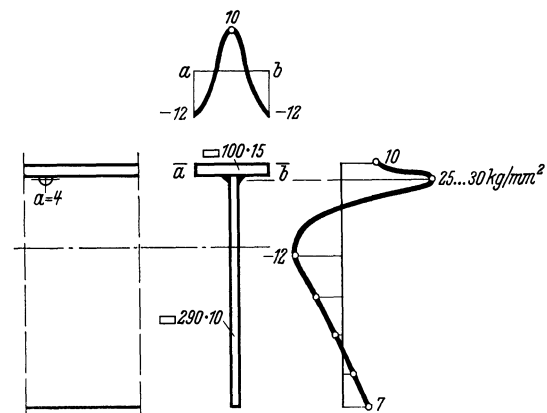


Abb. 6. Spannungsbilder für den T-Träger ohne Stegstumpfstoß.

Kehlnähte bei den vorliegenden Abmessungen um 6—8 kg/mm² kleiner. Auf den Unterschied der Spannung in den Kehlnähten außerhalb und im Stoß wird zurückzukommen sein.

Bei Biegung ist der Spannungszustand in der Stumpfnahat außerordentlich stabil, da die größten zusätzlichen Zugspannungen an den Stellen sehr hoher Druckvorspannungen auftreten.

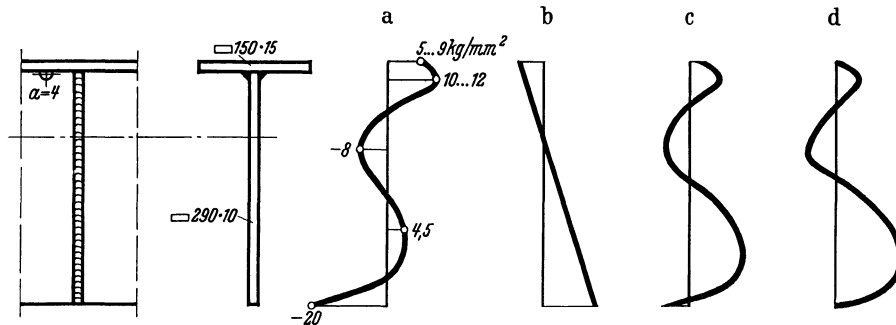


Abb. 7. Spannungsbilder für den T-Träger mit Stegstumpfstoß.

a) Schweißspannungen in der Stumpfnahat. b) Biegespannungen. c) Schweißspannungen u. Biegespannungen aus Biegung $\sigma_{max} = 14 \text{ kg/mm}^2$. d) Schweißspannungen u. Biegespannungen aus Biegung $\sigma_{max} = 20 \text{ kg/mm}^2$.

Messungen bis zu 1000maliger Belastung für eine Betriebsbeanspruchung von 20 kg/mm² an der Unterkante ergaben eine nur sehr geringe Abnahme der Druckvorspannungen. Bei Verwendung des gestoßenen Querschnittes für einen Fachwerkstab kann auch bei Zug und zusätzlicher Biegung damit gerechnet werden, daß die Druckvorspannungen zu einem wesentlichen Teil erhalten bleiben.

Das Spannungsbild bei zusätzlicher Biegebeanspruchung gestaltet sich damit ganz eigenartig (Abb. 7 b—d). Die unteren, in der eigentlichen Zugzone liegenden Nahtteile erfahren

bei Belastung eine Entlastung von einer hohen zu einer niedrigen Druckspannung, der Dauerbiegeversuch erzeugt für diese Nahtteile eine Dauerdruckschwellbeanspruchung. Hierin ist die Erklärung für das ausgezeichnete Verhalten der Träger dieser Versuchsreihe zu suchen.

b) Dauerfestigkeitsverhalten. Die Gesamtergebnisse der Dauerbiegeversuche der Reihe I zeigt Abb. 8.

Außer Betracht bleiben zunächst die spannungsfrei geglähten Träger B 17 und B 18. Von den anderen im normalen Zustand untersuchten zehn Trägern sind

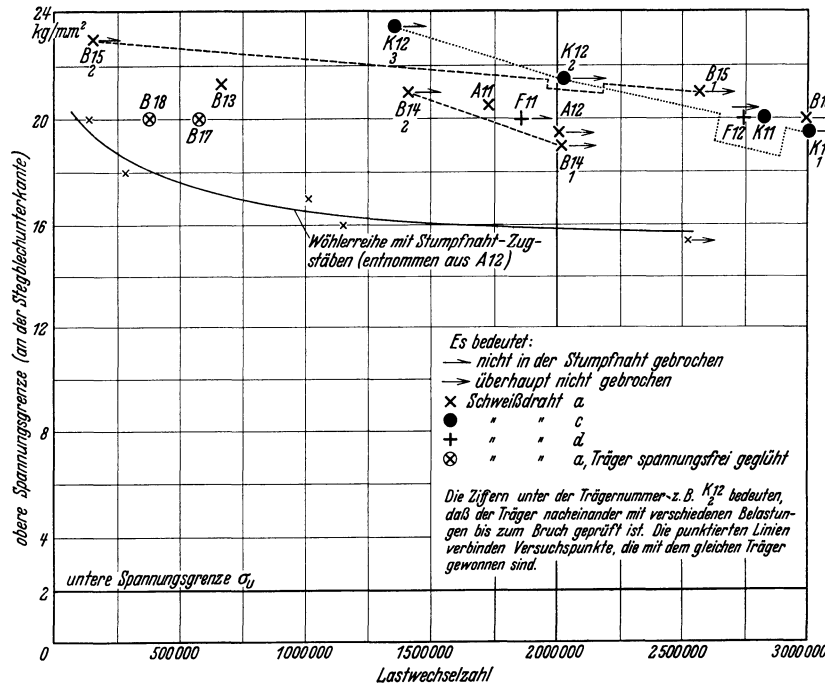


Abb. 8. Dauerbiegefestigkeit von geschweißten T-Trägern mit Stegstumpfstößen.

nur die Träger A 11 und B 13 bei weniger als $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel, der Träger K 11 bei beinahe $3 \cdot 10^6$ in der Stumpfnahat gebrochen. Sämtliche anderen Träger brachen nicht oder wenigstens nicht in der Stumpfnahat, obwohl die obere Versuchsspannung mindestens 19, meistens jedoch gleich oder größer als 20 kg/mm² war. Das Gesamtergebnis ist gegenüber der heut zugelassenen Spannung von $0,8 \cdot 14 = 11,2 \text{ kg/mm}^2$ ausgezeichnet.

Um einen Aufschluß über die Festigkeit der Nähte zu gewinnen, wurden drei der nicht gebrochenen Träger bei wesentlich erhöhten Spannungen weiter geprüft. Keiner der drei Träger brach in der Stumpfnah. Besonders bemerkenswert ist das Verhalten des Trägers *K 12*, der bei $\sigma_u = 2 \text{ kg/mm}^2$ Spannungen σ_0 nacheinander von $19,5 \text{ kg/mm}^2$ $3 \cdot 10^6$ mal, von $21,5 \text{ kg/mm}^2$ $2 \cdot 10^6$ mal ertrug und bei $23,5 \text{ kg/mm}^2$ nach $1,358 \cdot 10^6$ Lastwechseln außerhalb der Stumpfnah brach. Ein gleich günstiges Verhalten, wie es in dieser Untersuchung durchschnittlich und besonders in den Höchstwerten beobachtet wurde, ist für genietete Stöße nicht zu erwarten.

Drei der nicht im Stoß gebrochenen Träger zeigen die Abb. 9, 11 und 13, Einzelheiten über die Nahtbeschaffenheit und die Bruchausbildung außerhalb des Stoßes die Abb. 10a—c, 12 und 14a und b. Auf diese Punkte wird zurückzukommen sein.

Träger *K 11* brach infolge nicht über eine genügende Höhe durchgeführte Nahtbearbeitung. Der sichtbare feine Anriß erwies sich beim Auseinanderbrechen nach dem Versuch als voller Durchbruch über die Dicke. Das Ergebnis mit diesem Träger war trotzdem sehr gut (Abb. 15).

