

Hochfeste Flugzeugstähle

Von Dr.-Ing. K. MATTHAES, Seestadt Rostock

Die im Flugzeugbau verwendeten Stähle mit einer Festigkeit von 90 kg/mm² und mehr werden in bezug auf Zusammensetzung, Eigenschaften und Verwendungsbereich beschrieben.

I. Anwendungsumfang hochfester Stähle

II. Zusammensetzung, Vergütbarkeit und Festigkeit der Vergütungsstähle

- 1. Niedriglegierte Cr-Ni- und Cr-Mo-Stähle*
- 2. Molybdänfreie Stähle*
- 3. Höherlegierte Stähle*
- 4. Spitzenstähle*

III. Anwendung und Eigenschaften der verschiedenen Halbzeuge, Bauweisen

- 1. Stangen und ihre Anwendung für Dreh- und Frästeile*
- 2. Walsprofile*
- 3. Schmiedestücke*
- 4. Röhre und Bleche und ihre Anwendung für geschweißte Beschläge, Streben usw.*
- 5. Stahlguß*
- 6. Stahlbänder und -bleche höchster Festigkeit*

Schrifttum

524

9626

Hochfeste Flugzeugstähle

I. Anwendungsumfang hochfester Stähle

Stahl ist der hauptsächlich benötigte Werkstoff für den Flugzeugbau. Im Jahre 1939 betrug der Anteil des Stahls an den gesamten von der deutschen Luftfahrt verarbeiteten Halbzeugen 61 vH. Auch beim Bau von Leichtmetallflugzeugen wird für Anschlüsse, Beschläge, Bolzen und viele andere Teile Stahl verwendet, so daß auch dabei der Stahlanteil noch recht hoch ist. So betrug bei den Ernst-Heinkel-Flugzeugwerken, die ausschließlich Flugzeuge in Leichtmetallchalenbauweise herstellen, im Jahre 1939 die verwendete Stahlmenge 58 vH der verwendeten Menge von Aluminiumlegierungen.

Beim Bau von Leichtmetallflugzeugen wird Stahl nur dort verwendet, wo verhältnismäßig hohe Kräfte örtlich auftreten und daher die erhöhte Festigkeit gegenüber Leichtmetall trotz des höheren spezifischen Gewichts ausgenutzt werden kann. In geringerem Umfang wird Stahl für solche Teile genommen, bei denen von der besseren Schweißbarkeit des Stahls Gebrauch gemacht wird. Der Anteil der hochlegierten Stähle höherer Festigkeit an der Gesamtmenge ist daher recht groß. Eine Übersicht über die aus Stahl verwendeten Halbzeuge und die prozentuale Verteilung gibt Zahlentafel 1. Bei weitem die größte Menge wird als Stangenmaterial zur Herstellung von Dreh- und Frästeilen verwendet. Mengenmäßig den größten Anteil an diesen Stangen nehmen die Fliegwerkstoffe 1452, 1456 und 1460 ein (also Cr-Mo-, Cr-Mo-V- und Cr-Ni-Mo-Stähle). Die Stangen aus Chrom-Molybdän-Stahl mit Durchmessern unter 50 mm werden mit einer Mindestfestigkeit von 90 kg/mm² geliefert und die größeren Stangen werden zu einem erheblichen Teil nach dem Verarbeiten auf diese Festigkeit vergütet. Bezeichnet man mit hochfesten Stählen Stähle mit Festigkeiten von 90 kg/mm² und mehr, so ergibt sich, daß der weitaus größte Teil der verwendeten Stahlmenge zu den hochfesten Stählen gehört.

II. Zusammensetzung, Vergütbarkeit und Festigkeit der Vergütungsstähle

1. Niedrig legierte Cr-Ni- und Cr-Mo-Stähle

Die Festigkeitsstufe von 90 kg/mm² läßt sich bei fast allen im Flugzeugbau vorkommenden Bauteilen (mit Ausnahme der Fahrwerks- und Flügelbeschläge sehr großer Flugzeuge) schon mit niedrig legierten Stählen erreichen. Hierzu wurden früher ausschließlich die Cr-Ni-Stähle VCN 25 und VCN 35 angewendet, da diese als DIN-Stähle am leichtesten beschaffbar waren (Werte s. Zahlentafel 2 und 3). Meist wurde VCN 35 h verwendet, weil für diesen Werkstoff in DIN 1662 $\sigma_B = 90$ bis 105 kg/mm² für den vergüteten Zustand (und Stangen bis 60 Durchmesser) angegeben ist. Doch läßt sich bei geringeren Durchmessern auch VCN 25 w noch auf diese Festigkeitsstufe bringen, ohne kaltspröde zu werden, s. Tafel 3.

