

DER STAHLBAU

Schriftleitung:
Geh. Regierungsrat Professor Dr.-Ing. A. Herwig, Berlin-Wilmersdorf, Sächsische Str. 43
Fernsprecher: 87 7421
Professor W. Rein, Breslau, Technische Hochschule. — Fernsprecher: Breslau 421 61

Beilage
zur Zeitschrift

DIE BAUTECHNIK

Fachschrift für das gesamte Bauingenieurwesen

Preis des Jahrganges 10 RM und Postgeld

11. Jahrgang

BERLIN, 18. März 1938

Heft 6

Über Forschungsarbeiten zur Entwicklung von Schweißelektroden, insbesondere für den Stahlbau. *)

Alle Rechte vorbehalten.

Von Dr.-Ing. K. L. Zeyen, VDI, Essen.

Für die Güte einer Schweißverbindung ist der verwendete Zusatzwerkstoff von ausschlaggebender Bedeutung. Die Schweißung konnte nicht eher in erfolgreichen Wettbewerb mit den älteren Verfahren zur Verbindung von Werkstücken, z. B. durch Vernieten oder Verschrauben, treten, bis hochwertige Schweißzusatzwerkstoffe zur Verfügung standen. Solche zu schaffen, bedurfte jedoch einer längeren Forschungs- und Entwicklungsarbeit, an der die Versuchsanstalt der Firma Krupp tätigen Anteil genommen hat. Im folgenden soll über den heutigen Stand dieser Arbeiten, soweit sie sich auf die Schweißung im Stahlbau beziehen, berichtet werden.

a) Der Einfluß der chemischen Zusammensetzung des Schweißgutes auf seine Gütewerte.

Aus zahlreichen neueren Veröffentlichungen geht hervor, daß für die Gütewerte einer Schweißnaht in erster Linie ihre chemische Zusammensetzung maßgebend ist. Letztere hängt von einer Reihe von Faktoren ab, wovon als wichtigste zu nennen sind:

1. die chemische Zusammensetzung des Schweißdrahtes und bei umhüllten Elektroden außerdem die Zusammensetzung der Umhüllung,
2. das Schweißverfahren, also ob es sich um Gasschmelzschweißung oder um elektrische Lichtbogenschweißung handelt,
3. die Schweißbedingungen bei dem betreffenden Schweißverfahren, d. h. bei der Gasschmelzschweißung die Brennergröße, die Brenner-einstellung und die Art der Schweißung (Vorwärts- oder Rückwärts-schweißung); bei der elektrischen Lichtbogenschweißung die Stromart und die Stromstärke, ferner bei Gleichstromschweißung noch die Polung,
4. die chemische Zusammensetzung des zu schweißenden Grundwerkstoffs, der ja mit aufgeschmolzen wird und mit dem abschmelzenden Schweißdraht zusammen die Schweißnaht bildet.

Zahlentafel 1 zeigt, wie unterschiedlich die Gütewerte einer Schweißnaht bei Verwendung des gleichen Schweißdrahtes werden, je nachdem ob dieser durch Gasschmelzschweißung oder durch elektrische Lichtbogenschweißung als blanke, leicht, mittelstark oder stark umhüllte Elektrode niedergeschweißt wird. Wenn man die Gütewerte von Proben aus Schweißgut vergleicht, um die es sich hier handelt, und zwar insbesondere die Gütewerte, auf die in neuerer Zeit besonderer Wert gelegt wird, nämlich Dehnung und Kerbschlagzähigkeit, so ergibt sich folgendes:

Bei den autogen geschweißten Proben, die wie alle anderen Proben nach

*) Vortrag vor dem Deutschen Ausschuß für Stahlbau in München am 10. Dezember 1937.

dem Schweißen nicht wärmebehandelt worden waren, wurden 18,5% Dehnung bei 11,8 mkg/cm² Kerbschlagzähigkeit festgestellt. Die elektrisch mit blanken Elektroden geschweißten Proben hatten nur 7,5% Dehnung und 1,5 mkg/cm² Kerbschlagzähigkeit. Nicht viel besser waren die Werte bei den mit leicht getauchten Elektroden geschweißten Proben, nämlich 11,2% Dehnung und 1,9 mkg/cm² Kerbschlagzähigkeit. Die mittelstark umhüllten Elektroden ergaben bereits 15% Dehnung und 6,1 mkg/cm² Kerbschlagzähigkeit, während die stark umhüllten, Schutzgas entwickelnden Elektroden sehr hohe Werte lieferten, nämlich 25% Dehnung und 9,6 mkg/cm² Kerbschlagzähigkeit.

Die Erklärung für diese sehr unterschiedlichen Gütewerte ergibt sich aus der chemischen Zusammensetzung des Schweißgutes. Schon die Gehalte an Kohlenstoff, Silizium und Mangan im Schweißgut weisen bei den verschiedenen Proben beträchtliche Unterschiede auf, weil diese Legierungselemente unter den verschiedenen Schweißbedingungen mehr oder weniger stark bei dem Abschmelzen des Schweißdrahtes oxydiert worden sind. Noch größeren Einfluß als die Gehalte an diesen Legierungselementen haben aber die Gehalte an Stickstoff und Sauerstoff, die das Schweißgut aufgenommen hat. Es zeigt sich in Übereinstimmung mit den Ergebnissen, die in letzter Zeit im Schrifttum veröffentlicht worden sind, daß die Zähigkeitswerte mit zunehmenden Sauerstoff- und Stickstoffgehalten abfallen. Dem Stickstoff kommt hierbei, wie später noch gezeigt werden wird, die größere Bedeutung zu, obwohl die Zahlenwerte der Stickstoffgehalte wesentlich unter denen der Sauerstoffgehalte liegen. Wenn man die Gütewerte der Proben aus Schweißgut vergleicht, die elektrisch einmal mit blanken Elektroden und einmal mit stark umhüllten, Schutzgas entwickelnden Elektroden erhalten wurden, so ergibt sich, daß im ersteren Falle bei einem Stickstoffgehalt von 0,140% und einem Sauerstoffgehalt von 0,210% nur 7,5% Dehnung, 17% Einschnürung und 1,5 mkg/cm² Kerbschlagzähigkeit erhalten wurden. Im letzteren Falle hatte aber das Schweißgut bei Gehalten von 0,013% Stickstoff und 0,099% Sauerstoff ein Mehrfaches dieser Werte, nämlich 25% Dehnung, 47% Einschnürung und 9,6 mkg/cm² Kerbschlagzähigkeit.

Zahlentafel 1. Veränderung der chemischen Zusammensetzung eines Schweißdrahtes und Festigkeitswerte von Proben aus Schweißgut.

Werkstoff	Chemische Zusammensetzung					Festigkeitswerte					
	C	Si	Mn	N ₂	O ₂	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Dehnung l=5d	Einschnürung	Kerbschlagzähigkeit (DVMR-Probe)	Brinellhärte
	%	%	%	%	%	kg/mm ²		%	%	mkg/cm ²	
Schweißdraht	0,13	0,07	0,66	0,005	0,021						
Schweißgut, autogen geschweißt	0,10	0,02	0,49	0,017	0,037	25,4	39,8	18,5	38	11,8	113
Schweißgut, elektrisch mit Gleichstrom geschweißt (blanke Elektrode)	0,03	0,02	0,20	0,140	0,210	30,8	41,8	7,5	17	1,5	135
Schweißgut, elektrisch mit Gleichstrom geschweißt (leicht getauchte Elektrode)	0,04	0,02	0,20	0,120	0,180	29,8	47,7	11,2	21	1,9	129
Schweißgut, elektrisch mit Gleichstrom geschweißt (Mantelelektrode mit mittelstarker Umhüllung)	0,04	0,04	0,25	0,079	0,140	30,8	43,8	15,0	30	6,1	131
Schweißgut, elektrisch mit Gleichstrom geschweißt (Schutzgas entwickelnde Mantelelektrode)	0,06	0,07	0,36	0,013	0,099	32,8	46,9	25,0	47	9,6	140

b) Eine Verbesserung der Zähigkeitswerte einer Schweißnaht durch Wärmebehandlung ist von ihren Gehalten an Stickstoff und Sauerstoff abhängig.

Im Stahlbau hat man die Möglichkeit einer nachträglichen Wärmebehandlung von Schweißungen bisher wohl kaum in Erwägung gezogen bzw. eine solche praktisch kaum durchgeführt. Es läßt sich aber heute schon sagen, daß eine Wärmebehandlung von Schweißungen auch im Stahlbau in Zukunft zum mindesten in Sonderfällen in Frage kommen wird. Es soll deshalb an einigen Beispielen aus der besprochenen Versuchsreihe gezeigt werden, daß die Möglichkeit einer Verbesserung der Güte einer Schweißnaht von ihren Gehalten an Stickstoff und Sauerstoff weitgehend abhängig ist. Bild 1 läßt erkennen, daß bei den elektrisch mit blanken Elektroden geschweißten Proben im Gefügebild zahlreiche Stickstoffnadeln und oxydische Ausscheidungen enthalten sind, und daß sich weder durch normalisierendes Glühen noch durch Spannungsfreiglühen eine nennenswerte Verbesserung der Zähigkeitswerte des Schweißgutes erreichen ließ. Die Proben hatten 0,140% Stickstoff und 0,210% Sauerstoff.

Aus Bild 2, das die Ergebnisse der Wärmebehandlungsversuche an den mit mittelstark umhüllten Elektroden hergestellten Proben aus Schweißgut zeigt, geht hervor, daß auch bei 0,079% Stickstoff und 0,140% Sauerstoff durch Wärmebehandlung keine Verbesserung der Zähigkeitswerte erreicht werden konnte. Hier ist teilweise erst durch die Wärmebehandlung Stickstoff in Form von Nadeln zur Ausscheidung gebracht worden, der in den nicht wärmebehandelten Proben größtenteils in gelöster Form vorhanden war. Als Folge davon ist bei den wärmebehandelten Proben die Kerbschlagzähigkeit gegenüber dem nicht wärmebehandelten Zustand nicht verbessert worden, sondern noch abgefallen. Es sei hierzu bemerkt, daß nach Angaben im Schrifttum Stickstoffnadeln, die im Gefüge nicht wärmebehandelter Schweißnähte auftreten, durch bestimmte Wärmebehandlungsarten auch in Lösung gebracht werden können.