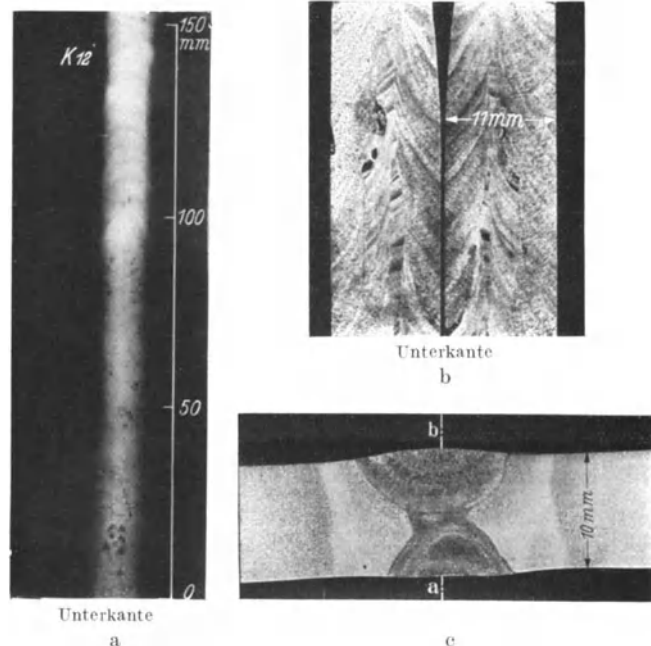
Die Träger *A 11* und *B 13* waren den anderen Trägern infolge von Nahtfehlern (Abb. 16, mangelhafte Wurzelverschweißung und Abb. 17, Wurzelfehler) unterlegen. Die Anbrüche traten infolge der Fehleranordnung und Schweißspannungsanordnung mehrere Zentimeter entfernt von der Unterkante ein (Abb. 18a—c).

Die schon bei Aufstellung des Versuchsplanes von dem Berichtersteller vertretene Anschauung, daß der normale Schweißspannungszustand der Stumpfnah sehr günstige Festigkeitsverhältnisse für diese schaffe, wurde durch folgende weitere Versuche überprüft.

Bei zwei Trägern, *B 17* und *B 18*, wurden die Schweißspannungen durch Spannungsfreiglühung beseitigt. Die Dauerfestigkeit sank sofort erheblich (Abb. 8). Beide Träger brachen in der Stumpfnah. Bei dem Träger *B 17* war eine vollständig einwandfreie Stumpfnah vorhanden, die Naht in *B 18* hatte Mängel (Abb. 19). Infolge der Beseitigung

Abb. 9. Träger *K 12*.

Spannungen an der Stehblechkante:	Ertragene Lastwechselzahl:
$\sigma_u = 2; \sigma_0 = 19,5 \text{ kg/mm}^2$	$N > 3\,000\,000$
$\sigma_u = 2; \sigma_0 = 21,5 \text{ kg/mm}^2$	$N > 2\,000\,000$
$\sigma_u = 2; \sigma_0 = 23,5 \text{ kg/mm}^2$	$N = 1\,358\,000$

Abb. 10a bis c. Träger *K 12*.

der Schweißspannungen, also auch der hohen Druckvorspannungen an den Nahtenden, war die einwandfreie Naht in *B17* den anderen Nähten weit unterlegen und sogar der fehlerhaften Naht in *B13* unterlegen.

Aus dem nicht gebrochenen Träger *A12* wurden aus dem mittleren Stegblechteil Zugstäbe für Pulsatorversuche entnommen, die in der Mitte quer zur Stabrichtung einen Stumpfnah-

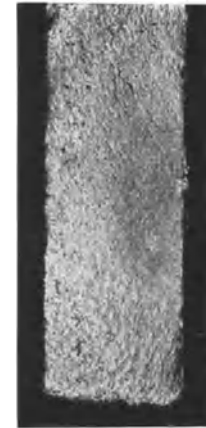


Abb. 11. Träger *F11*.

Spannungen an der Stehblechkante: $\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 20,0 \text{ kg/mm}^2$ Ertragene Lastwechselzahl: $N = 1\ 856\ 000$

Abb. 12. Träger *F11*.

Anbruch von einem Schweißstropfen.

abschnitt einwandfreier Beschaffenheit enthielten. Die Stäbe wurden außerhalb der im vorhergehenden Dauerbiegeversuch höher beanspruchten Zonen entnommen, die Nahtübergänge wieder bearbeitet. Die hiermit ermittelte Wöhlerlinie enthält Abb. 8. Da die Schweißspannungen durch das Heraustrennen beseitigt sind, geben diese Versuche die Nahtdauerfestigkeit ohne Wirkung innerer Vorspannungen an¹.



Abb. 13. Träger *B14*.

Spannungen an der Stehblechkante: $\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 19,0 \text{ kg/mm}^2$ Ertragene Lastwechselzahl: $N > 2\ 000\ 000$
 $\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 21,0 \text{ kg/mm}^2$ $N = 1\ 409\ 000$

Sowohl aus den Versuchen mit spannungsfrei gegliihten Trägern wie aus diesen Versuchen geht deutlich hervor, daß den Druckvorspannungen an ungedeckten Stumpfnahenden eine erhebliche praktische Bedeutung beigemessen werden muß. Unabhängig von der Probeform, mit der diese Untersuchung gemacht worden ist, hat die Feststellung allgemeine Bedeutung für die Bewertung der Stumpfnah, im Bauwesen besonders für Stumpfstöße in Gurtstößen. Zu erinnern ist daran, daß sich die Untersuchung auf solche

Stumpfnähte beschränkt, die ohne wesentliche äußere Einspannwirkung hergestellt werden.

e) Einfluß der Nahtbeschaffenheit und von sonstigen Umständen auf die Dauerfestigkeit.

¹ Die Dauerfestigkeit ist etwas geringer, als nach den heutigen Vorschriften verlangt wird. Die Träger wurden aber längere Zeit vor Abfassung der Vorschriften hergestellt. Die dort aufgestellten Bedingungen haben dazu geführt, daß bei den Zulassungsversuchen für den Draht jetzt im allgemeinen höhere Werte erreicht werden.

Obwohl die Nähte sich mit ganz geringen Ausnahmen sehr gut verhalten hatten, wiesen sie in bezug auf Porenbildung und Verschweißung verschiedentliche Mängel auf. Hinzuweisen ist besonders auf den widerstandsfähigsten Träger *K 12*, dessen Naht porig, an der Unterkante teilweise sogar grobporig war (Abb. 10a und b). Die Verschweißung war andererseits ausgezeichnet (Abb. 10c). Träger *B 14* zeigte in der Naht kleinere Poren (Abb. 14a), die Naht war widerstandsfähiger als der Werkstoff (Abb. 13 und 14b).

Merklich ungünstig ausgewirkt hat sich die mangelnde Wurzelverschweißung bei Träger *A 11* (Abb. 16) und der größere Fehler bei Träger *B 13* (Abb. 18a—c). Der Fehler befand sich bei *B 13* etwa 6 cm von der

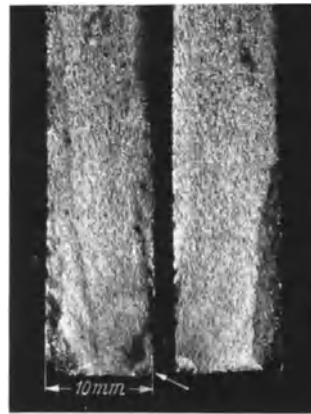
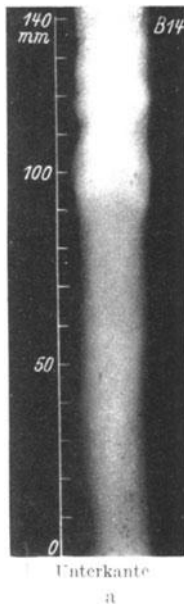


Abb. 14 a und b. Träger *B 14*.
Anbruch im Werkstoff.