Nach der Einführung der Cr-Mo-Stähle im Jahre 1933 haben diese die Cr-Ni-Stähle sehr schnell verdrängt. Die Durchhärbarkeit der Cr-Mo-Stähle ist ebenfalls noch ausreichend. Dabei sind sie unempfindlicher gegen Fehler bei der Wärmebehandlung (fast keine Anlaßsprödigkeit!). Der besondere Vorteil ist die gute Schweißbarkeit dieser Stähle bei einem C-Gehalt bis 0,28 vH, der zur Erzielung der Festigkeit ausreichend ist. Diese Eigenschaften haben dazu geführt, daß der Cr-Mo-Stahl der bei weitem am meisten verwendete Werkstoff im Flugzeugbau wurde.

Die in dem Fliegwerkstoffblatt 1452 festgelegte Zusammensetzung: 0,22 bis 0,28 C, 0,9 bis 1,2 Cr, 0,15 bis 0,25 Mo; < 0,35 Si, < 0,7 Mn, < 0,02 P, < 0,015 S entspricht allen diesen Anforderungen.

Eine Übersicht über die Festigkeitseigenschaften, die bei Vergütung großer Querschnitte (Stangen von 80 Durchmesser) erreichbar sind, gibt Zahlentafel 4 und

Zahlentafel 2. Festigkeit von VCN 25, VCN 35 und VCN 45*)

Bezeichnung	Zusammensetzung in vH					Streckgrenzenverhältnis σ_s/σ_B vH	Festigkeit, vergütet σ_B kg/mm ²	Dehnung δ_5 vH
	C	Ni	Cr	Mn	Si			
VCN 25 w	0,25—0,32	2,5 ± 0,25	0,75 ± 0,2	0,4—0,8	< 0,35	> 70	70—85	20—14
VCN 25 h	0,32—0,40	2,5 ± 0,25	0,75 ± 0,2	0,4—0,8	< 0,35	> 70	80—95	16—10
VCN 35 w	0,20—0,27	3,5 ± 0,25	0,75 ± 0,2	0,4—0,8	< 0,35	> 75	75—90	20—14
VCN 35 h	0,27—0,35	3,5 ± 0,25	0,75 ± 0,2	0,4—0,8	< 0,35	> 75	90—115	16—10
VCN 45	0,30—0,40	4,5 ± 0,25	1,3 ± 0,3	0,4—0,8	< 0,35	> 80	100—115	15—9

*) Nach Din 1662 (2. Ausgabe).

Zahlentafel 1.

Mengenverhältnis der aus Stahl verwendeten Halbzeuge*)

Stangen	58 vH
Blech und Band	23 vH
Rohre	16 vH
Schmiedestücke	1,6 vH
Gußstücke	1,4 vH

*) Jahresdurchschnitt 1939 der Ernst-Heinkel-Flugzeugwerke, Seestadt Rostock.

Zahlentafel 3. Eigenschaften von VCN 25 w, Stangen von 15 (j. vergütet*)

Zusammensetzung: 0,23 C, 0,50 Mn, 0,23 Si, 0,010 P, 0,028 S, 0,78 Cr, 2,75 Ni;

Festigkeit: $\sigma_s = 80$ kg/mm², $\sigma_B = 90$ kg/mm², $\delta = 18$ vH, $\psi = 67$ vH;

Kerbzähigkeit: bei +20° C $\alpha_K = 15,8$ mkg/cm², bei -70° C $\alpha_K = 14,1$ mkg/cm².

*) Nach Körber und Pomp: Einfluß der Vorbehandlung auf die mechanischen Eigenschaften von Kohlenstoff- und legierten Stählen, insbesondere die Kerbzähigkeit in der Kälte und Wärme. Mitt. KWI f. Eisenf. Bd. VII Lief. 4.

Zahlentafel 4.

Vergütungsversuche mit Cr-Mo-Stahl 1452

Zusammensetzung: 0,25 C, 0,66 Mn, 0,28 Si, 0,006 P, 0,006 S, 1,06 Cr, 0,34 Mo.

Stangen von 80 mm $\varnothing$, von 860° C in Wasser gehärtet. Festigkeit in der Kernzone.