Bild 3 zeigt, daß im Gegensatz zu den in Bild 1 u. 2 gebrachten Beispielen bei niedrigen Stickstoffgehalten eine Wärmebehandlung die an sich schon sehr hoch liegenden Zähigkeitswerte von Schweißnähten noch verbessern kann. Bei diesen, mit stark umhüllten, Schutzgas entwickelnden Elektroden geschweißten Proben, die nur noch 0,013% Stickstoff bei 0,099% Sauerstoff hatten, zeigt das Gefüge in allen Behandlungszuständen keine Ausscheidungen von Stickstoffnadeln mehr.

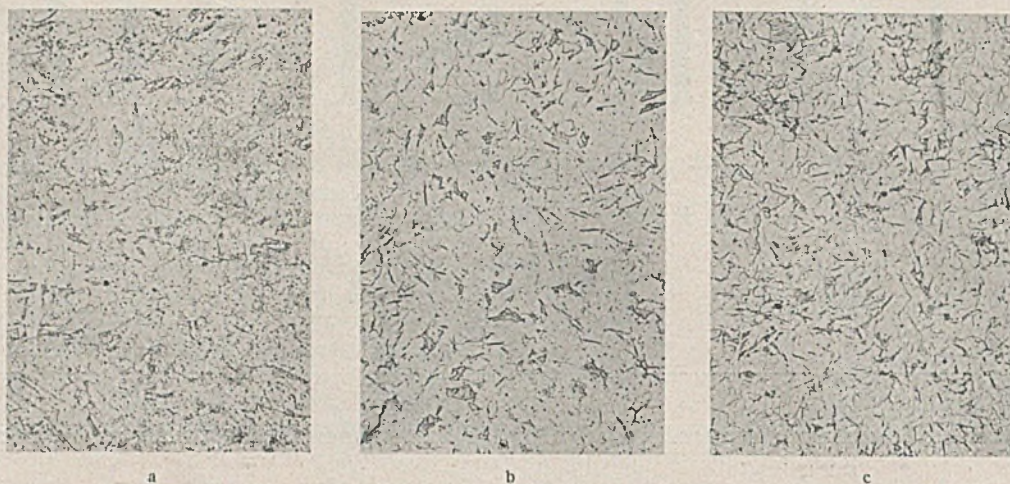
c) Schweißzusatzwerkstoffe für den Stahlbau.

Man hat in den letzten Jahren in fast allen Ländern ein Übergehen von billigen Schweißdrähten, die Schweißnähte mit verhältnismäßig geringen Gütewerten ergeben, zu hochwertigeren Schweißdrähten feststellen können. Aus Zahlentafel 2 geht z. B. hervor, daß in den Vereinigten Staaten von Amerika der Mengenanteil blanker Elektroden, der noch im Jahre 1933 26,7% des Gesamtabsatzes ausmachte, in der ersten Hälfte 1935 auf 15,3% zurückgegangen ist. Bei den sehr leicht oder normal umhüllten Elektroden ist eine ähnliche Rückentwicklung festzustellen.

Zahlentafel 2. Herstellung von Schweißelektroden in USA.
nach J. Muller.

(The Weld. Eng. 21, 1936, Nr. 1, S. 30.)

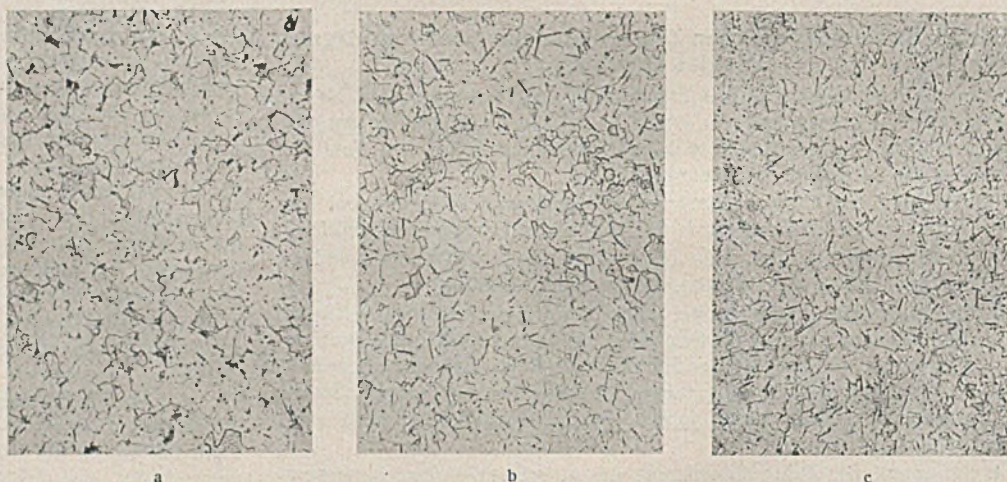
Art der Elektroden	Anteil in %		
	1933	1934	1. Hälfte 1935
Blank für Handschweißung	26,7	20,3	15,3
Blank für Automatschweißung	5,2	3,3	4,0
Sehr schwach umhüllt (dust coated)	15,2	14,9	12,0
Normal umhüllt (standard coating)	14,2	7,8	5,9
Stark ummantelt	32,6	47,7	57,7
Für legierte Stähle mit bis zu 1,25% Legierungselementen (außer Fe u. C)	2,5	2,1	2,2
Für legierte Stähle mit über 1,25% Legierungselementen (außer Fe u. C)	3,4	3,2	2,1
Für legierte Stähle mit über 3% Cr	0,1	0,7	0,7



Lichtbogenschweißung mit blanken Elektroden am Minuspol.
Stickstoffgehalt der Proben 0,14%.

	a Nicht wärme- behandelt	b Normalisiert (1/2 Std. 900 °/L.)	c Geglüht (2 Std. 600 °/L.)
Streckgrenze kg/mm ²	30,8	27,8	27,8
Zugfestigkeit kg/mm ²	41,8	41,8	39,8
Dehnung % (L = 5 d)	7,5	9,5	7,5
Einschnürung %	17	23	14
Kerbschlagzähigkeit mkg/cm ² (DVMR-Probe)	1,5	1,4	1,9
Brinellhärte	135	125	119

Bild 1.



Lichtbogenschweißung mit mittelstark umhüllten Elektroden am Pluspol.
Stickstoffgehalt der Proben 0,079%.

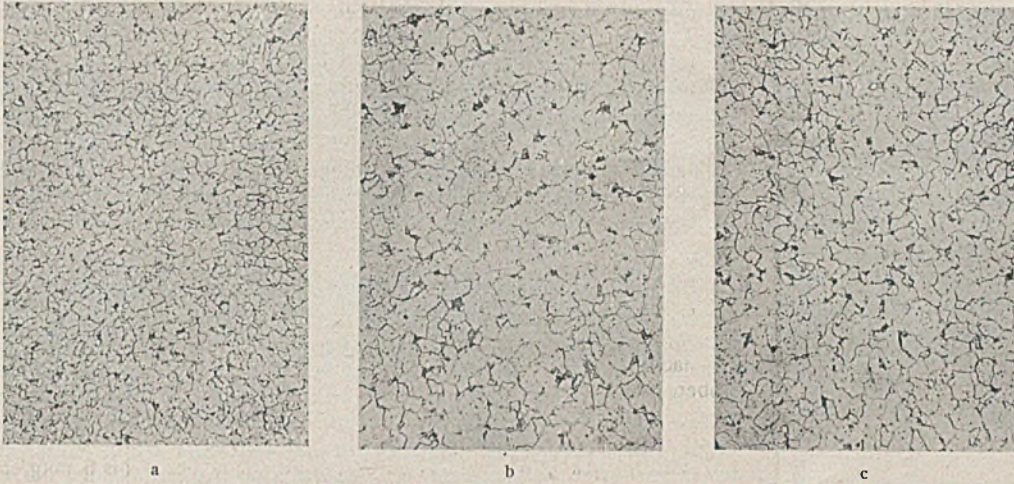
	a Nicht wärme- behandelt	b Normalisiert (1/2 Std. 900 °/L.)	c Geglüht (2 Std. 600 °/L.)
Streckgrenze kg/mm ²	30,8	28,8	27,8
Zugfestigkeit kg/mm ²	43,8	40,8	40,8
Dehnung % (L = 5 d)	15	16	16
Einschnürung %	30	28	27
Kerbschlagzähigkeit mkg/cm ² (DVMR-Probe)	6,1	5,6	5,7
Brinellhärte	131	127	119

Bild 2.

In derselben Zeit hat aber der Mengenanteil stark umhüllter Elektroden, die hochwertige Schweißungen ergeben, von 32,6 auf 57,7% zugenommen.

Eine ganz ähnliche Entwicklung läßt sich bei den Schweißbetrieben der Firma Krupp in den letzten Jahren verfolgen. Insbesondere im Stahlbau wird hier heute wohl ausschließlich mit stark umhüllten Elektroden geschweißt.