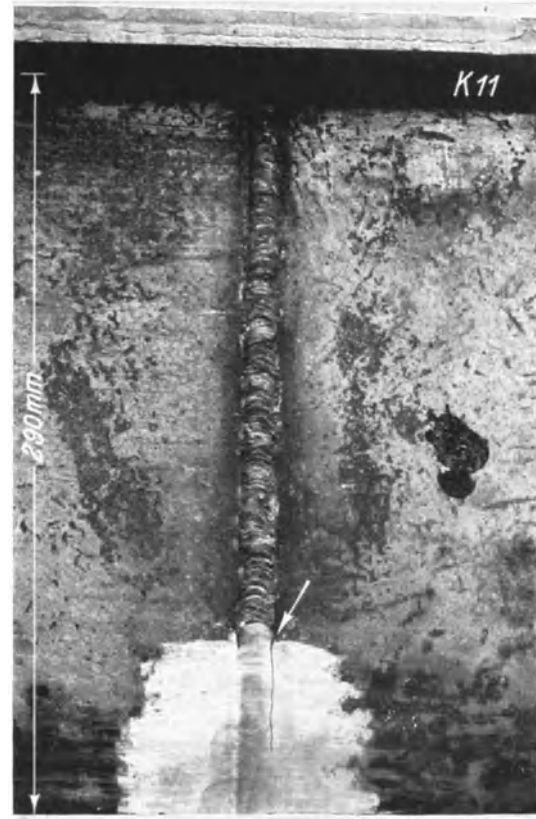


Abb. 15. Träger *K 11*.
Spannungen an der Stehblechkante: Ertragene Lastwechselzahl:
 $\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 20,0 \text{ kg/mm}^2$ $N = 2\ 825\ 000$

Unterkante und 14 cm von der neutralen Linie entfernt. Die Versuchsspannungen an der Unterkante und an der fehlerhaften Stelle waren:

Versuchsspannungen kg/mm ²	σ_u	σ_o	$\sigma_o - \sigma_u$	Lastwechselzahl bis zum Bruch
Unterkante	2,1	21,3	19,2	661 000
Fehlerhafte Stelle . .	1,5	15,0	13,5	

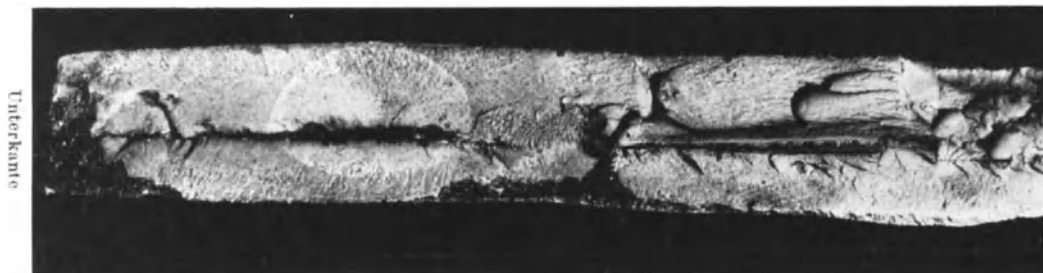


Abb. 16. Träger *A 11*. Bruchbild der Schweißnaht.
Spannungen an der Stehblechkante: Ertragene Lastwechselzahl:
 $\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 20,5 \text{ kg/mm}^2$ $N = 1\ 728\ 000$



Abb. 17. Träger B13.

Spannungen an der Stehblechkante: Ertragene Lastwechselzahl:
 $\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 21,3 \text{ kg/mm}^2$ $N = 661\,000$

Der Fehler war im Verhältnis zur zulässigen Beanspruchung infolge seiner Lage unbedenklich, an den höher beanspruchten Stellen wäre dagegen ein gleicher Mangel bereits bedenklich gewesen. Einen besonderen Hinweis verdient der Schweißfehler am unteren Nahtende des Trägers B15 (Abb. 20). Trotz des sehr bedenklichen Fehlers (Abb. 21a und b) an höchstbeanspruchter Stelle verhielt sich der

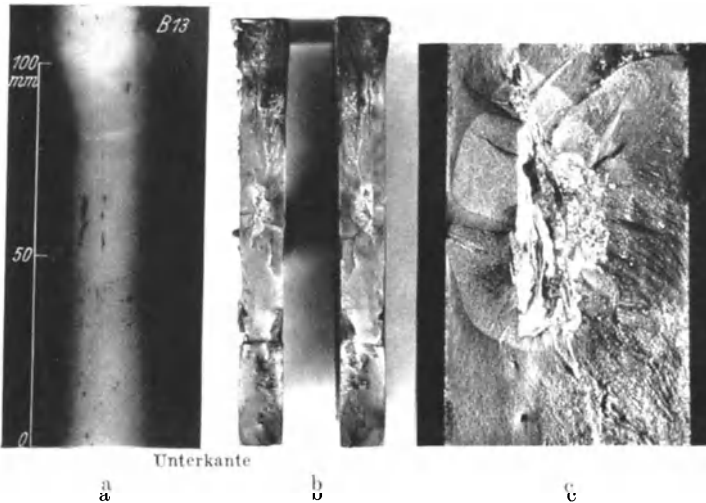


Abb. 18a bis c. Träger B13. Nahtbeschaffenheit.

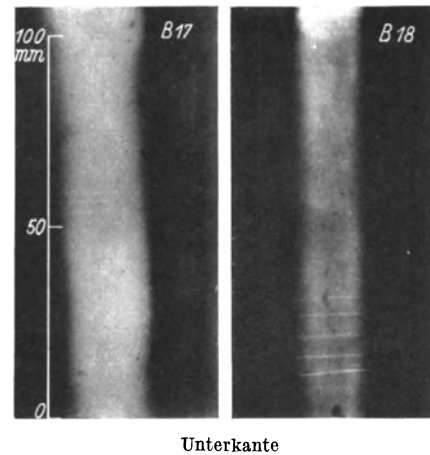
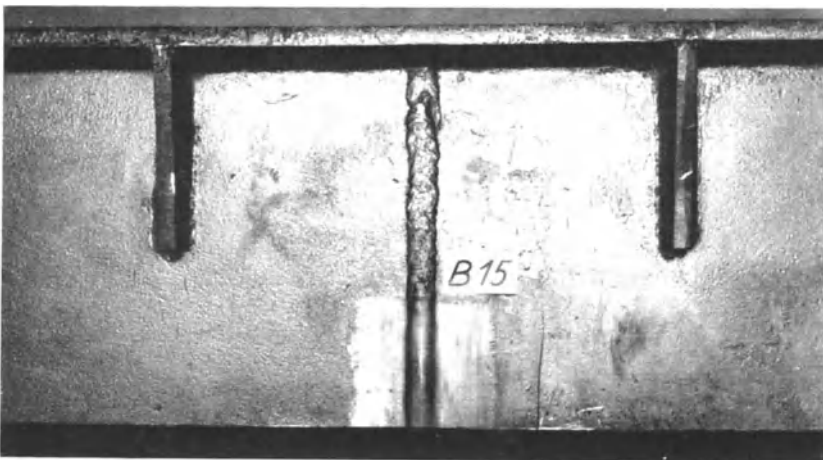


Abb. 19. Stumpfnähte der Träger B17 und B18.



bb. 20. Träger B15.

Spannungen an der Stehblechkante: Ertragene Lastwechselzahl:
 $\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 21,0 \text{ kg/mm}^2$ $N > 2\,564\,000$
 $\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 23,0 \text{ kg/mm}^2$ $N = 157\,000$

Träger im Dauerversuch ausgezeichnet (Abb. 8) und brach außerhalb der Naht. Eine Erklärung ist nur so möglich, daß die unteren Nahtzonen infolge der hohen

Druckvorspannungen im Versuch nur schwelende Druckbeanspruchungen erhielten, so daß sich der Trennungsbruch nicht ausbilden konnte. Es handelt sich auch hier um eine Folge des günstigen Schweißspannungszustandes.

Der Anbruch bei F 11

(Abb. 11) ging von einem Schweißtropfen aus (Abb. 12). Im Verhältnis zu $\sigma_{zul} = 14 \text{ kg/mm}^2$ ist dieser Fehler praktisch unbedenklich, nötigt aber zur Aufmerksamkeit bei festeren Stählen mit höheren Beanspruchungen.

Der Anbruch von *K 12* (Abb. 9) von der Versteifungsnaht aus erscheint zunächst bedenklich, da die schwellende Biegespannung wegen der nahen Lage der neutralen Linie nur gering war ($6,5 \text{ kg/mm}^2$). Es dürfte aber wohl nicht ohne Einfluß geblieben sein, daß — wie in der Regel bei Versuchen — eine verhältnismäßig große Einzellast (11,5 t) eingeleitet wurde. Die Brucherscheinung verdient Beachtung, ohne daß sie zahlenmäßig auf praktische Verhältnisse übertragen werden darf. Die Brucherscheinungen bei *F 11* und *B 14* (Abb. 11 u. 13) in Querschnitten nahe dem Querkraftwechsel sind vielleicht auch nicht ganz unabhängig von diesem.