Anlaßtemperatur °C		680	575	500 ^{*)}	430	200	nicht angelaßen ¹⁾
Zugversuch ²⁾	E kg/mm ² vH	206	206	207	204	206	201
	$\sigma_{0,02}$ kg/mm ²	52	68	74 (83)	69	60	53
	$\sigma_{0,2}$ kg/mm ²	54	69	77 (90)	75	72	107
	σ_s kg/mm ²	69	85	95 (103)	98	107	168
	σ_z kg/mm ²	143	163	167 (174)	171	170	249
	δ_{10} vH	18	13	12 (10)	10	13	7
	δ_5 vH	26	20	17 (16)	16	19	11
Einschnürrarbeit	ψ vH	72	68	63 (65)	62	46	49
	A mkg/cm ² vH	135	137	133	128	86	136
Biegefestigkeit	$\sigma_B + 20^\circ$ kg/mm ²	> 136	> 163	—	> 190	—	> 270
	bei -20° kg/mm ²	> 140	> 170	—	> 190	—	260
	bei -60° kg/mm ²	> 151	> 177	—	> 206	—	283
Kerb-Biegefestigkeit ³⁾	$\sigma_{BK} + 20^\circ$ kg/mm ²	147	173	—	201	—	235
	bei -20° kg/mm ²	154	177	—	207	—	253
	bei -60° kg/mm ²	160	185	—	216	—	246
Kerbsähigkeit ³⁾ längs σ_K	bei $+60^\circ$ C mkg/cm ²	25,2	20,2	—	11,5	9,4	9,7
	bei $+20^\circ$ C mkg/cm ²	24,6	21,0	15,0	7,9	10,6	8,9
	bei -20° C mkg/cm ²	22,9	18,2	11,3	6,5	5,9	8,5
	bei -60° C mkg/cm ²	15,65	14,7	7,1	5,8	2,7—6,7	8,1
Kerbsähigkeit quer σ_K	bei $+60^\circ$ C mkg/cm ²	9,8	9,9	—	2,7	—	2,5
	bei $+20^\circ$ C mkg/cm ²	8,1	7,6	9,1	3,2	—	2,3
	bei -20° C mkg/cm ²	11,2	5,75	3,35	1,5	—	—
	bei -60° C mkg/cm ²	5,55	3,1	2,4	1,7	—	2,1
Härteprüfung	H 5/750/20 kg mm ²	215	266	316	313	361	445

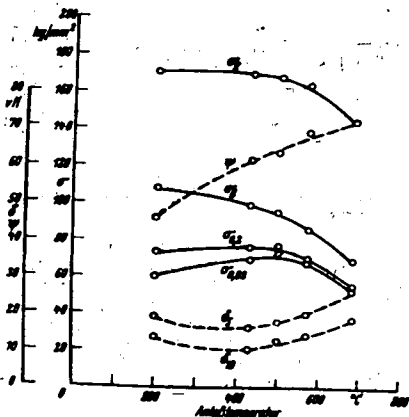
¹⁾ Probestäbe einzeln ölgehärtet.²⁾ Mittel aus je vier Werten, die übrigen Versuche je zwei Proben.³⁾ Bei einer Kerbsähigkeit über 14 mkg/cm² werden die Proben durch zwei Schläge gebrochen.^{*)} Probenform: Stabhöhe = 20 mm, Breite = 10 mm. Kerbform: 45° = Dreieckskerb von 4 mm Tiefe und 0,5 mm Abrundungshalbmesser an der Spitze.^{*)} In (): Festigkeit in der Randzone.

Abb. 1 Einfluß der Anlaßtemperatur auf die Festigkeit von vergütetem Cr-Mo-Stahl 1452

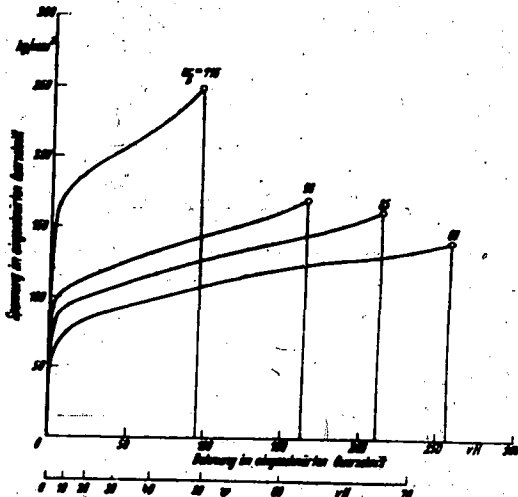


Abb. 3 Verlauf der wahren Spannung bei verschiedenen hoch vergütetem Cr-Mo-Stahl 1452