Welches Schweißverfahren und welche Sorten von Zusatzwerkstoffen kommen nun für den Stahlbau in Frage? Die Autogenschweißung wird im Stahlbau schon aus wirtschaftlichen Gründen auf Sonderfälle beschränkt bleiben, so daß eine Besprechung der Zusatzwerkstoffe für die elektrische Lichtbogenschweißung hauptsächlich von Interesse sein wird. Die Wahl der Elektroden richtet sich im Stahlbau nach den Anforderungen, die der Besteller eines Bauwerks an die mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindung stellt. Der Auftraggeber schreibt im allgemeinen keinen bestimmten Elektrodentyp oder gar eine bestimmte Elektrodenmarke vor, sondern verlangt bei der Prüfung von geschweißten Proben die Erreichung



Lichtbogenschweißung mit stark umhüllten, Schutzgas entwickelnden Elektroden am Pluspol. Stickstoffgehalt der Proben 0,013 %.

	a Nicht wärme- behandelt	b Normalisiert (1/2 Std. 900 °/L.)	c Geglüht (2 Std. 600 °/L.)
Streckgrenze kg/mm ²	32,8	32,8	35,7
Zugfestigkeit kg/mm ²	46,9	46,3	48,1
Dehnung % (L = 5 d)	25	26	28
Einschnürung %	47	49	59
Kerbschlagzähigkeit mkg/cm ² (DVMR-Probe)	9,6	9,9	10,4
Brinellhärte	140	131	127

Bild 3.

bestimmter Mindestwerte, z. B. für Zugfestigkeit, Biege- und Kerbschlagzähigkeit der Stumpfschweißverbindung und für Zugfestigkeit der verschiedenen Arten von Kehlnahtverbindungen. Hierbei werden von deutschen Auftraggebern die „Vorschriften für geschweißte Stahlhochbauten“ (DIN 4100), die „Vorschriften für geschweißte, vollwandige, stählerne Straßenbrücken“ (DIN 4101) und die „Vorläufigen Vorschriften für geschweißte, vollwandige Eisenbahnbrücken“ (gültig ab 20. November 1935) als Grundlage genommen. Zu den Forderungen auf Erreichung bestimmter Werte bei statischer Prüfung von Schweißverbindungen ist im Stahlbau, insbesondere im Brückenbau, in neuerer Zeit die Forderung nach dynamischen Prüfungen, z. B. nach Prüfung der Zugschweißfestigkeit getreten. Es ist einleuchtend, daß die Schweißbetriebe aus dem Stahlbau es vorziehen, für ihre Bauwerke Elektrodenarten zu verwenden, die ihnen die Erreichung der von den Abnehmern verlangten Prüfwerte mit der größten Sicherheit ermöglichen, anstatt billigere Elektroden zu nehmen, mit denen die Werte unter günstigen Schweißbedingungen vielleicht auch erreicht werden können, aber doch nicht mit der gleichen Sicherheit.

Berücksichtigt muß ferner noch werden, daß der Ersteller eines Bauwerks im Stahlbau dem Auftraggeber ja nicht allein einmalig an Hand besonders hergestellter Proben den Nachweis erbringen muß, daß der von ihm gewählte Werkstoff und die von ihm gewählte Elektrode die geforderten Werte in der Schweißverbindung ergibt, sondern daß die Schweißarbeiten des betreffenden Betriebes in gewissen Abständen geprüft werden und dabei auch bestimmte Prüfwerte erreichen müssen.

d) Prüfverfahren für Schweißverbindungen.

Über den Wert dieses oder jenes Prüfverfahrens für Schweißverbindungen gehen die Meinungen heute noch stark auseinander. Einheitlichkeit besteht wohl nur darin, daß die Forderung nach gleicher Zugfestigkeit in Stumpf-Schweißverbindung und Grundwerkstoff an sich berechtigt und bei dem heutigen Stand der Entwicklung meist auch erfüllbar ist. Der Fallversuch wird als das, als was er angesehen wird, nämlich als Maßstab für die Verformbarkeit einer Schweißverbindung, vielfach abgelehnt. Sehr umstritten ist ferner der Wert des Kerbschlagversuchs für Schweißungen. Einheitlichkeit besteht andererseits wieder darin, daß für Bauteile, die Schwingungsbeanspruchungen ausgesetzt sind, eine dynamische Prüfung der Schweißverbindung sehr wertvoll ist. Als solche wird meist die Ursprungsfestigkeit auf Zug ermittelt.

e) Seelenelektroden und Mantelelektroden.

Im Stahlbau haben zwei der auf dem Markt befindlichen Elektroden-typen besondere Bedeutung gewonnen,

1. die stark umhüllte (Mantel-) Elektrode,
2. die Seelenelektrode.

F. Leitner¹⁾ brachte in einem im Jahre 1936 veröffentlichten Aufsatz ausführliche Mitteilungen über Neuentwicklung legierter Seelenelektroden.

¹⁾ Z. d. VdI 80 (1936), S. 851.

In einem Anfang 1937 von R. Hackert und dem Verfasser veröffentlichten Aufsatz²⁾ wurde durch vergleichende Versuche mit den von Leitner untersuchten legierten Seelenelektroden und mit neuzeitlichen Mantelelektroden nachgewiesen, daß auch auf dem Gebiete der Mantelelektroden in neuerer Zeit ganz erhebliche Fortschritte gemacht worden sind. Im folgenden soll nun über weitere, bisher noch unveröffentlichte Versuche mit Elektroden berichtet werden, die für den Stahlbau in Frage kommen.

f) Kerbschlagzähigkeit in der Schweißnaht bei Prüftemperaturen zwischen -70 und +400°.

Zunächst sollen Versuche zur Ermittlung der Kerbschlagzähigkeit in Schweißnähten wiedergegeben werden, ohne daß der Verfasser jedoch damit zum Ausdruck bringen will, daß er die Kerbschlagprobe für das wichtigste Kriterium für Schweißverbindungen ansieht. Es wurden 12 mm dicke Bleche aus Flußstahl I mit verschiedenen Elektroden stumpf zusammengeschweißt und aus diesen Schweißverbindungen Kerbschlagproben in der Weise hergestellt, daß die Schweißnaht in der Mitte der Proben und der Kerb im Grunde der Schweißnaht parallel zu ihr lag. Bild 4 zeigt die Lage und Abmessungen der Kerbschlagproben. Die Prüfung der Proben erfolgte im Temperaturbereich zwischen -70 und +400°. Bild 5 gibt die bei verschiedenen Elektroden erhaltenen Werte wieder. Der Kurvenverlauf ist in allen Fällen ähnlich insofern, als die Höchstwerte der Kerbschlagzähigkeit in der Schweißnaht durchweg im Temperatur-

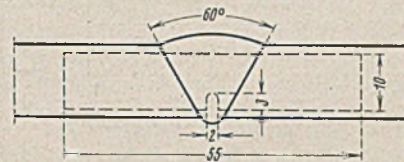


Bild 4. Lage und Abmessungen der Kerbschlagprobe.

gebiet zwischen +20 und +200° liegen. Zu tieferen Prüftemperaturen erfolgt ein steiler und zu höheren Temperaturen ein weniger steiler Abfall. Die verschiedenen Elektroden verhalten sich aber nicht nur in bezug auf die Höhe der Werte sehr verschieden, sondern auch in bezug auf den Verlauf der abfallenden Kurvenäste. Die beiden unteren Kurven beziehen sich auf blanke (Kurve A) bzw. leicht getauchte (Kurve B) Elektroden der Reichsbahn-Güteklasse E 37 (Vornorm DIN 1913, Güteklasse E 37 und E 42). Die Schweißnaht-Kerbschlagzähigkeit liegt bei diesen blanken und leicht getauchten unlegierten Elektroden in dem Temperaturbereich zwischen +50 und +200° zwischen 3 und 4 mkg/cm². Die Werte fallen schon bei 0° auf etwa die Hälfte ab und liegen bei -20° nur noch bei

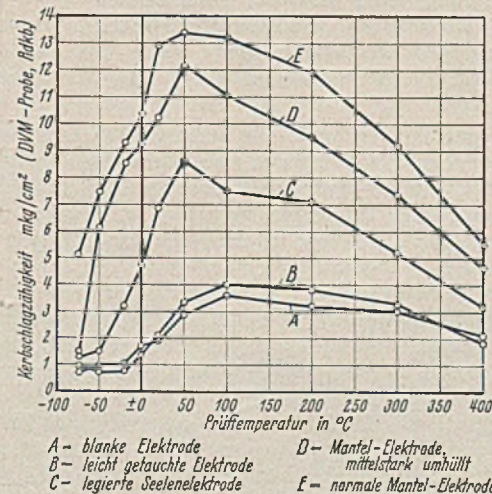


Bild 5. Kerbschlagzähigkeit in elektrisch geschweißten Stumpfnähten bei verschiedenen Arten von Schweißelektroden. (12 mm dicke Bleche aus Flußstahl I.)

1 mkg/cm². Die dritte Kurve von unten (C) bezieht sich auf eine legierte Seelenelektrode, und zwar nicht auf dieselbe, wie sie in den Aufsätzen von Leitner und von Hackert und dem Verfasser besprochen wurde, sondern auf eine Weiterentwicklung derselben. Diese neue Seelenelektrode ist von der Deutschen Reichsbahn für die Güteklasse E 52 zugelassen. Bei dieser Elektrode liegt nach unseren Untersuchungen die Schweißnaht-Kerbschlagzähigkeit in dem Temperaturgebiet von +20 bis +200° schon zwischen 7 und 9 mkg/cm², also etwa doppelt so hoch wie bei den untersuchten blanken und leicht getauchten Elektroden oder bei unlegierten Seelenelektroden, aber auch hierbei erfolgt schon bei einer Prüftemperatur von 0° ein starker Abfall der Kerbschlagzähigkeit. Bei -50° ist die Kerbschlagzähigkeit bereits auf 1,5 mkg/cm² abgesunken. Der vierte Kurvenzug von unten (D) bezieht sich auf eine Mantelelektrode mit mittelstarker Umhüllung, die im Stahlbau vielfach verwendet wird (Reichsbahn-

²⁾ Techn. Mitt. Krupp 5 (1937), S. 22.

Güteklasse E 37 h und E 52 h). Diese Elektrode ergab bei Prüftemperaturen von + 50 und + 100° Schweißnaht-Kerbschlagzähigkeiten über 11 mkg/cm², aber auch einen recht steilen Abfall zu tiefen Prüftemperaturen, so daß bei - 50° nur noch etwas über 6 und bei - 70° nur noch 1,5 mkg/cm² Schweißnaht-Kerbschlagzähigkeit vorhanden war.