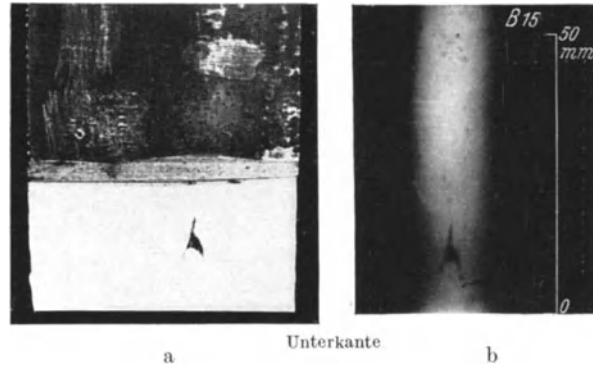


Abb. 21a und b. Träger *B 15*. Grober Schweißfehler in der Stumpfnah am unteren Ende.

3. Einfluß von Längsnähten in der Zugzone auf die Dauerfestigkeit von Trägern (Versuchsreihe 2 bis 5).

a) Schweißspannungszustand. Die Schweißnähte stehen aus dem Schweißprozeß unter hohen Längsspannungen. Der Spannungszustand von Trägern ist gekennzeichnet durch die Abb. 3c. Die Größenordnung der Längsspannungen in den Kehlnähten im vorliegenden Fall ist aus Abb. 6 zu entnehmen. Beim I-Querschnitt würde sich im Gegensatz zu diesem Spannungsbild ein zur neutralen Faser symmetrisches Spannungsbild gemäß Abb. 3c ergeben.

Das Ergebnis der Spannungsbestimmung an einem Träger der Studienform für Versuchsreihe 2 mit unteren Längsraupen zeigt Abb. 22. Ein Vergleich der Längsspannung in der

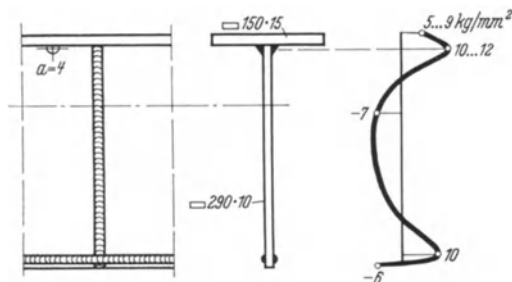


Abb. 22. T-Träger mit Stegstumpfstoß und Längsraupen, Schweißspannungszustand an der Stumpfnah, 1 mal statisch vorbelastet mit $\sigma = 18 \text{ kg/mm}^2$ (Unterseite).

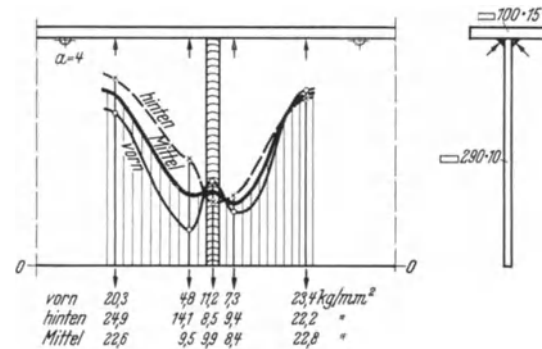


Abb. 23. Verlauf der Längsspannung in Halsnähten an der Kreuzung mit Stegblechstumpfnähten.

oberen Kehlnah und in der unteren Längsraupe an der Kreuzungsstelle: Längsnaht-Stegnaht mit den Längsspannungen der Kehlnähte in Abb. 6, bei der kein Stoß vorhanden ist, zeigt in der Kreuzungsstelle wesentlich niedrigere Längsspannungen als außerhalb des Stoßes. Da der in Abb. 22 dargestellte Träger bereits mit 18 kg/mm^2 an der Unterseite vorbelastet war, könnte man annehmen, daß ein Spannungsabbau durch die Vorbelastung eingetreten ist. Es fiel jedoch auf, daß auch die Längsspannung am Stoß in der im Druckteil liegenden Kehlnah kleiner als sonst war. Die daraufhin vorgenommene Spannungsuntersuchung über den Verlauf der Längsspannungen beiderseits des Stoßes an einem weiteren noch nicht belasteten Träger (Abb. 23) zeigte, daß es sich anscheinend um eine systematische Abweichung der Längsspannungsverhältnisse in und außerhalb des Stoßes handelt. Die im Stumpfstoß an den Naht-

enden vorhandene Druckspannung wirkt sich augenscheinlich auch beim Überschweißen mit Längsraupen noch günstig in dem Sinne aus, daß sie die verbleibende Zugspannung sehr stark vermindert. Es ist zwar anzunehmen, daß die höheren Längsspannungen außerhalb des Stoßes bei Belastung wegen ihrer Größe stärker abgebaut werden als die kleineren an der Kreuzung. Da man jedoch gerade die Kreuzungsstellen von Halsnähten und Stegstoßnähten immer als unsicherer empfindet als die sonstigen Nahtteile, ist die Feststellung, daß hier keine besonders hohen Zugvorspannungen auftreten, von Wert.

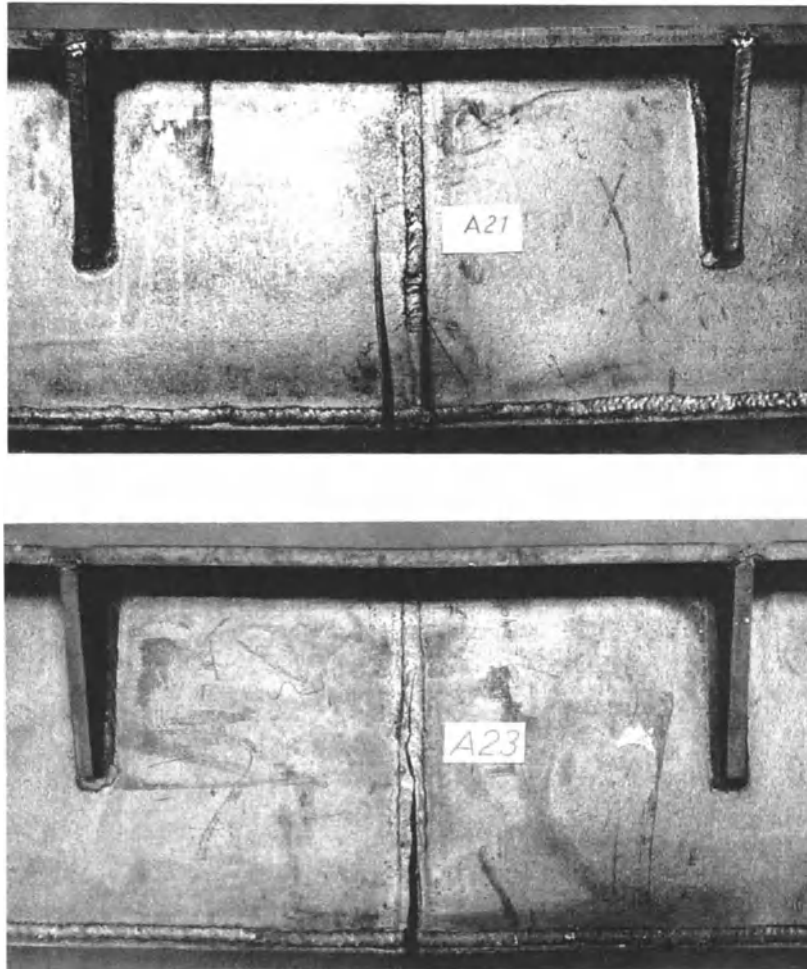


Abb. 24. Träger A21 und A23.

Spannungen an der Stehblechkante:	Ertragene Lastwechselzahl:
A21: $\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 17,0 \text{ kg/mm}^2$	$N = 1\ 852\ 000$
A23: $\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 19,5 \text{ kg/mm}^2$	$N = 261\ 000$

b) Dauerfestigkeitsverhalten. Die Versuche mit Längsnähten in der Zugzone ergaben keine klare Überlegenheit der ungestoßenen Träger gegenüber den gestoßenen. Ursprünglich waren Träger mit durchgehendem Stegblech überhaupt nicht vorgesehen worden, weil der Gefahrenpunkt in der Stegnaht, besonders in der Kreuzungsstelle gesehen wurde.

Bereits bei den ersten vier Versuchen mit Längsraupen bzw. Längsnähten und Stegblechstoß brachen zwei Träger außerhalb der Stoßnähte (Abb. 24 und 25). Das wies darauf hin, daß den Festigkeitsverhältnissen in den Längsnahtzonen besondere Aufmerksamkeit zuzuwenden ist. Hierzu bestand um so mehr Veranlassung, als es beim Träger leicht möglich ist, die Stoß-

nähte in Querschnitten geringerer Beanspruchung anzuordnen, während die Längsnähte über die Zonen größter Ausnutzung hinweggeführt werden müssen.