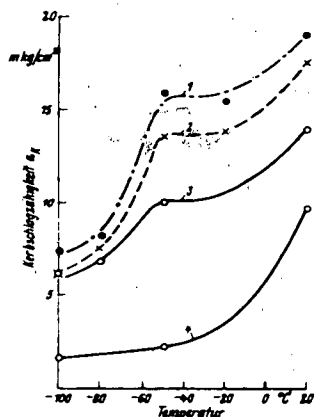
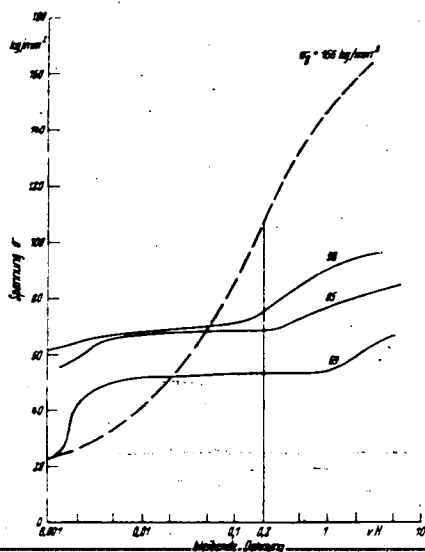


Abb. 1 Kerbschlagzähigkeit von Cr-Mo-Stählen in Abhängigkeit von der Temperatur

Abb. 2 Feinmeßversuche mit verschieden hoch vergütetem Cr-Mo-Stahl 1452

Zahlentafel 5. Zusammensetzung und Eigenschaften der Cr-Mo-Stähle in Abb. 4

Kurve Abb. 4	Zusammensetzung in vH						Vergütung	Festigkeit				
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni		$\sigma_{0,2}$ kg/mm ²	σ_B kg/mm ²	δ_5 vH	ψ vH	
1	0,22	0,33	0,80	0,83	0,22	0,09	850° Wasser	525°	85	96	19	70
2	0,36	0,25	0,83	1,12	0,25	0,15	830° Öl	580°	85	99	18	64
3	0,29	0,15	0,47	1,04	0,22	—	Wasser		93	104	16	64
4							Öl		88	100	14	63

Abb. 1. Das Verhalten beim Überschreiten der Elastizitätsgrenze ist aus den Feinmeßkurven Abb. 2 zu ersehen. Abb. 3 zeigt den Verlauf der „wahren Spannung“ (Spannung und Dehnung im Einschnürquerschnitt).

Eine Festigkeit $\sigma_B = 90 \text{ kg/mm}^2$ läßt sich auch bei 80 mm Durchmesser noch bei einer Anlaßtemperatur von 500° C erreichen. Dabei ist die Kerbschlagzähigkeit noch ausreichend. Bei geringerer Anlaßtemperatur (430° C) ist die Kerbschlagzähigkeit der Querproben bei -60° C jedoch zu gering. Anlaßtemperaturen unter 500° C müssen daher vermieden werden. Im allgemeinen ist die Durchhärbarkeit von Fliegwerkstoff 1452 geringer, da die untere Grenze des Molybdängehaltes gemäß dem Fliegwerkstoffblatt nur 0,15 vH beträgt, während die zu den Versuchen benutzte Stange 0,24 Mo enthielt, also den festgelegten oberen Grenzwert (0,25 Mo) noch erheblich überschritt. Selbst bei nur 80 mm Durchmesser ergaben sich Schwierigkeiten bei der Vergütung, so daß der Stangendurchmesser für diese Vergütungsstufe auf 50 mm begrenzt wurde. Die Vergütung erfolgt bei diesen verhältnismäßig großen Querschnitten zweckmäßig durch Wasserhärtung von 880° C, da die Ölhärtung zu niedriger Abkühlungsgeschwindigkeit ergibt und dadurch zu schlechterer Zähigkeit beim Anlassen auf gleiche Festigkeit führt. Bei kleinen Querschnitten ergibt auch Ölhärtung gute Zähigkeitswerte. Abb. 4 und Zahlentafel 5 zeigen den Einfluß der Härtingsart und des C-Gehaltes auf die Kerbschlagzähigkeit bei tiefer Temperatur¹⁾. Bei

0,29 C ergibt die Wasservergütung wesentlich größere Kerbschlagzähigkeit (s. Kurve 3) sogar bei etwas höherer Festigkeit (104 bzw. 100 kg/mm²) als die Ölvergütung (Kurve 4). Bei niedrigerem C-Gehalt (0,22 C) läßt sich durch Wasservergütung gute Kerbschlagzähigkeit erzielen (s. Kurve 1).