Die oberste Kurve (E) bezieht sich auf eine Mantelelektrode, wie sie von Kruppschen Betrieben meistens für Schweißungen im Stahlbau verwendet wird (Reichsbahn-Güteklassen E 34 h, E 37 h, E 52 h). Diese Elektrode wurde u. a. bei der Strelasundbrücke und den beiden neuesten Rheinbrücken benutzt. Im Temperaturgebiet zwischen + 20 und + 100° ergab diese Elektrode eine Schweißnaht-Kerbschlagzähigkeit von etwa 13 mkg/cm². Im Gegensatz zu allen anderen bisher besprochenen Elektroden wurden bei dieser Mantelelektrode auch bei der Prüftemperatur von - 70° noch etwa 5 mkg/cm² Kerbschlagzähigkeit gefunden. Ähnliche, aber mehr in der Größenordnung der Kurve D liegende Werte für die Schweißnaht-Kerbschlagzähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur bei Verwendung einer Mantelelektrode wurden kürzlich auch von H. Aysslinger, P. Jessen und W. Stöckmann³⁾ mitgeteilt.

g) Einfluß einer Wärmebehandlung auf die Kerbschlagzähigkeit von Schweißnähten bei Mantelelektroden und legierten Seelenelektroden.

Wir wollen nun die beiden Elektrodentypen etwas näher betrachten, die für den Stahlbau heute besonders bemerkenswert erscheinen müssen, nämlich die legierte Seelenelektrode und die normale Mantelelektrode, beides Elektroden neuesten Entwicklungsstandes. Es handelt sich um die in Bild 5 mit C und E bezeichneten Kurven. Es ist recht interessant, bei

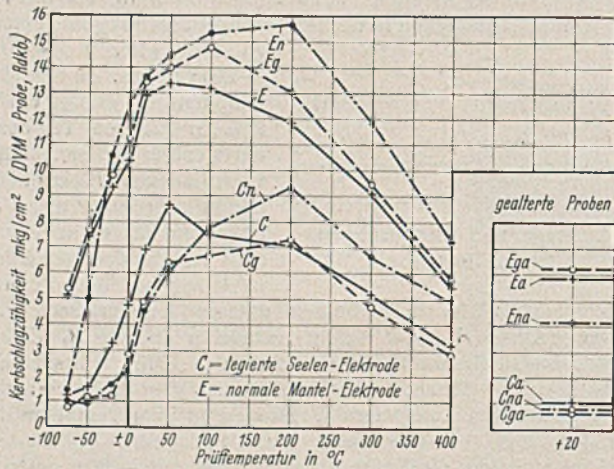


Bild 6. Kerbschlagzähigkeit in elektrisch geschweißten Stumpfnähten bei Verwendung von Mantelelektroden und legierten Seelenelektroden. (12 mm dicke Bleche aus Flußstahl I.)

diesen beiden Elektrodentypen zu verfolgen, wie sich die Temperatur-Kerbschlagzähigkeitswerte der Schweißnähte durch eine Wärmebehandlung ändern. Die Ergebnisse dieser Versuche sind deshalb auch für den Stahlbau von Bedeutung, weil, wie schon gesagt wurde, auch hier in Zukunft in bestimmten Fällen eine nachträgliche Wärmebehandlung von Schweißungen in Frage kommen wird. Auf eine andere Frage, nämlich die der Durchführung von Schweißungen im Stahlbau nach Vorwärmung der Schweißstelle, wird später noch eingegangen werden. In Bild 6 sind die Kurven von Schweißnaht-Kerbschlagzähigkeiten vor und nach der Wärmebehandlung wiedergegeben. Hierin sind die voll ausgezogenen Kurven C und E die gleichen wie in Bild 5. Sie beziehen sich auf die legierte Seelenelektrode (C) und die Mantelelektrode (E) im nicht wärmebehandelten Zustand. Bei Kurven Cg und Eg (gestrichelt ausgezogen) wurden die Proben spannungsfrei geblüht (2 Std. 600°/Ofen) und bei Kurven Cn und En (strichpunktiert ausgezogen) erfolgte eine normalisierende Glühung (1/2 Std. 900°/L.). Aus den Kurven ergibt sich folgendes: Bei den nicht wärmebehandelten Schweißproben liegen die Absolutwerte der Schweißnaht-Kerbschlagzähigkeit bei der Mantelelektrode (E) in allen Fällen erheblich höher als bei der legierten Seelenelektrode (C). Bei der Mantelelektrode wurde durch ein Spannungsfreiglühen bei allen Prüftemperaturen noch eine Verbesserung dieser Werte gefunden (gestrichelte Kurve Eg). Durch normalisierende Glühung wurden bei der Mantelelektrode bei Prüftemperaturen zwischen - 20 und + 400° noch höhere Schweißnaht-Kerbschlagzähigkeiten erhalten als bei den ungeglühten oder spannungsfrei geblühten Proben (strichpunktierte Kurve En). Bei Prüftemperaturen von - 50 und - 70° fielen dagegen die Schweißnaht-Kerbschlagzähigkeiten

³⁾ Mitt. Forsch.-Anst. GHH, Konzern 4 (1936), S. 220.

der normalisierten, mit der Mantelelektrode geschweißten Proben erheblich ab. Ähnliche Ergebnisse fand bei Mantelelektroden auch J. Quadflieg⁴⁾.

Bei der legierten Seelenelektrode sind bei allen Prüftemperaturen von + 50° bis - 70° die Schweißnaht-Kerbschlagzähigkeiten durch beide Arten von Wärmebehandlung schlechter als im ungeglühten Zustand geworden. Zwischen + 100 und + 400° ergab zwar die normalisierende Glühbehandlung (strichpunktiert ausgezogene Kurve Cn) eine Erhöhung der Schweißnaht-Kerbschlagzähigkeit gegenüber dem nicht wärmebehandelten Zustand, aber das Spannungsfreiglühen brachte keinerlei Verbesserung (gestrichelte Kurve Cg).

h) Schweißnaht-Kerbschlagzähigkeit nach Alterung.

Im rechten Teil von Bild 6 sind noch einige Werte gealterter Kerbschlagproben wiedergegeben, und zwar wurde die Alterung (10%iges Stauchen und dann 1/2 stündige Glühung bei 250°) an Proben vorgenommen, die nach der Schweißung nicht wärmebehandelt wurden, wie auch an Proben, die auf die beiden verschiedenen Arten wärmebehandelt worden waren. Die bei + 20° festgestellte Schweißnaht-Kerbschlagzähigkeit dieser gealterten Proben liegt bei der legierten Seelenelektrode bei nur 1 bis 1,5 mkg/cm², bei der Mantelelektrode aber bei 4 bis 6 mkg/cm².

Man könnte die Frage stellen, ob die mechanische Alterung in Schweißnähten bei Schweißungen im Stahlbau überhaupt eine Rolle spielen kann. W. Kleinfenn⁵⁾ hat in seiner Dissertation festgestellt, daß diese Frage für Schweißungen jeder Art von Bedeutung ist, weil bei einer durch ein Schmelzschweißverfahren hergestellten Schweißnaht durch das Schrumpfen eine Kaltverformung sowohl der Naht als auch des Grundwerkstoffes eintreten kann. Ähnliche Feststellungen machte J. Quadflieg⁴⁾. Versuche mit gealterten Schweißproben haben deshalb mehr als nur rein akademisches Interesse.

i) Der Stickstoffgehalt des Schweißgutes erklärt, warum die legierte Seelenelektrode und die Mantelelektrode sich bei einer Wärmebehandlung der Schweißungen so verschieden verhalten.

Die chemische Zusammensetzung des Schweißgutes gibt genau so wie bei den Versuchen, über die eingangs berichtet wurde, Aufklärung darüber, warum die legierte Seelenelektrode und die Mantelelektrode sich so verschieden gegenüber einer Alterung verhalten. In Zahlentafel 3 sind die Analysenwerte von Proben aus Schweißgut, hergestellt mit beiden Elektroden, zusammengestellt. Der Stickstoffgehalt, der bei der legierten Seelenelektrode 0,11% beträgt, verhindert bei Prüftemperaturen bis zu + 50° ganz allgemein und bei höheren Prüftemperaturen vielfach auch noch eine Verbesserung der Kerbschlagzähigkeit der Schweißnaht durch eine Glühbehandlung, die bei dem Schweißgut aus der Mantelelektrode mit nur 0,026% N₂ fast ausnahmslos eingetreten ist. Die tiefen Werte der gealterten Proben müssen bei der legierten Seelenelektrode ebenfalls auf ihren Stickstoffgehalt zurückgeführt werden. Da der Sauerstoffgehalt des Schweißgutes aus der legierten Seelenelektrode erheblich unter dem aus der Mantelelektrode liegt, wird dadurch gleichzeitig nachgewiesen, daß dem Stickstoff in Schweißnähten größere Bedeutung zukommt als dem Sauerstoff.

Zahlentafel 3. Chemische Zusammensetzung des Schweißgutes.

Art der Elektrode	C %	Si %	Mn %	P %	S %	N ₂ %	O ₂ %
Mantelelektrode (E)	0,10	0,08	0,50	0,025	0,030	0,026	0,094
Legierte Seelenelektrode (C)	0,09	0,04	1,17	0,024	0,021	0,110	0,048

k) Bestehen bei Schweißungen Zusammenhänge zwischen Kerbschlagzähigkeit und Biegewinkel?

Die zuletzt berichteten Versuche sind ein Auszug aus umfangreichen, noch laufenden Versuchen über Kerbschlagzähigkeit, Biegewinkel und Dauerfestigkeit bei Schweißungen nach verschiedenen Schweißverfahren und mit den verschiedenartigsten Zusatzwerkstoffen. Bei diesen Versuchen soll insbesondere geprüft werden, inwieweit Zusammenhänge zwischen den Prüfwerten, die z. Z. bei Schweißungen besondere Beachtung finden, bestehen. In Zahlentafel 4 ist für Flußstahl I, geschweißt mit verschiedenen Elektroden, nur die Schweißnaht-Kerbschlagzähigkeit bei + 20° angegeben, ferner der Biegewinkel beim Dornbiegeversuch und beim Freibiegeversuch mit belassenen und mit abgearbeiteten Schweißraupen. Die Werte sind recht aufschlußreich. Für den Fallversuch ergibt sich zunächst, daß die Freibiegeprobe durchweg einen höheren Biegewinkel als die Dornbiegeprobe liefert. Zusammenhänge zwischen der Kerbschlagzähigkeit in der Schweißnaht und dem Biegewinkel beim Fallversuch bestehen nur insofern, als im nicht wärmebehandelten Zustand der Proben die niedrigste Kerbschlagzähigkeit auch dem geringsten Biegewinkel entspricht.