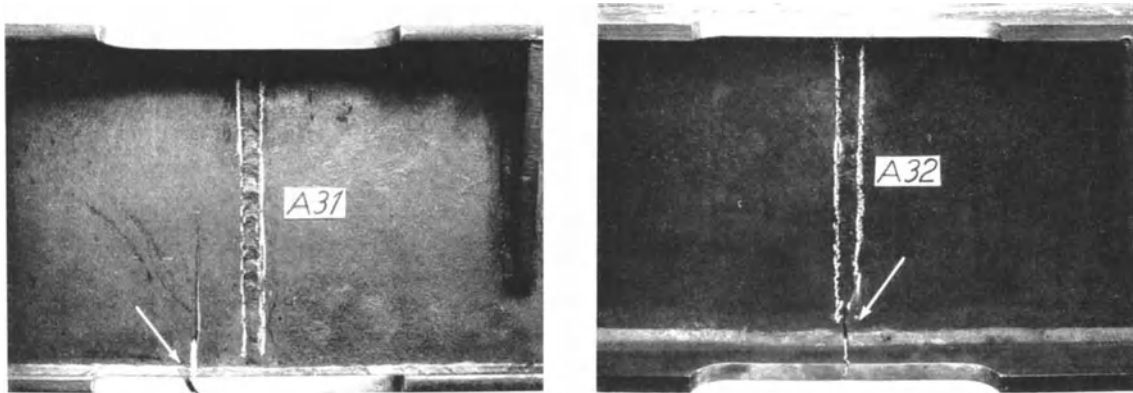


Abb. 25. Träger A31 und A32.
Spannungen an der Stegblechkaute: Ertragene Lastwechszahl:
A 31: $\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 19,0 \text{ kg/mm}^2$ $N = 1\,987\,000$
A 32: $\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 20,0 \text{ kg/mm}^2$ $N = 860\,000$

Durch diese Erfahrungen bei den ersten Versuchen hatte sich die ursprüngliche Aufgabe des Studiums der Stöße stark verschoben. Die deshalb neu aufgenommene Versuchsreihe 4 sah Träger ohne Stöße vor, wobei Träger gleicher Ausbildung, mit drei verschiedenen Schweißdrähten geschweißt, untersucht wurden.

Die Gesamtergebnisse der Dauerfestigkeitsversuche der Reihen 2—5 enthält Abb. 26. Die für die Beurteilung maßgebende Spannung tritt an der Unterkante des Stegbleches auf; erfahrungsgemäß gehen bei geschweißten Trägern dieser Art die Anbrüche von den Längsnähten aus. Die Spannungen im Versuch sind in Abb. 26 deshalb immer auf die Stegblechunterkante bezogen, auch bei den Trägern der Reihen 3—5 nicht auf die größere Randspannung. Mit nachstehenden Bezeichnungen ergeben sich folgende Verhältniswerte der Spannungen:

- σ = Größte Spannung an der Stegblechunterkante,
 τ = Schubspannung in der Halsnaht,
 σ_1 = Hauptspannung am Übergang vom Steg zum Gurt unter den Lastangriffspunkten,
 σ_r = Größte Randspannung.

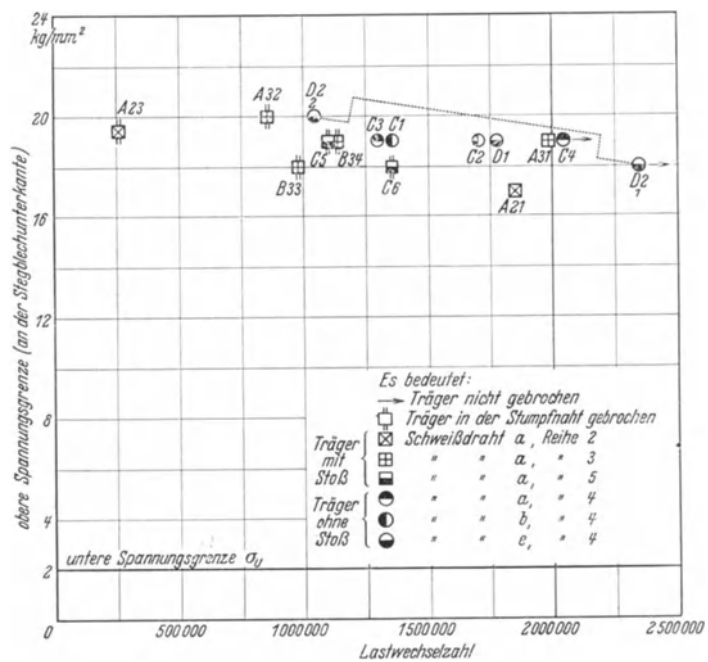


Abb. 26. Dauerbiegefestigkeit von geschweißten Trägern mit und ohne Stößen.

	σ	τ	σ_1	σ_r
Reihe 3 . . .	1	0,31	1,09	1,10
Reihe 4 und 5 .	1	0,29	1,08	1,10

Die Träger mit Längsraupen ohne Untergurtplatte *A 21* und *A 23* (Abb. 26) hatten eine ganz bedeutend geringere Dauerfestigkeit als die ohne Längsraupen hergestellten Träger der Versuchsreihe 1. Sie waren in ihrem Verhalten noch etwas ungünstiger als die spannungsfrei ge-
glühten Träger *B 17* und *B 18* ohne Längsraupen (Abb. 8). Etwas günstiger als *A 21* und *A 23* verhielten sich die normalen Träger mit beiderseitigen Gurtplatten mit wenigen Ausnahmen (*B 33*). Die Träger ohne Stoß verhielten sich durchschnittlich ein wenig besser als

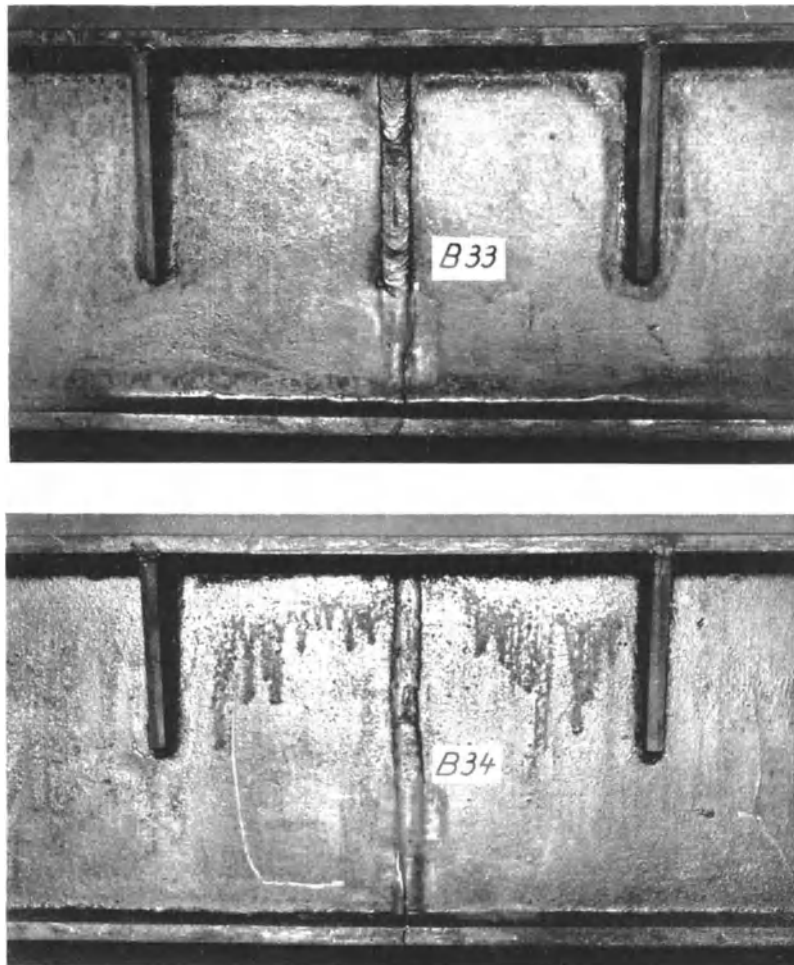


Abb. 27. Träger *B 33* und *B 34*.