Größere zusammengeschweißte Bauteile, z. B. Motor- und Fahrwerksträger, Streben u. a., müssen schon mit Rücksicht auf das Verziehen ölgehärtet werden. Auch bei geschweißten Beschlägen und bei Teilen mit größeren Wanddickenunterschieden, z. B. Schmiedestücken, vor- oder fertiggearbeiteten Fräs- und Drehteilen ist Ölhärtung vorzuziehen. Bei solchen Teilen sind häufig die Wandstärken so gering, daß ein Vergüten auch auf höhere Festigkeit möglich ist. Die übliche Vergütungsstufe ist 110 kg/mm², sie läßt sich bei dünnwandigen Teilen durch Ölärten von 880° C und Anlassen bei 500° C erreichen. Die Grenze ist etwa 10 mm Dicke bei beiderseitigem freien Zutritt des Abbrechmittels. Abb. 5 zeigt die Verhältnisse bei der Vergütung eines vorgeordneten Bolzens aus 1452; in dem 12 mm dicken Teil wurde $\sigma_B = 110 \text{ kg/mm}^2$ gerade erreicht, in dem dickeren Teil war die Festigkeit zu gering. Durch Wasserhärtung und Anlassen bei 500° C ist die geforderte Festigkeit an allen Stellen zu erzielen.

Ist die schroffe Abkühlung nur nach einer Seite zu möglich, z. B. bei Hohlkörpern, aber auch bei halbgeschlossenen Räumen, in denen sich Dampfblasen bilden (bzw. festsetzen), so läßt sich bei Ölhärtung nur bis $\sim 5 \text{ mm}$ Wanddicke $\sigma_B = 110 \text{ kg/mm}^2$ erreichen.

Die Festigkeitsstufe von 90 kg/mm² wird bei ölgehärteten Teilen durch Anlassen bei 530 bis 580° C (je nach den Abkühlungsverhältnissen) erzielt.

¹⁾ Nach A. Pomp, A. Krisch und G. Haupt: Kerbschlagzähigkeit legierter Stähle bei Temperaturen von +20 bis -253°. Mitt. KWI f. Eisenforsch. Abh. 381 Bd. XXI, Lief. 15.

Zahlentafel 6. Festigkeitswerte des Versuchsstückes nach Abb. 6

Stab Nr.	Probe entnommen aus	H kg/mm ²	$\sigma_{0,2}$ kg/mm ²	σ_B kg/mm ²	δ_{10} vH	Bemerkungen
1	Lasche s = 2,5 mm	350	100,7	108,5	9	Bezogen auf die oben angegebenen Brinellhärten ergibt sich für alle Stäbe ein Umrechnungs-Faktor von nur $\sigma_B = 0,31 H_{Br}$
2			101,6	109,3	9	
3	Rohr außerhalb der Laschen (s = 2,0)	363	108,3	112,4	7	
4			108,0	112,4	8	
5	Rohr unter den Laschen (s = 2,0)	282	67,2	87,3	13	
6			66,1	87,3	13	

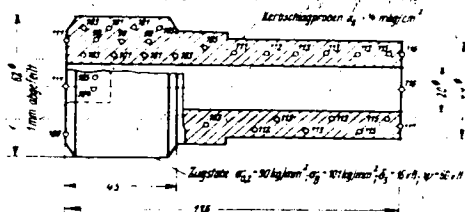
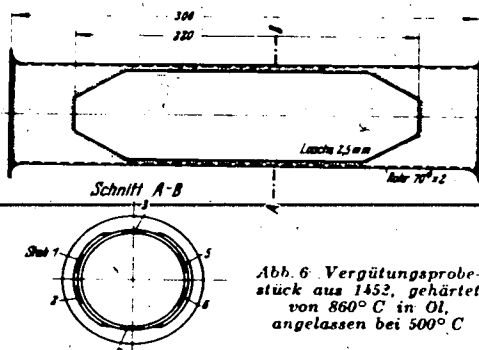
Abb. 5 Vergütungsversuch mit Bolzen aus 1452, vorgedreht, gehärtet von 860° C in Öl, angelassen bei 500° C. Die eingeschriebenen Zahlen geben die Brinellfestigkeit σ_B an

Abb. 6 Vergütungsprobe-stück aus 1452, gehärtet von 860° C in Öl, angelassen bei 500° C

In jedem Fall müssen die Abkühlungsverhältnisse an allen Stellen eines Bauteils berücksichtigt werden. Besonders ungünstig sind diese z. B. für ein geschlossenes Rohr mit aufgeschweißter Lasche; s. Abb. 6 und Zahlentafel 6. Die hier dargestellte Probe eignet sich daher besonders zur Bestimmung der Vergütbarkeit von Rohren (und Blechen) unter ungünstigen Abkühlungsverhältnissen.