⁴⁾ Beitrag zur Kerbzähigkeit von Schweißverbindungen unter besonderer Berücksichtigung weichen Kesselblechs. Dissertation, Aachen Dezember 1936.

⁵⁾ Dissertation, Aachen 1933.

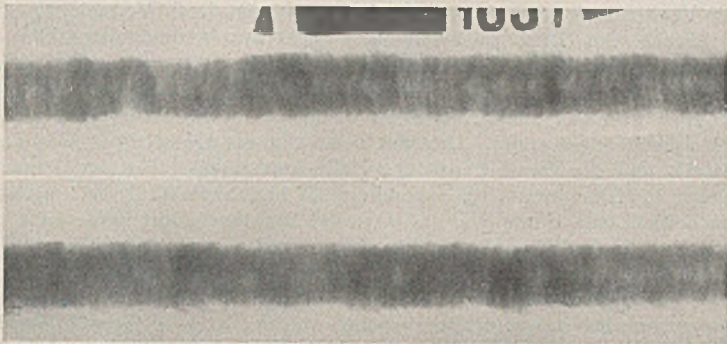


Bild 7. Röntgenaufnahmen eines auf der Baustelle in vertikaler Lage geschweißten Hauptträgerstoßes der Brücke über die Müggelspree.

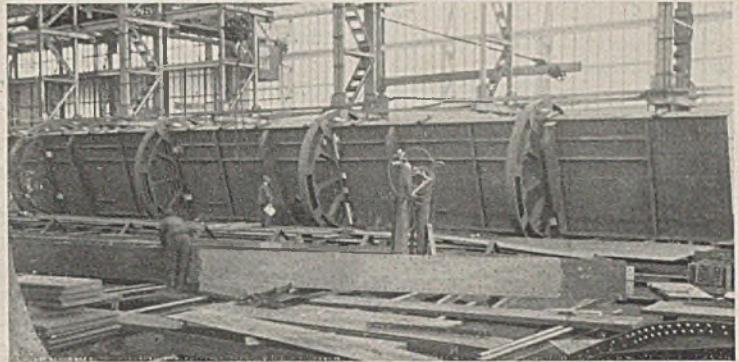


Bild 8. Drehvorrichtung für große geschweißte Brückenträger.

Zahlentafel 4. Biegewinkel von elektrischen Stumpfschweißungen, 12 mm dicke Bleche aus Flußstahl I.

Art der verwendeten Elektrode	Wärmebehandlung der Proben nach dem Schweißen	Kerbschlagzähigkeit in der Schweißnaht mkg/cm ² bei +20° (DVMR-Probe)	Biegewinkel in Grad			
			Schweißraupe, belassen		Schweißraupe, abgearbeitet	
			Dornbiegeprobe	Freibiegeprobe	Dornbiegeprobe	Freibiegeprobe
Blank (A)	Keine	2,0	61	78	22	53
Leicht getaucht (B)	Keine	2,1	65	114	45	91
Legierte Seelenelektrode (C)	Keine	6,85	89	118	151	154
	Geglüht	4,8	110	120	135	> 180
	Normalisiert	4,5	180	180	83	180
Mantelelektrode (mittelstark umhüllt) (D)	Keine	10,3	180	180	> 180	> 180
	Geglüht	10,5	180	180	> 180	> 180
	Normalisiert	10,6	180	180	> 180	> 180
Normale Mantelelektrode (E)	Keine	12,9	180	180	> 180	> 180
	Geglüht	13,5	180	180	> 180	> 180
	Normalisiert	13,65	180	180	> 180	> 180

Bei höherer Kerbschlagzähigkeit differenziert der Fallversuch nicht mehr; denn es zeigt sich, daß in allen den Fällen, wo die Schweißnaht-Kerbschlagzähigkeit bei 10 mkg/cm² und höher liegt, 180°-Biegewinkel mit bzw. ohne Anriß erreicht werden. Bei den wärmebehandelten Proben steigt der Biegewinkel gegenüber den nicht wärmebehandelten Proben durchweg an, wenn er nicht bei letzteren auch schon 180° betrug. Wie die Werte für die legierte Seelenelektrode ausweisen, kann aber die gleiche Wärmebehandlung, die den Biegewinkel erhöht, gleichzeitig die Schweißnaht-Kerbschlagzähigkeit herabsetzen.

1) Senkrecht- und Überkopfschweißbarkeit von Elektroden.

Als Vorzug einer Seelenelektrode gegenüber einer Mantelelektrode wird vielfach mit Recht hervorgehoben, daß der normale Schweißer mit der Seelenelektrode leichter Schweißungen in anderer als in waagerechter Lage durchführen kann. Hochwertige Mantelelektroden in der Ausführung, in der sie bis vor einiger Zeit erhältlich waren, erforderten in der Tat bei Schweißungen in nicht waagerechter Lage von dem Schweißer ganz erhebliche Einübung, wenn auch viele Überkopfschweißungen mit solchen

Mantelelektroden mit durchaus befriedigendem Ergebnis, allerdings nur von geübten Schweißern, durchgeführt worden sind. Hierfür legen eine Reihe von Stahlbauten, bei denen Überkopfschweißungen nicht zu vermeiden waren, Zeugnis ab.

Als Beleg seien im Bild 7 Röntgenaufnahmen der vertikalen Hauptträgerstoße einer Brücke über die Müggelspree wiedergegeben, die die Firma Krupp-Druckenmüller mit normalen Mantelelektroden geschweißt hat. Man erkennt aus den Röntgenaufnahmen, daß diese Vertikal-schweißungen ganz einwandfrei sind.

In den Betrieben der Firma Krupp wurde bis vor kurzer Zeit aber trotzdem vorgezogen, Überkopfschweißungen mit Mantelelektroden zu vermeiden. In Bild 8 ist eine der bekannten Drehvorrichtungen wiedergegeben, wie sie bei vielen Firmen bei der Schweißung von Brückenträgern in der Werkstatt verwendet werden. Es ist durch die Veröffentlichungen von G. Schaper⁶⁾ und Brückner⁷⁾ bekannt, daß der Stahlbau der Friedrich-Alfred-Hütte sogar den ganzen von ihm erstellten Teil der Strelasundbrücke auf der Dänholmseite, der 270 m lang und 1100 t

Zahlentafel 5. Durch die Röntgenprüfung festgestellte, nicht einwandfreie Schweißnähte bei den Baustellenschweißungen der Rügendammbücke.

Hergestellt wurden insgesamt		Davon waren nicht einwandfrei		Geschweißt
Im Stegblech	Im Gurt	Im Stegblech	Im Gurt	
28,8 m	12,20 m	14,4 m = 50 %	3,06 m = 25 %	Ohne Drehvorrichtungen In Drehvorrichtungen
115,2 m	24,65 m	11,5 m = 10 %	0,77 m = 3,1 %	

schwer war, aus den einzelnen in der Werkstatt hergestellten geschweißten Trägern auf einem Damm vor der Brücke in Wälzringen zusammengesetzt hat, wodurch Schweißungen in nicht waagerechter Lage vermieden werden konnten. Bild 9 zeigt eine Aufnahme dieser Montageschweißungen in Wälzringen. Daß das von der Firma Krupp erstrebte Ziel durch Verwendung der zweifellos umständlichen und teuren Schweißung in Wälzringen bei den Baustellenschweißungen erreicht worden ist, zeigt

⁶⁾ Elektroschweißung 8 (1937), S. 1.

⁷⁾ Bautechn. 15 (1937), S. 265, 303 u. 336.



Bild 9. Baustellenschweißungen an Brückenträgern für die Rügendammbücke.

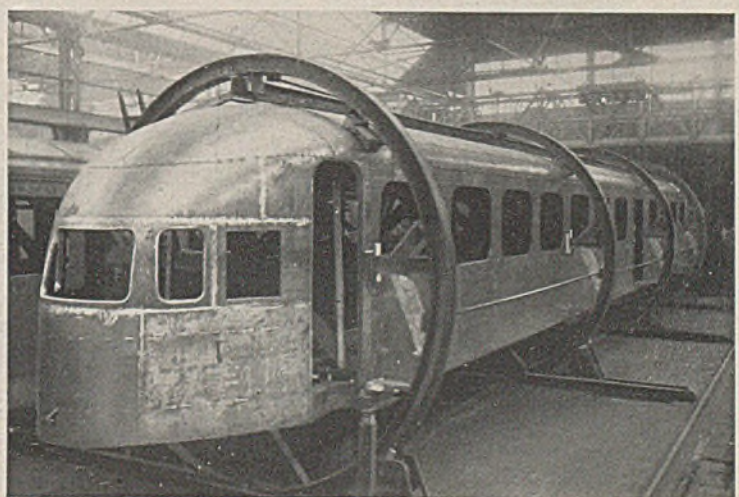


Bild 10. Schweißung von Fahrzeugen in Drehgestellen bei der Firma Werkspoor.

Zahlentafel 5. Nach der Veröffentlichung von Brückner erwiesen sich von den Baustellennähten an der Rügendammbrücke bei der Röntgenprüfung als fehlerhaft:

im Stegblech von 28,8 m Nähten, die ohne Drehvorrichtung geschweißt waren, 14,4 m = 50%.

Dagegen wurden in Drehvorrichtung 115,2 m Stegblechnähte geschweißt, von denen nur 11,5 m = 10% nicht fehlerfrei waren. im Gurt wurden 12,2 m Nähte ohne Drehvorrichtung geschweißt. Davon waren 3,06 m = 25% nicht einwandfrei. In Drehvorrichtung wurden 24,65 m geschweißt, wovon nur 0,77 m = 3,1% bei der Röntgenprüfung beanstandet wurden. Aber auch bei diesen 3,1% Gurtnähten waren die durch das Röntgenbild aufgedeckten Fehler nur so unbedeutend, daß eine Ausbesserung dieser Nähte nicht erforderlich erschien.