Spannungen an der Stehblechkante:	Ertragene Lastwechselzahl:
<i>B 33</i> : $\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 18,0 \text{ kg/mm}^2$	$N = 979\ 000$
<i>B 34</i> : $\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 19,0 \text{ kg/mm}^2$	$N = 1\ 137\ 000$

die gestoßenen. Die Dauerfestigkeit der ungestoßenen ist mit $18\text{--}19 \text{ kg/mm}^2$ (Stegblechunterkante $N = 2 \cdot 10^6$, $\sigma_u = 2 \text{ kg/mm}^2$), die der gestoßenen mit $17\text{--}18 \text{ kg/mm}^2$ anzusetzen¹, bezogen auf die Rand- oder Hauptspannung um etwa 10% höher. Sämtliche Träger sind den Trägern der Versuchsreihe 1 mit Stumpfstoßen und ungedeckten Nahtenden unterlegen. Das ist zur richtigen Bewertung des Stumpfstoßes zu betonen. Der Unterschied ist jedoch vor allem auf die günstige Auswirkung der vorhandenen Druckspannungen bei dieser Versuchsreihe, kaum aber auf eine Abminderung durch die Zugspannungen der Längsnähte zurückzuführen. Dieser Schluß kann aus dem Vergleich des Verhaltens der Träger mit Längsnähten mit den spannungsfrei ge-
glühten Trägern *B 17* und *B 18* (Abb. 8) gezogen werden. *B 17* hatte eine

¹ S. Fußnote S. 10.

ganz einwandfreie Naht. Das Ergebnis gibt also etwa die Dauerfestigkeit des Schweißgutes an. Der bei größerer Belastung in den Längsnähten eintretende Spannungsabbau einerseits und die mit der Vorspannung wachsende Dauerfestigkeit andererseits bewirken, daß selbst die

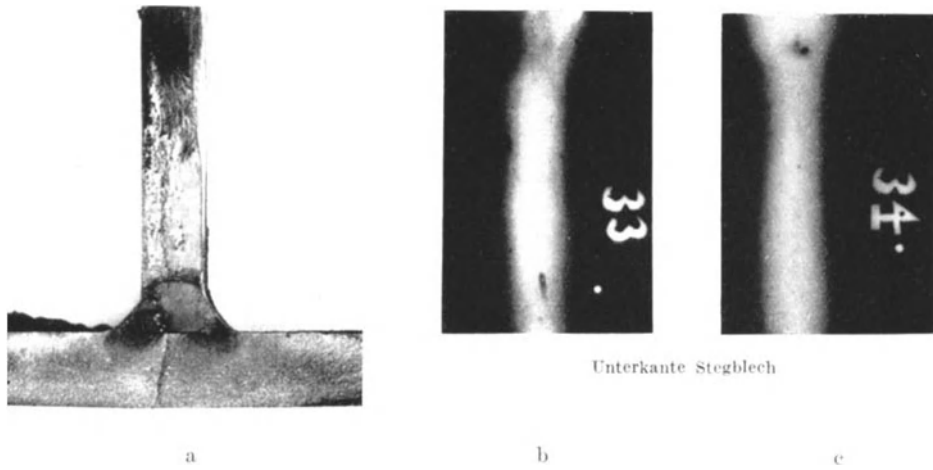


Abb. 28. Träger *B33* und *B34*. Bruchbild und Nahtbeschaffenheit.

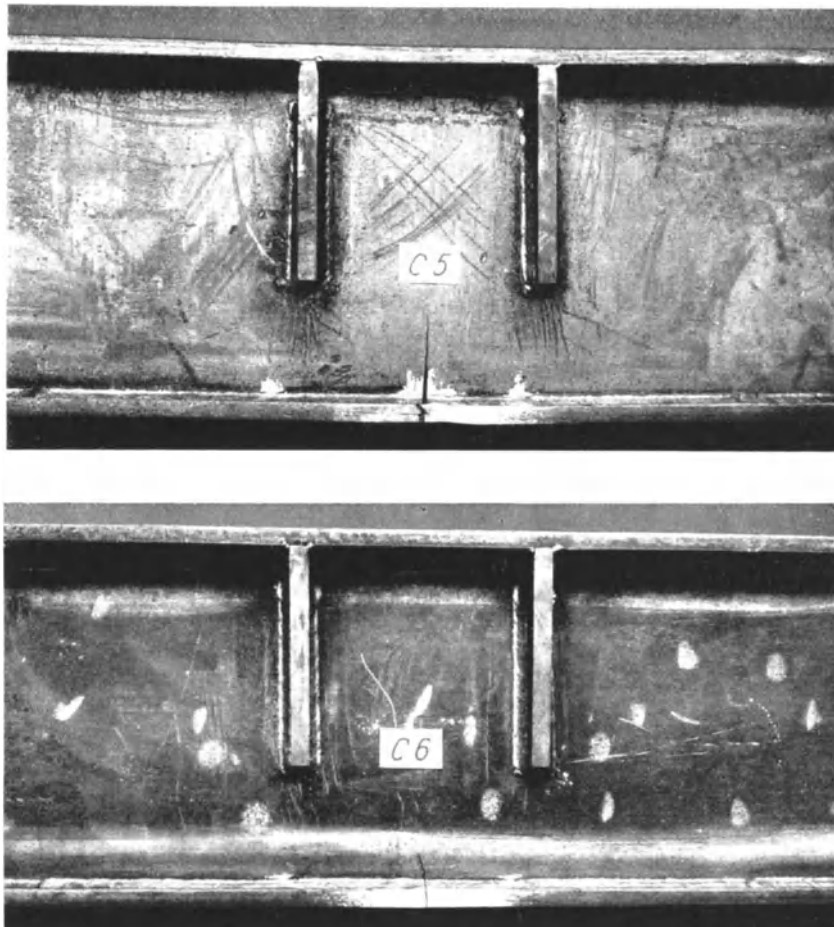


Abb. 29. Träger *C5* und *C6* mit Untergurtstößen.

Spannungen an der Stehblechkante:	Ertragene Lastwechselzahl:
<i>C 5</i> : $\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 19,0 \text{ kg/mm}^2$	$N = 1\ 102\ 000$
<i>C 6</i> : $\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 18,0 \text{ kg/mm}^2$	$N = 1\ 354\ 000$

anfänglich sehr hohen Schweißspannungen von 20—30 kg/mm² keine praktisch besonders ins Gewicht fallende Abminderung gegenüber der Festigkeit des Schweißgutes verursachen. Diese