Um einen Stahl zu schaffen, der noch etwas höhere Festigkeit erreicht als 1452 und andererseits etwas besser schweißbar (und nicht so empfindlich auf geringe Schwefelgehalte) ist, wurde von EHF 1934 ein Stahl mit folgender Zusammensetzung²⁾ vorgeschlagen: 0,21 bis 0,25 C, 0,8 bis 1,2 Mn, 0,25 bis 0,35 Si, 0,8 bis 1,0 Cr, 0,25 bis 0,35 Mo.

Der höhere Mo-Gehalt bietet den Vorteil einer besseren Durchhärtung, ebenso in gewissem Umfang der erhöhte Mn-Gehalt. Weiterhin erlaubt der erhöhte Mn-Gehalt, den Kohlenstoffgehalt in dem angegebenen Maße etwas herabzusetzen bei gleicher Härte. Außerdem sind die Anforderungen an die Reinheit des Stahls, insbesondere an Schwefelfreiheit, wesentlich geringer als bei 1452³⁾. Die aus dem Stahl bisher hergestellten Halbzeuge haben diese an sie gestellten Erwartungen in jeder Beziehung erfüllt.

2) DRP a.

Die Schweißbrissigkeit ist, wie aus den Untersuchungen von J. Müller hervorgeht, in hohem Maße vom Schwefelgehalt und außerdem vom Kohlenstoffgehalt abhängig. Die Herabsetzung des Kohlenstoffgehaltes erlaubt schon an sich eine Erhöhung des Schwefelgehaltes. Darüber hinaus kann der Schwefelgehalt aber noch wesentlich höher werden, als es dem Kohlenstoffgehalt entspricht, und zwar deshalb, weil der Schwefel nicht als FeS, sondern infolge des erhöhten Mn-Gehaltes als MnS gebunden wird und hierdurch die Neigung zur Schweißbrissigkeit sehr stark vermindert ist. Vgl. hierzu das günstige Verhalten der schweißbaren Mn-Stähle (Aero 50 und Aero 70). Es wurden auch bereits Stähle mit absichtlich erhöhtem Schwefelgehalt (0,04 vH S) hergestellt, die keine Schweißbrissigkeit bei der üblichen Prüfung ergaben.

Außer dem Stahl 1452 wurde im Flugzeugbau ein schweißbarer Cr-Mo-Stahl mit niedrigem Cr-Gehalt als Werkstoff für Bleche verwendet. Dieser Stahl, Fliegwerkstoff 1450, mit 0,20 bis 0,27 C und 0,60 bis 0,75 Cr bietet eine noch größere Sicherheit gegen Schweißrisse als 1452. Die Vergütbarkeit ist jedoch geringer. Daher bestehen Schwierigkeiten bei der Vergütung von Teilen, die aus Rohr- oder Stangenmaterial 1452 in Verbindung mit Blech aus 1450 durch Zusammenschweißen aufgebaut sind. Bei gleicher Anlaßtemperatur liegt nämlich die Festigkeit von 1450 etwa 10 kg/mm² niedriger als die von 1452. Die Vergütung auf $\sigma_s = 90$ kg/mm² läßt sich bei dünnen Blechen aus 1450 erreichen, da hierfür eine Anlaßtemperatur von 500° C genügt.

Cr-Mo-Stähle mit höherem Kohlenstoffgehalt als 0,28 vH sind nicht mehr schweißsicher. Die Stähle erreichen aber eine etwas größere Härte und Festigkeit. Sie haben deshalb z. B. für Holmrohre mit $\sigma_B = 125$ bis 130 kg/mm² Festigkeit Verwendung gefunden. Infolge der höheren Abschreckhärte lassen sich auch bei geringerer Abkühlungsgeschwindigkeit (Olthärtung, größere Stangendurchmesser) brauchbare Zähigkeitswerte (bei $\sigma_B \geq 90$ kg/mm²) erhalten; vgl. Kurve 2 in Abb. 4 und Zahlentafel 5. Mit dem Stahl mit 0,30 bis 0,37 C, 0,9 bis 1,2 Cr, 0,15 bis 0,25 Mo, 0,5 bis 0,8 Mn, < 0,35 Si (Fliegwerkstoff 1454) ließ sich eine Festigkeit von 90 kg/mm² bis etwa 80 mm Stangendurchmesser erreichen. Der Anwendungsbereich dieses Werkstoffes ist aber sehr klein.