Man hat übrigens auch in anderen Industriezweigen die Vorteile, die bei Verwendung hochwertiger Mantelelektroden durch Vermeidung aller Senkrecht- und Überkopfschweißungen nicht nur in qualitativer Hinsicht erhalten werden können, erkannt. Im Kesselbau ist es allgemein üblich, die zu schweißenden Teile in eine Drehvorrichtung zu setzen. Im Fahrzeugbau wird das gleiche Verfahren wenigstens in Deutschland auch schon seit Jahren angewendet. Genannt seien nur die Uerdinger Waggonfabrik und die Firma Lindner, Halle-Amendorf. Bei der Schweißtagung in Hannover am 12. November 1937 berichtete W. Gerritsen über die holländische Firma Werkspoor, daß man auch dort heute ganz geschweißte D-Zug-Wagen oder Diesel-Triebwagen restlos in Drehgestellen schweißt und dadurch auch preislich viel wirtschaftlicher fährt. Bild 10 zeigt eine Aufnahme einer solchen Drehvorrichtung zur Schweißung von Triebwagen bei der Firma Werkspoor. (Schluß folgt.)

Alle Rechte vorbehalten.

Zentrischer und exzentrischer Druck von an beiden Enden gelenkig gelagerten Rechteckstäben aus Avional M und Baustahl.

(Vergleich der Theorien von Roß-Brunner, Hartmann und Chwalla mit durchgeführten Versuchen.)

Von Dr. sc. techn. Curt F. Kollbrunner, Ingenieur, Zürich.

(Schluß aus Heft 5.)

IV. Theorie des exzentrisch gedrückten Stabes nach Chwalla.

1. Bestimmung der inneren Momente M_i für verschiedene willkürlich angenommene Werte der Summe der Randfaserdehnungen Δ .

Die M_i werden analog Hartmann bestimmt (s. Abschnitt C III/1).

2. Bestimmung möglicher Gleichgewichtsfiguren für bestimmte Grundspannungen σ_s .

Die „Kurven des inneren Widerstandes“ nach Chwalla

$$\left(\frac{h}{\rho} - \frac{M_i}{b h^2} - \text{Diagramm}\right)$$

sind für $b=1$ cm und $h=1$ cm identisch mit dem $M_i - \Delta$ -Diagramm nach Hartmann.

Aus den „Kurven des inneren Widerstandes“

$$(1) \quad \frac{h}{\rho} = \psi \left(\frac{M_i}{b h^2}\right) = \psi \left(\frac{P y}{b h^2}\right) = \psi \left(\sigma_s \cdot \frac{y}{h}\right) = \psi_1 \left(\frac{y}{h}\right)$$

folgt, wenn man für $\frac{1}{\rho} = -y''$ einsetzt:

$$(2) \quad -h y'' = \psi_1 \left(\frac{y}{h}\right).$$

Daraus kann durch zweimalige Integration die gesuchte Gleichgewichtsfigur $y=f(x)$ bestimmt werden. Chwalla führte diese Operation analog Kármán¹⁾ in zwei Quadraturstufen durch¹⁶⁾. Die erhaltenen Gleichgewichtsfiguren wurden im $\frac{x}{h} - \frac{y}{h}$ -Diagramm als „Grundkurven“ eingetragen¹⁶⁾ (Bild 17).

Die Grundkurven wurden bei Avional M für $\sigma_s = 300, 600, 900, 1500, 2100$ und 2700 kg/cm² und bei Baustahl für $\sigma_s = 400, 800, 1200, 2000, 2300$ und 2600 kg/cm² bestimmt.

¹⁵⁾ E. Chwalla: Theorie des außermittig gedrückten Stabes aus Baustahl. Der Stahlbau 1934, Heft 21, S. 164.

¹⁶⁾ Mit Hilfe der Beziehung

$$\frac{y}{h} = -\frac{M_i}{P h} = \frac{1}{\sigma_s} \cdot \frac{M_i}{b h^2}$$

werden die Kurven des inneren Widerstandes in der affinen Form

$$-h y'' = \psi_1 \left(\frac{y}{h}\right) \text{ dargestellt.}$$

Die erste Stufe der Quadratur wird auf Grund der Beziehung

$$(y')^2 = 2 \int_{y/h}^{y_0/h} (-h y'') d\left(\frac{y}{h}\right)$$

durchgeführt. Die zweite Stufe der Quadratur schließt an die Kurve

$$\frac{1}{y'} = f_2 \left(\frac{y}{h}\right)$$

an und erfolgt auf Grund der Beziehung

$$\frac{x}{h} = \int_0^{y/h} \left(\frac{1}{y'}\right) d\left(\frac{y}{h}\right).$$

Daraus werden die Werte $\frac{x}{h} = f_3 \left(\frac{y}{h}\right)$ ermittelt. (Die Kurve $f_3 \left(\frac{y}{h}\right)$ ist identisch mit der gesuchten Gleichgewichtsfigur.) In der näheren Umgebung des Scheitels versagt diese Methode jedoch, da dann $\frac{1}{y'}$ unendlich groß wird. Chwalla half sich hier mit der Beziehung

$$\bar{\frac{x}{h}} = \int_{y'}^0 \left(\frac{1}{-h y''}\right) d(y'),$$

die die vom Scheitel ($y' = 0$) gemessenen Entfernungen x der Punkte der gesuchten Gleichgewichtsfigur liefert.

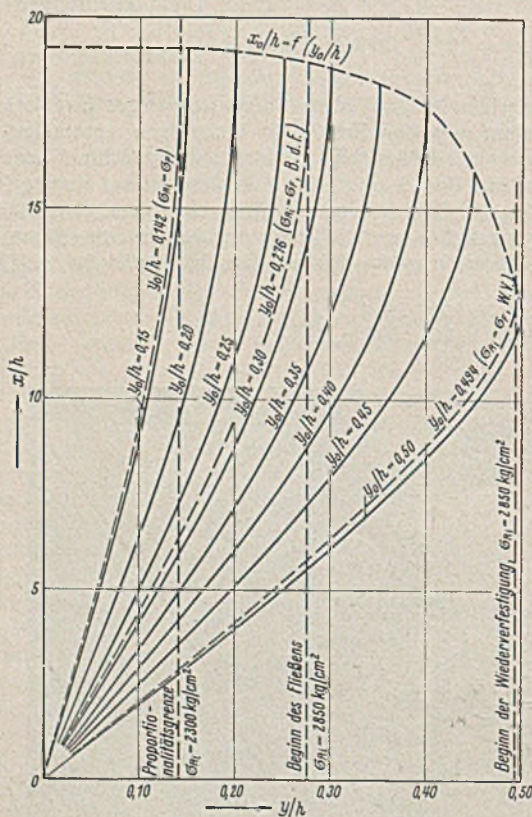


Bild 17. Exzentrischer Druck. $\frac{x}{h} - \frac{y}{h}$ -Diagramm (Grundkurven Chwalla) $\sigma_s = 1200$ kg/cm². Stahl. $E = 2150000$ kg/cm².

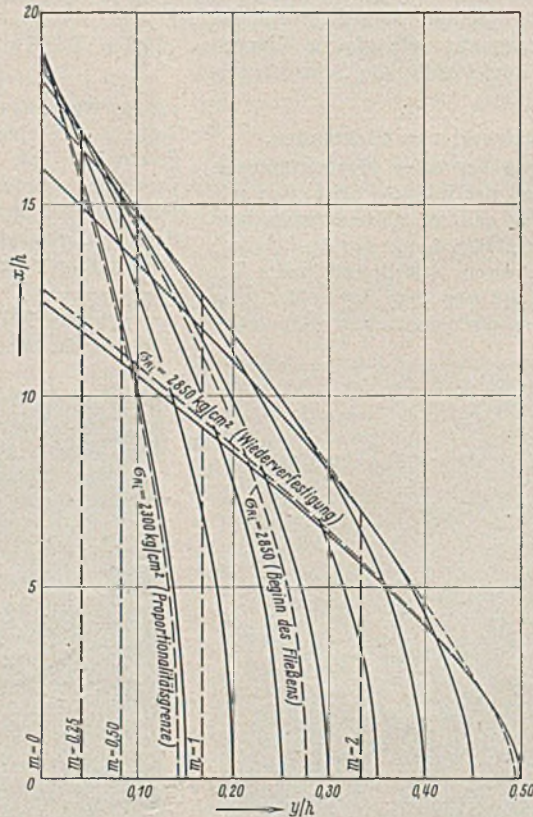


Bild 18. Exzentrischer Druck. $\frac{x}{h} - \frac{y}{h}$ -Diagramm (Grundkurven Chwalla) $\sigma_s = 1200$ kg/cm². Stahl. $E = 2150000$ kg/cm².

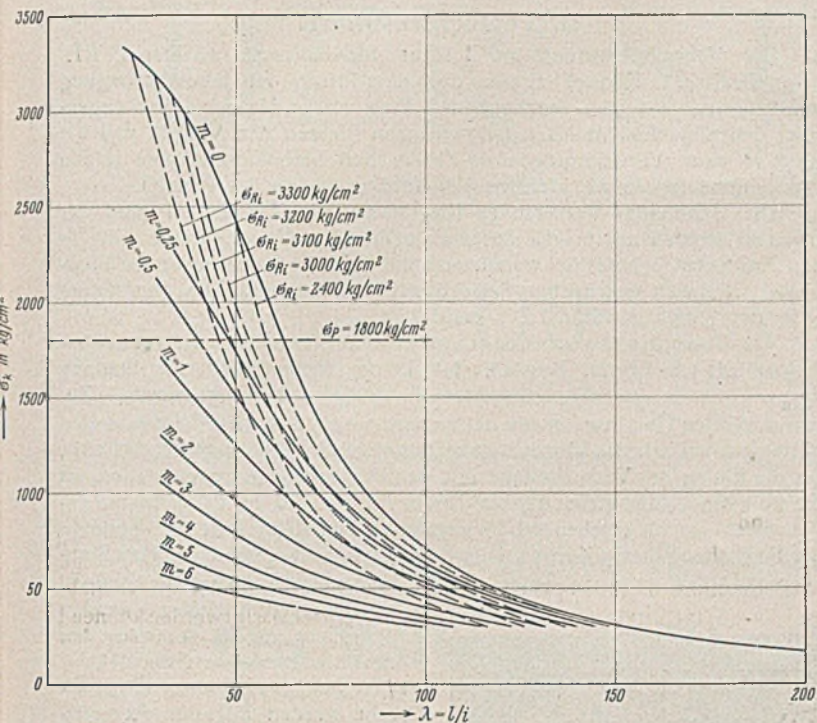


Bild 19a. Exzentrischer Druck. σ_k - λ -Diagramm (Chwalla). Avional M. $E = 715\,000 \text{ kg/cm}^2$.