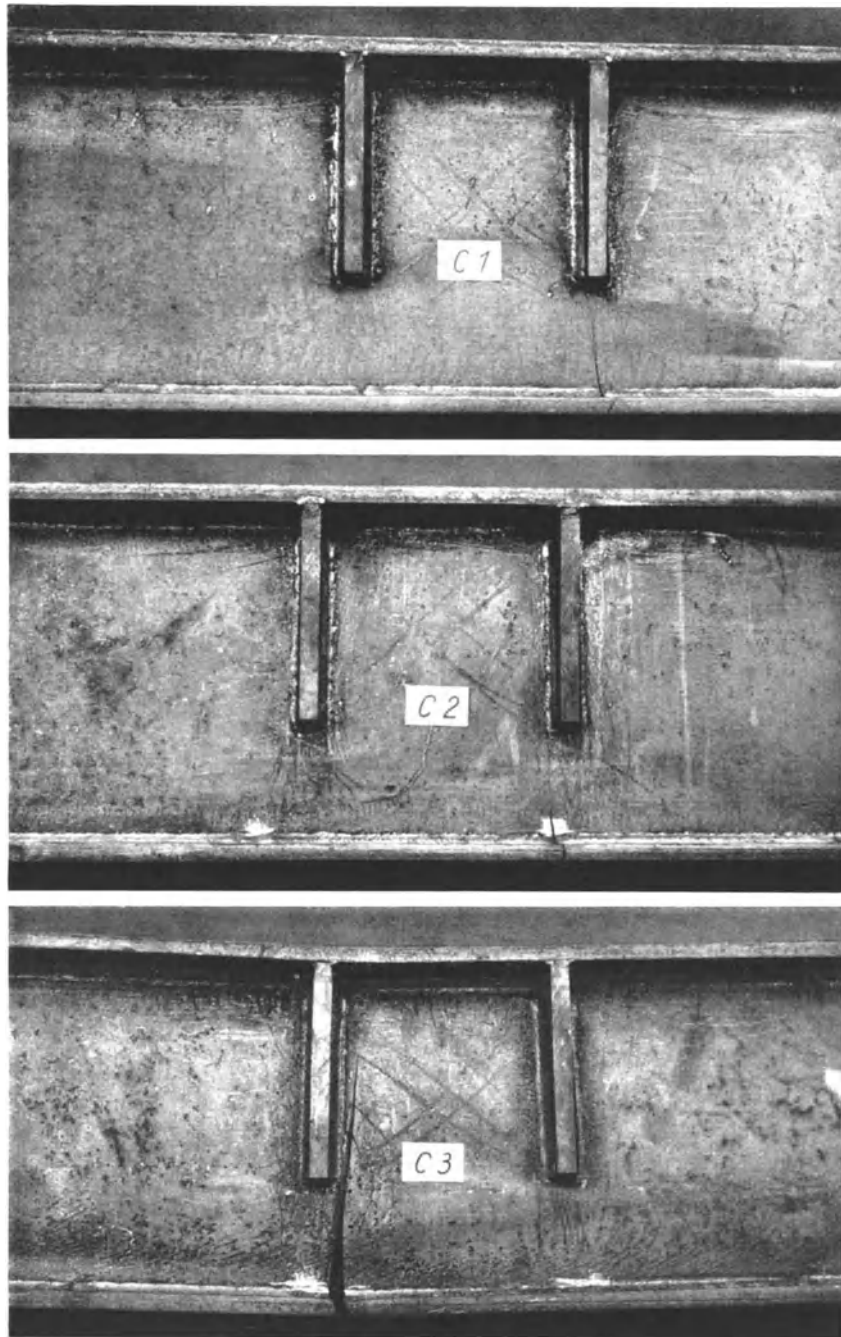


Abb. 30. Träger C1 bis C3.

Spannungen an der Stehblechante:	Ertragene Lastwechselzahl:
C 1: $\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 19,0$ kg/mm ²	$N = 1\ 359\ 000$
C 2: $\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 19,0$ kg/mm ²	$N = 1\ 705\ 000$
C 3: $\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 19,0$ kg/mm ²	$N = 1\ 300\ 000$
C 4: $\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 19,0$ kg/mm ²	$N > 2\ 000\ 000$ (nicht gebrochen und nicht dargestellt)

Feststellung ist beschränkt auf die Fälle, in denen geeignete Werkstoffe, Schweißdrähte und Schweißbedingungen angewendet werden, bei denen Schweißrisse und sprödes Gefüge nicht auftreten.

Die Träger *B 33* und *B 34* brachen im Stoß (Abb. 27). Die Stumpfnahht *B 33* hatte nahe der Kreuzungsstelle einen Fehler (Abb. 28 b). Der Anbruch (Abb. 28 a) scheint aber unmittelbar an der Kreuzung entstanden zu sein. Die Naht *B 34* (Abb. 28 c) war fehlerfrei.

Die beiden Träger mit Untergurtstoß *C 5* und *C 6* brachen im Stoß (Abb. 29). Der Stoß *C 6* hatte einen leichten Wurzelfehler zwischen Untergurtkante und Steg, die Naht *C 5* war einwandfrei, eine in der Untergurtplatte vorhandene Doppelung kann das Ergebnis etwas be-

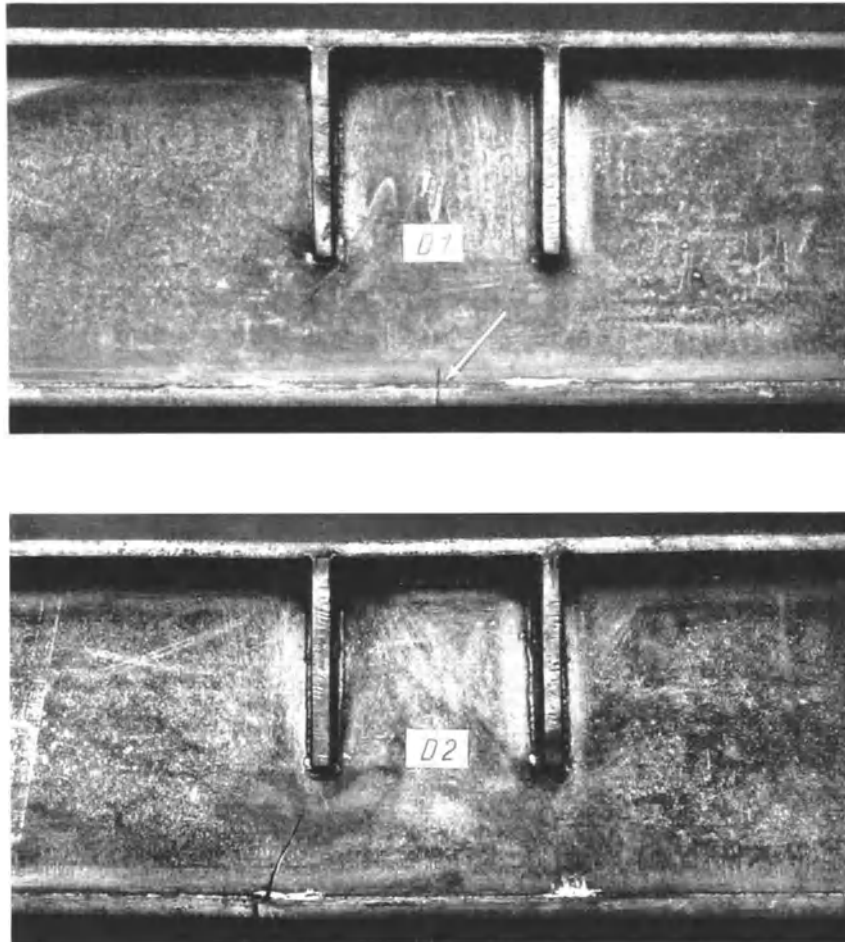


Abb. 31. Träger *D 1* und *D 2*.

Spannungen an der Stehblechkante :	Ertragene Lastwechselzahl :
<i>D 1</i> : $\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 19,0$	$N = 1\ 776\ 000$
<i>D 2</i> : $\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 18,0$	$N > 2\ 350\ 000$
$\sigma_u = 2$; $\sigma_o = 20,0$	$N = 1\ 048\ 000$

einflußt haben. Die Beanspruchung der Gurtnaht war um 10% höher als in der Abb. 26, in der die Spannungen auf die Stegblechunterkante bezogen sind, angegeben ist.

Bei den mit drei verschiedenen Drähten geschweißten Trägern ohne Stoß ist ein Einfluß des verwendeten Schweißdrahtes nicht festzustellen (Abb. 26). Der größere Unterschied zwischen den ganz gleichen Trägern *C 3* und *C 4* zeigt vielmehr, daß gewisse Zufälligkeiten oft wesentlicher sind als gewisse Unterschiede in den Drähten, wobei natürlich nur Drähte anerkannter Qualitäten in Betracht gezogen werden.

Von den sechs ohne Stoß untersuchten Trägern *C 1* bis *C 4* und *D 1* bis *D 2* brachen drei (*C 1* bis *C 3*) unter einer der Versteifungen, bei denen der Lastangriff erfolgte (Abb. 30), einer (*C 4*) brach überhaupt nicht, ein weiterer (*D 1*) in der Mitte (querkraftfreies Feld) und der letzte (*D 2*) im Querkraftfeld nahe der Versteifung (Abb. 31). Sämtliche Träger brachen von den Längsnähten aus senkrecht zur Nahrichtung. Der Anbruch bei *C 1* ging deutlich von

dem Ansatz einer neuen Elektrodenlänge aus. Bei den weiteren Trägern wurden deshalb in der mittleren Länge die Ansatzstellen von Elektroden etwas überarbeitet und die Nahtoberflächen unterhalb der Versteifungen geglättet. Die auch weiterhin meistens in Nähe der Lastangriffspunkte erfolgenden Anbrüche weisen darauf hin, daß hier wohl besonders gefährdete Stellen vorliegen. Andererseits zeigt der Anbruch von $D I$ im querkraftfreien Feld, daß die zusätzliche Schubspannung zu den Längsnormalspannungen der Nähte und die daraus resultierende größere Hauptspannung nicht immer für den Anbruch maßgebend wird. Die jetzt in den Vorschriften verankerte Begrenzung der zulässigen Hauptspannung dürfte den wirklichen Verhältnissen durchaus genügen.