2. Molybdänfreie Stähle

Ein großer Teil der Anforderungen, die an die Chrom-Molybdänstähle gestellt werden, läßt sich auch durch molybdänfreie Stähle erfüllen. Durch Einsatz derartiger Stähle für alle die Teile, für die sie ausreichend sind, läßt sich daher der weitaus größte Teil des Molybdänverbrauches ohne weiteres einsparen.

Die in Frage kommenden Stähle teilt man am besten ein in schweißbare und nicht schweißbare Stähle. Bei den schweißbaren Stählen ist die Auswahl begrenzt. Geht man von dem Cr-Mo-Stahl 1452 aus, so erhält man durch Weglassung des Molybdängehaltes eine merkliche Verringerung der Durchhärbarkeit. Diese läßt sich wenigstens teilweise dadurch ausgleichen, daß der Mangan-gehalt erhöht wird oder daß das Molybdän durch Vanadin ersetzt wird, zweckmäßig durch Verbindung beider Maßnahmen. In Zahlentafel 7 und Abb. 7 und 8 sind die Festigkeitseigenschaften dargestellt, die bei einem schweißbaren Chrom-Vanadin-Stahl durch Vergütung erreicht werden. Die Grenze der Durchvergütbarkeit auf $\sigma_B = 90 \text{ kg/mm}^2$ bei genügender Zähigkeit dürfte etwa bei 50 mm Stangendurchmesser liegen, wobei Wasserhärtung Voraussetzung ist. Die Anlaßtemperatur liegt dann noch oberhalb 500°C , so daß gute Zähigkeitswerte gewährleistet sind. Bei Ölhärtung werden die gleichen Verhältnisse etwa bis 30 mm Stangendurchmesser erreicht. Nur ausnahmsweise wird man auch hier bis 50 mm Durchmesser gehen, wenn hohe Zähigkeit nicht erforderlich ist. Hierdurch ist naturgemäß auch die Anwendung des Werkstoffes für kompliziertere Bauteile eingeschränkt, die nach der Vorbearbeitung bzw. nach dem Schweißen vergütet werden und bei denen mit Rücksicht auf Verzug Wasserhärtung nicht möglich ist. Ein Vergleich der Eigenschaften zwischen dem Chrom-Vanadin-Stahl- und -1452-führt zu der Feststellung, daß ein Durchmesser von 40 bis 50 mm beim Cr-V-Stahl bezüglich der Durchvergütbarkeit einem Durchmesser von etwa 80 mm bei 1452 entspricht. Höhere Festigkeit, mindestens 110 kg/mm^2 , ist nur bei niedriger Anlaßtemperatur, etwa 400°C , zu erreichen. Es können dann keine hohen Anforderungen an die Zähigkeit gestellt werden, auch muß bei größeren Querschnitten die Härtung stets in Wasser vorgenommen werden. Die Anwendungsgrenzen sind aus Zahlentafel 7 a zu ersehen.

Bei Verzicht auf Schweißbarkeit steht eine wesentlich größere Anzahl Stähle zur Verfügung, da in diesem Falle auch eine Erhöhung des Kohlenstoffgehaltes zur Festigkeitssteigerung anwendbar ist. Die hier in Frage kommende Stähle sind in ihren Eigenschaften am besten mit dem nichtschweißbaren Cr-Mo-Stahl 1454 zu vergleichen. Während aber 1454 wegen des großen Anwendungsbereiches von 1452 (durch den für 1454 nur ein geringer Zusatzbereich verblieb) nur geringe Bedeutung zukam, ist der Anwendungsumfang dieser Stähle bei Ersatz von 1452 durch einen Chrom-Vanadium-Stahl wesentlich vergrößert. Als Vergleichsstoffe kommen Chrom-Mangan-, Chrom-Mangan-Vanadium- und Chrom-Mangan-Silizium- u. auch chromfreie Stähle in Frage.