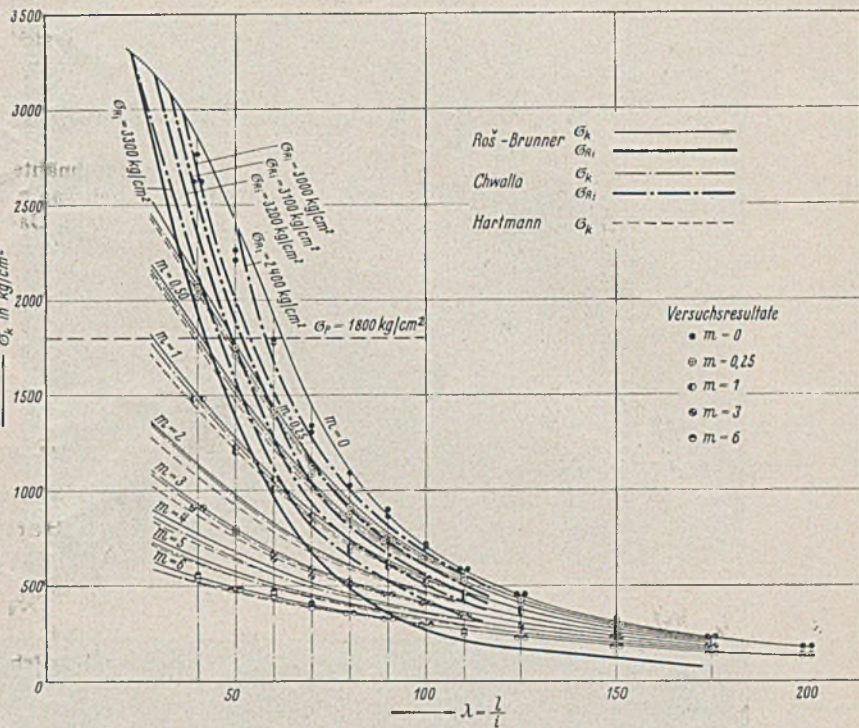


Bild 20a. Vergleich der drei Theorien mit den Versuchen. Zentrischer und exzentrischer Druck. σ_k - λ -Diagramm. Avional M. $E = 715\,000 \text{ kg/cm}^2$.

3. Ermittlung der maximalen Schlankheiten λ_k für bestimmte Grundspannungen σ_s und bestimmte Exzentrizitätsmaße m .

Anstatt wie Chwalla für bestimmte Exzentrizitätsmaße $m = \frac{p}{k}$ zu bestimmten Ausbiegungen $\frac{y_0}{h}$ die Schlankheiten λ zu bestimmen, und die „Kurven der Gleichgewichtszustände“ ($\lambda_{GL} - \frac{y_0}{h}$ -Diagramm) aufzutragen, aus denen die Maximalwerte die kritischen Gleichgewichtszustände, somit λ_k , ergeben, kann man analog Hartmann an die mit y_0 auf der Abszissenachse aufgetragenen Grundkurven ($\frac{x}{h} - \frac{y}{h}$ -Diagramm) die Umhüllende zeichnen (Bild 18). Die Schnittpunkte mit den Lotrechten durch die Exzentrizitätsmaße m ergeben so die Stablängen $\frac{x_{max}}{h}$, aus denen die λ_k berechnet werden können¹⁷⁾.

4. Aufzeichnung des σ_k - λ -Diagramms.

Analog Abschnitt C III/4 (Bild 19a, b).

5. Eintragung der Randspannungen.

Analog Abschnitt C III/5.

¹⁷⁾ Die im kritischen Zustand auftretende Scheltelausbiegung y_0 bleibt dabei, da sie baupraktisch nicht von Interesse ist, außer Betracht. (Chwalla brachte den Zusammenhang zwischen effektiver seitlicher Ausbiegung des Stabscheitels im kritischen Zustand, und kritischer Last, in den „Lastkurven“ in übersichtlicher Weise zur Darstellung.)

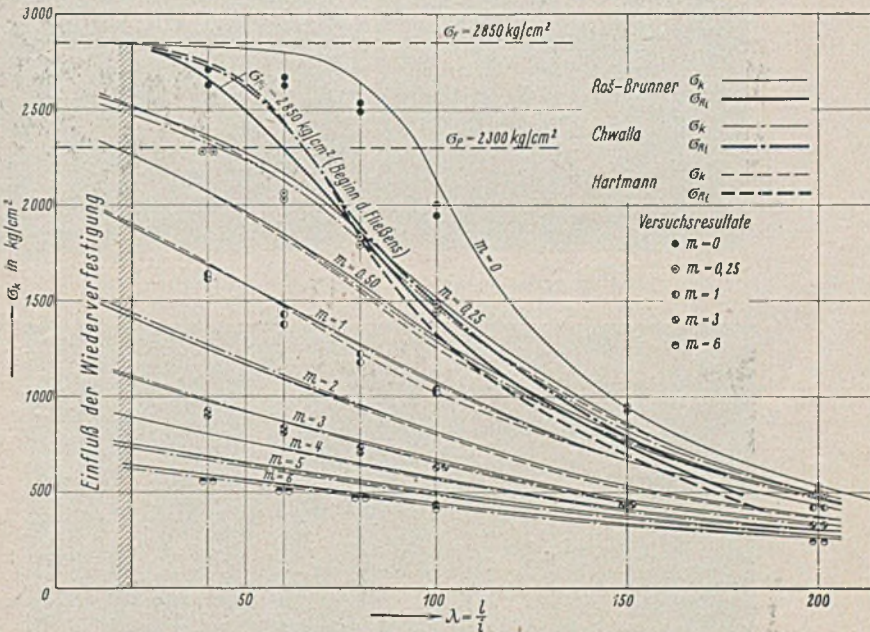


Bild 20b. Vergleich der drei Theorien mit den Versuchen. Zentrischer und exzentrischer Druck. σ_k - λ -Diagramm. Stahl. $E = 2\,150\,000 \text{ kg/cm}^2$.

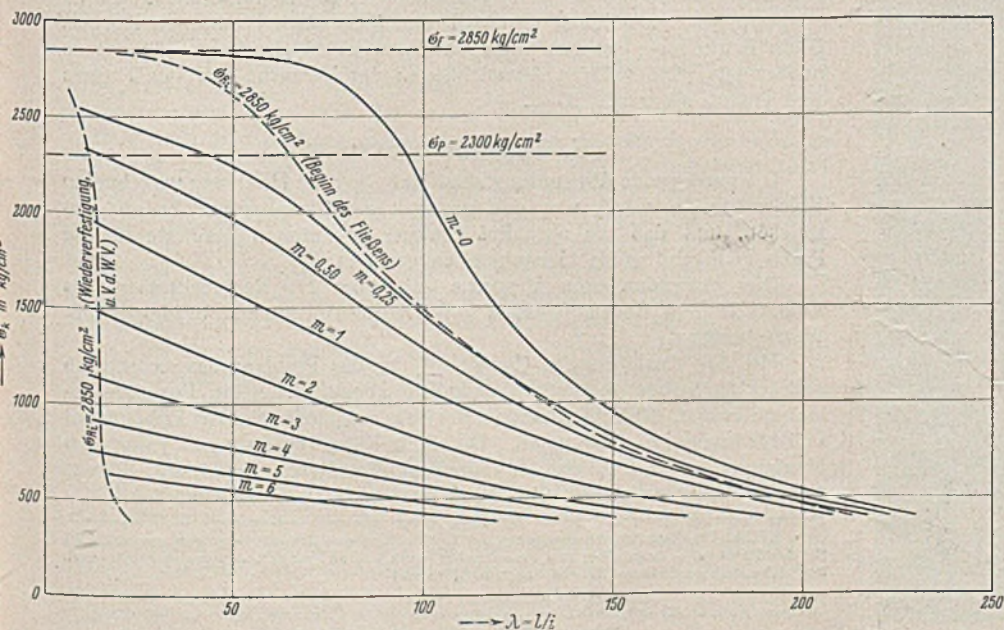


Bild 19b. Exzentrischer Druck. σ_k - λ -Diagramm (Chwalla). Stahl. $E = 2\,150\,000 \text{ kg/cm}^2$.

V. Vergleich der drei Theorien.

In Bild 20a, b sind die theoretisch ermittelten σ_k - λ -Diagramme nach Ros-Brunner, Hartmann und Chwalla aufgetragen und die erhaltenen Versuchsergebnisse (s. Abschnitt D) eingezeichnet. Die σ_k -Werte nach Ros-Brunner und Hartmann weichen im Maximum um 5% von denjenigen nach Chwalla ab. Bei Avional M liegen die Resultate nach Ros-Brunner stets etwas oberhalb und diejenigen nach Hartmann stets etwas unterhalb der Resultate nach Chwalla. Beim Baustahl, wo die Unterschiede zwischen den einzelnen Theorien infolge des stark ansteigenden Spannungs-Verkürzungs-Diagramms kleiner als bei Avional M sind, überschneiden sich die theoretisch ermittelten Kurven stellenweise, was jedenfalls auf die typischen Fließerscheinungen zurückzuführen ist. (Die Unterschiede sind oft so klein, daß sie von den dem graphischen Verfahren anhaftenden Ungenauigkeiten herrühren können.)

Die ermittelten maximalen Randspannungen σ_{R1} variieren jedoch bedeutend.