Den Anbrüchen kann entnommen werden, daß auf gute Verschweißung an den Elektrodenansatzstellen und Vermeidung schroffer Ansatzstellen (wie z. B. bei $C I$) zu achten ist. Die Schweißung in mehreren Lagen, die bei größeren Trägern die Regel ist, gestaltet die Verhältnisse wahrscheinlich günstiger.

III. Zusammenfassung und Versuchsfolgerungen.

Bei der Herstellung geschweißter Träger treten in jedem Fall hohe Schweißspannungen auf. Während man auf Grund von Feststellungen über die Tragfähigkeit bei statischer Belastung weiß, daß auch hohe Schweißspannungen bei Verwendung einwandfreier Werkstoffe und einwandfreier Elektroden die Tragfähigkeit nicht merklich beeinflussen, ist über die Auswirkung bei Dauerbeanspruchung wenig bekannt.

Für die Festigkeit ist besonders den Schweißspannungen Beachtung zu schenken, die in Richtung der maximalen Beanspruchungen aus der Betriebsbelastung auftreten, beim Träger also den in der Längsrichtung der Träger auftretenden Schweißspannungen.

Bei den Grundformen des Trägers, bestehend aus Stegblech und Gurtlamellen, treten in den Halsnähten hohe Zugspannungen auf. Bei Anordnung von Stößen im Stegblech oder in den Gurtplatten treten weitere Schweißspannungen, die Bedeutung gewinnen könnten, senkrecht zu den Stoßnähten auf.

Die durchgeführte Untersuchung an Trägern aus Stahl 37 erstreckte sich auf den Träger ohne Stoß und den Träger mit Stoß im Stegblech oder im Gurt und beschränkte sich für diese auf die Fälle, in denen die Stoßstumpfnähte ohne einer äußeren Verspannung ähnlichen Wirkung hergestellt werden konnten. Nicht untersucht wurden die Fälle, in denen die Stöße unter Verspannungswirkung (Baustellenstöße) geschweißt werden müssen. Die Untersuchung klärte die Bedeutung des Schweißspannungszustandes in Stumpfnähten für das Verhalten dieser Nähte bei Biegung unter Dauerbeanspruchung in der Ebene der Nähte, woraus sich allgemeine Schlüsse auf das Verhalten bei außermittiger Beanspruchung von Stumpfnähten ziehen lassen. Es wurde festgestellt, daß die an den Nahtenden vorhandenen hohen Druckvorspannungen die Dauerfestigkeit sehr günstig beeinflussen und daß das ungedeckte Ende von Stumpfnähten deshalb auf natürliche Weise gesichert ist. Bei fast allen Trägern wurden Dauerfestigkeiten von mehr als 20 kg/mm^2 ($\sigma_u = 2 \text{ kg/mm}^2$, $N = 2 \cdot 10^6$), bezogen auf das freie Nahtende, erreicht; geringere Festigkeiten hatten nur die Nähte mit merklichen Schweißfehlern, die durch Durchstrahlungen leicht erkannt werden können. Bei mehreren Versuchen wurden Anbrüche der Träger außerhalb der Stumpfstoße im Werkstoff erreicht. Da in vielen praktischen Fällen, besonders auch bei den Regelbreiten der Gurtplatten mit hohen Druckvorspannungen gerechnet werden kann, sind die gewonnenen Erkenntnisse für die Beurteilung und Anwendung der Stumpfnähte von besonderem praktischem Wert.

Die in den Zugzonen liegenden Halsnähte setzen die Dauerfestigkeit stark herab. Bei der Anordnung von Stößen sind nicht durchweg die Stöße und besonders die Kreuzungsstellen der Halsnähte mit den Stößen in erster Linie gefährdet, sondern vielfach Querschnitte außerhalb der Stöße infolge irgendwelcher Mängel der Halsnähte, z. B. schlechte Verschweißung von Elektrodenansatzstellen oder auch infolge sonstiger Unregelmäßigkeiten der Halsnähte. Die Anbrüche in den Versuchen traten häufig in Querschnitten, in denen die Kraft eingeleitet wurde, ein. Die Dauerfestigkeit wird offenbar nicht besonders von den Zugvorspannungen

herabgesetzt, sondern ist in erster Linie bei Verwendung von Markendrähten abhängig von der gleichmäßigen Beschaffenheit der Halsnähte und dann wohl auch von der Dauerfestigkeit des Schweißgutes, die sich jedoch nicht aus den sonstigen mechanischen Güteeigenschaften des Schweißgutes ableiten läßt.

Die Dauerfestigkeit geschweißter I-Träger ohne Stoß wurde bei Beziehung auf die für den Bruchtritt maßgebende Spannung an der Stegblechunterkante für ungestoßene Träger zu 18—19 kg/mm², für Träger mit Stegblechstumpfstoß oder Stumpfstoß im Zuggurt zu 17—18 kg/mm² ($\sigma_u = 2 \text{ kg/mm}^2$, $N = 2 \cdot 10^6$) ermittelt, bezogen auf die Randspannung zu 20—21 bzw. 19—20 kg/mm². Dies entspricht den spezifischen Dauerfestigkeitswerten, die, bezogen auf den durch die Nietlöcher geschwächten Querschnitt, bei einfachen genieteten Zugverbindungen bester Ausführung, d. h. mit gutem Reibungswiderstand und hohen Klemmkraften, zu erreichen sind, wobei es offen bleiben muß, ob bei genieteten Stößen in Trägern mit gleich hohen Werten gerechnet werden kann.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung lagen bei der Aufstellung der „Vorläufigen Vorschriften für geschweißte vollwandige Eisenbahnbrücken“ in den wesentlichsten Punkten bereits vor und konnten für die Bewertung geschweißter Verbindungen mit herangezogen werden. Die Ergebnisse trugen dazu bei, Stumpfnähte ohne anderweitige Deckung zuzulassen und für die Stumpfnäht die 0,8fache zulässige Beanspruchung des Werkstoffes zuzulassen. Die Ergebnisse der Versuchsreihe 1, für sich betrachtet, hätten für Stahl 37 selbst eine noch höhere Bewertung mit σ_{zul} ermöglicht, da selbst Nähte mit merklichen Schweißfehlern hohen Dauerbeanspruchungen lange standhielten. Erwägungen über die Schwierigkeiten bei der Herstellung von Stumpfnähten bei größeren Bauwerken und die damit unvermeidbaren Fehler, die immer noch bestehenden Schwierigkeiten, bei größeren Materialdicken diese Fehler nach Art und Umfang genügend genau festzustellen und ihre Auswirkung für die Festigkeit abzuschätzen und nicht zuletzt die praktisch vielfach vorhandenen äußeren Verspannungswirkungen bei der Schweißung von Stumpfstößen führten zu einer entsprechenden Geringerbewertung dieser Naht. Nachdem in der vorliegenden Untersuchung gezeigt wurde, daß die vielfach besonders gegen die freien Nahtenden bestehenden Bedenken nicht gerechtfertigt sind, da sich bei Regelbreiten für Gurtstöße beim Schweißen ohne äußere Verspannung gerade an diesen Stellen günstige Schweißspannungen von selbst ausbilden oder mit Sicherheit herstellen lassen, wird man Stumpfnähte, die ohne äußere Verspannungswirkung hergestellt werden können, bei einwandfreier Schweißung als die hochwertigste Verbindungsform ansehen müssen. Eine Aufgabe der Zukunft bleibt es, auch die Schweißung unter Verspannung soweit als möglich zu entwickeln, die Größe der zurückbleibenden Querverspannung und ihre Bedeutung für die Tragfähigkeit zu ermitteln.

Die Feststellungen über die Bedeutung der Längsnähte für die Dauerfestigkeit von Trägern führten zur Aufstellung der zusätzlichen Anforderungen an die Schweißdrähte für den Eisenbahnbrückenbau hinsichtlich der an längsgeschweißten Proben nachzuweisenden Dauerfestigkeit und damit zu einem für die Entwicklung der Schweißdrähte sehr wichtigen Gesichtspunkt. Die im Zusammenhang damit aufgestellte Vorschrift der Begrenzung der zulässigen Hauptspannung an den Halsnähten war nicht unbeeinflusst von den Ergebnissen dieser Versuche.

Die Untersuchung hat somit bereits wesentliche praktische Ergebnisse gezeitigt, ehe sie der Fachwelt im einzelnen vorgelegt werden konnte.

Druckfehlerberichtigung.

Seite 6, Zusammenstellung 1: Bei Träger C 1, C 2 Schweißdraht muß es statt „a“ richtig
„b“ heißen.

Versuche in Stahlbau B 7.