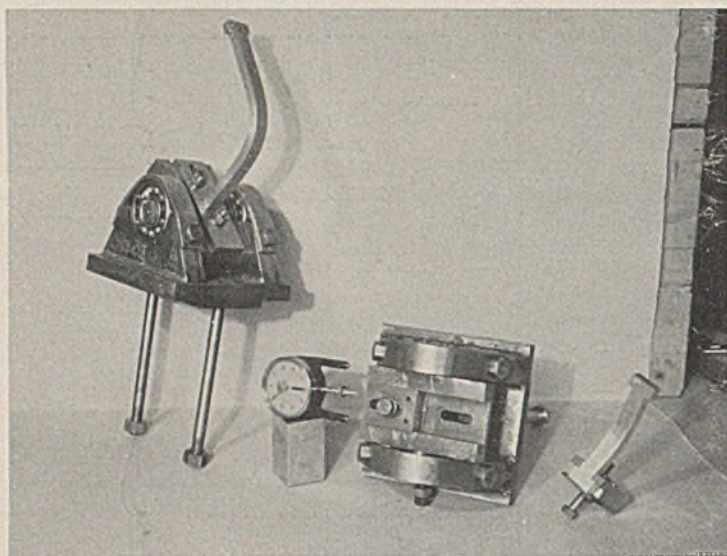


Bild 21.

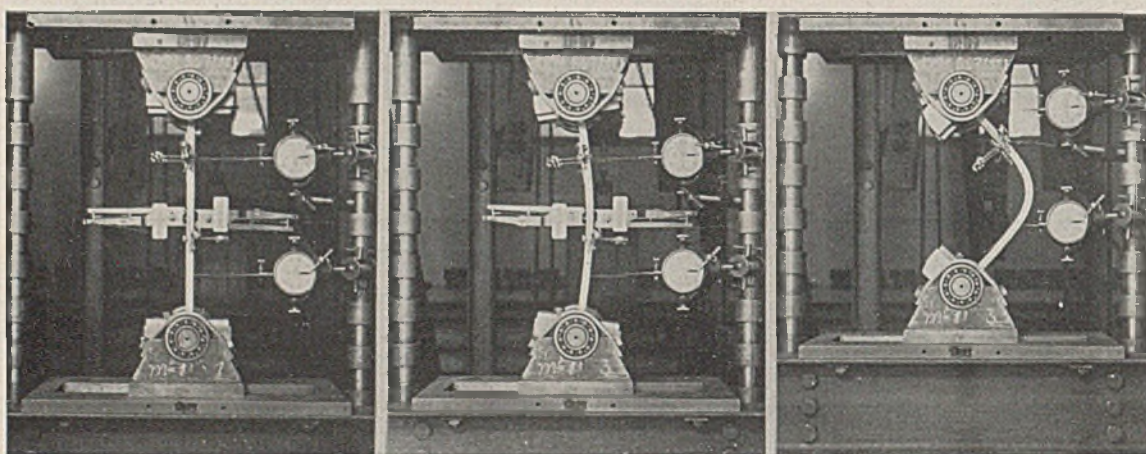


Bild 22 a.

Bild 22 b.

Bild 22 c.

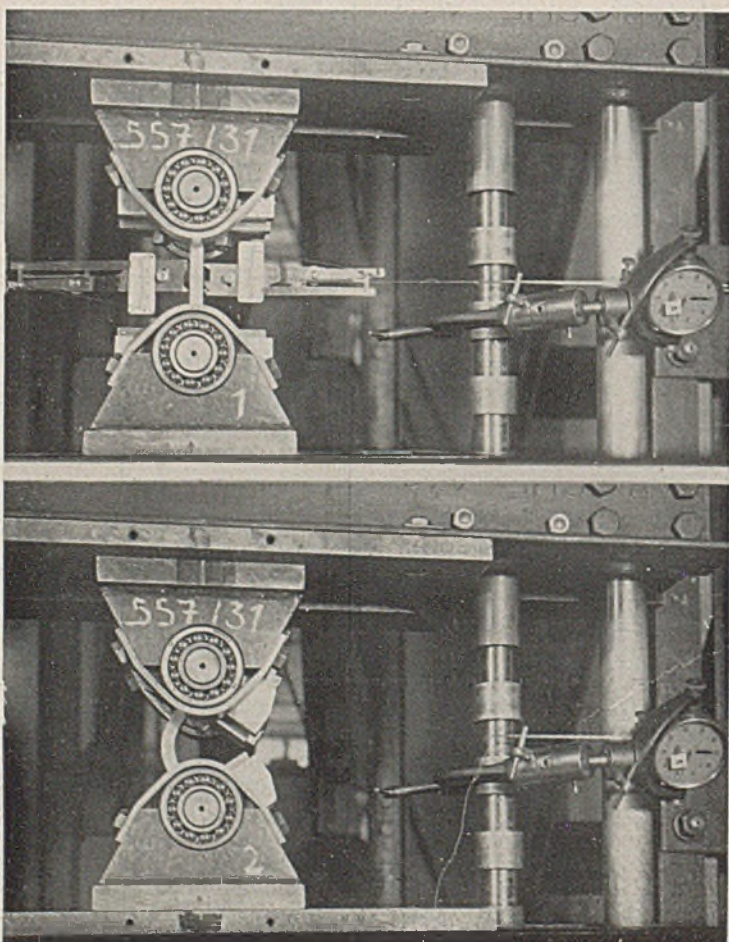


Bild 23 a u. b.

D. Versuchsergebnisse.

Die Versuche wurden am Institut für Baustatik an der E.T.H. (Prof. Dr.-Ing. L. Karner) mit einer nach dem Prinzip der Hebelübertragung konstruierten Maschine durchgeführt. Eine solche Maschine hat gegenüber den allgemein üblichen hydraulischen Pressen den Vorteil, daß die Kraft P ohne Verringerung ihrer Größe den Stabdeformationen folgen kann. (Man hat so die gleichen Verhältnisse wie in der Praxis.)

Die Spannungs-Verkürzungs-Diagramme für Avional M und für Baustahl wurden mit je vier zentrisch gedrückten Versuchsstäben, die in den Knickköpfen befestigt waren, und mit je zwei zwischen festen Preßplatten zentrisch gedrückten Versuchsstäben, bestimmt. Die gemittelten Diagramme sind aus Bild 1a, b ersichtlich.

Als Versuchsstäbe wurden durchweg Rechteckstäbe verwendet — Avional M : 1,5 · 1,0 cm. Baustahl: 1,4 · 1,0 cm. Exzentrizitäten in Richtung J_{\min} —, die in gelenkig gelagerten Knickköpfen befestigt waren. Zur einwandfreien Übertragung des bei exzentrischem Lastangriff auftretenden Momentes wurden die Versuchsstäbe mit einem Kopf ausgebildet (Bild 21). Da die Enden der Versuchsstäbe mit den Drehachsen zusammenfallen, ist die freie Knicklänge gleich der Stablänge. [Infolge des am Versuchsstab angebrachten Kopfes ergeben sich im ungünstigsten Fall (kleinster Stab) infolge der Festhaltung dieser Köpfe bei der Berechnung von σ_k mit der totalen Stablänge als freie Knicklänge Fehler $< 1,2\%$, die vernachlässigt werden können.]

Die Exzentrizitäten wurden mit einem eigens konstruierten Exzentrizitätsmesser (Bild 21) auf 1/100 mm genau bestimmt. Untersucht wurden folgende Exzentrizitäten:

$m = \frac{p}{k}$	p in cm
0	0,0000
0,25	0,0417
1	0,1667
3	0,5000
6	1,0000

$$k = \frac{h}{6} = 0,1667 \text{ cm}$$

Die Durchbiegungen wurden mit Huggenberger Meßbuhren (Teilung 1/100 mm), die Dehnungen

mit Huggenberger Tensometer Modell B (Übersetzung 1/1000, Meßstrecke = 2 cm) bestimmt.

Bild 22 zeigt einen Stab von der Länge $l = 31,73$ cm, $\lambda = 110$ mit dem Exzentrizitätsmaß $m = 1$, aus Avional M . (Bild 22a: unbelastet. Bild 22b: ausgeknickt. Bild 22c: weitere Deformation nach erfolgter Ausknickung.) Bild 23 zeigt einen zentrisch belasteten Stab aus Avional M von der Länge $l = 11,54$ cm, $\lambda = 40$. (Bild 23a: unbelastet. Bild 23b: ausgeknickt.)

Jeder Versuchsstab wurde bis etwa $\frac{3}{4}$ seiner kritischen Kraft belastet und darauf 10mal entlastet und wiederbelastet. Dann wurde die Kraft langsam gesteigert bis der Stab ausknickte. Die Versuchsergebnisse sind in Bild 20a, b eingetragen. Man ersieht daraus, daß die Versuche äußerst gut mit der Theorie von Chwalla übereinstimmen. Die Versuchspunkte befinden sich infolge der stets vorhandenen Störungsfunktionen, wie zu erwarten war, vorwiegend unterhalb den theoretisch ermittelten Kurven. Diese Erscheinung ist besonders bei zentrischem Druck ($m = 0$) gut zu beobachten. Die größten Abweichungen der Versuche von der Theorie sind kleiner als minus 10 %.

E. Zusammenfassung.

Die vorliegende Abhandlung zeigt, daß die nach Hartmann gerechneten Knickkräfte nur wenig von den genauen der Chwallaschen Theorie abweichen, und daß die nach Roß-Brunner bestimmten Resultate für die Praxis genügend große Genauigkeiten ergeben.

Die vorgenommenen Versuche mit über 170 Rechteckstäben aus Avional M und Baustahl haben die Theorie in äußerst befriedigender Weise bestätigt.

Mit den Ausführungen Chwallas¹⁵⁾ ist das Problem des exzentrisch gedrückten Stabes theoretisch endgültig abgeklärt. Seine Resultate erlaubten es erst, die Fehlerprocente der Näherungslösungen von Roß-Brunner und Hartmann zu bestimmen. Da diese Näherungslösungen jedoch im Maximum um $\pm 5\%$ von den genauen Resultaten abweichen, können sie zur Bestimmung der σ_r - λ -Diagramme stets verwendet werden.

INHALT: Über Forschungsarbeiten zur Entwicklung von Schweißelektroden, insbesondere für den Stahlbau. — Zentrischer und exzentrischer Druck von an beiden Enden gelenkig gelagerten Rechteckstäben aus Avional M und Baustahl. (Schluß.)

Verantwortlich für den Inhalt: Geh. Regierungsrat Prof. A. Hertwig, Berlin-Charlottenburg.
Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin W 9.
Druck der Buchdruckerei Gebrüder Ernst, Berlin SW 68.