In Zahlentafel 8 sind die Festigkeitswerte für einen Chrom-Mangan-Vanadium-Stahl, Fliegwerkstoff 1810, dargestellt. In der Zahlentafel ist das Ergebnis von Festigkeitsversuchen an Schmiedestücken aus verschiedenen Werkstoffen dargestellt (Probenentnahme s. Abb. 9). Der Werkstoff hat selbst bei Vergütung auf eine Festigkeit von über 110 kg/mm^2 noch brauchbare Zähigkeitswerte. Dies setzt jedoch besondere Sorgfalt bei der Herstellung und Vergütung voraus. Häufig findet man bei diesem Stahl verhältnismäßig geringe Zähigkeit, auch wenn die Querschnitte nicht sehr groß sind (vgl. hierzu Zahlentafel 8b). Beim Einsatz dieses Werkstoffes an Stellen, bei denen hohe Zähigkeit erforderlich ist, ist daher Vorsicht erforderlich. Auf jeden Fall ist die Zähigkeit des Stahles besonders zu prüfen.

In Zahlentafel 9 und Abb. 10 und 11 sind die Eigenschaften eines Chrom-Mangan-Stahls mit etwas erhöhtem Si-Gehalt bei verschiedenen Vergütungsstufen dargestellt. Die Werte beziehen sich auf einen Stangendurchmesser von 60 mm. Die Zähigkeit ist auch bei einer Vergütung auf nur 98 kg/mm^2 schon recht gering, insbesondere bei tiefen Temperaturen und quer zur Faser,

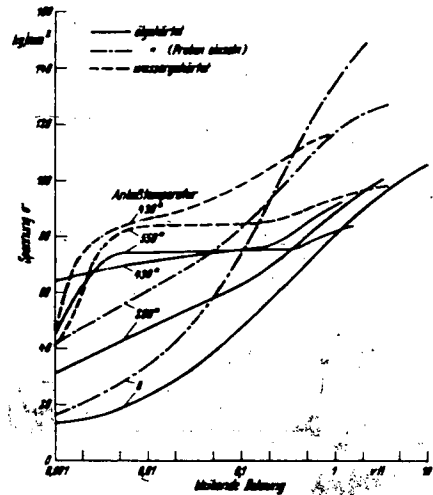


Abb. 7 Feinmeßversuche an verschieden hoch vergütetem Cr-V-Stahl

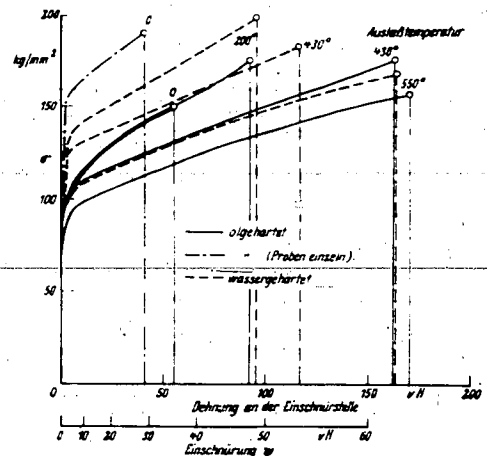


Abb. 8 Verlauf der wahren Spannung über der Dehnung im Einschnürquerschnitt bei verschieden hoch vergütetem Cr-V-Stahl

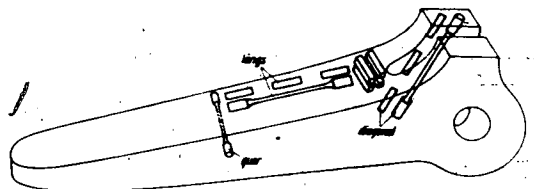


Abb. 9 Probeentnahme für die Vergleichsversuche
Zahlentafel 8

Zahlentafel 7. Festigkeitswerte von schweißbarem Cr-V-Stahl

Zusammensetzung	0,24 C, 0,61 Mn, 0,29 Si, 0,85 Cr, 0,16 V, 0,08 Mo, 0,016 P, 0,011 S									0,25 C, 1,24 Mn, 0,27 Si, 0,45 Cr, 0,17 V, 0,025 Mo, 0,013 P, 0,007 S			
Stangendurchmesser mm	30 mm									50 mm			
Wärmebehandlungsstand	Anliefegeglüht	Ölgehärtet von 870° C, angelassen bei					Wassergehärtet von 870° C, angelassen bei			Ölgehärtet v. 870° C, angelassen bei		Wassergeh. v. 870° C, angelassen bei	
		550° C	430° C	200° C	0	0 *)	550° C	430° C	200° C	550° C	430° C	550° C	430° C
Zugversuch: R kg/mm ² vH	201	208	205	205	204	203	207	206	201	209	208	208	206
$\sigma_{0,01}$ kg/mm ²	25	74	72	52	29	43	84	89	67	64	66	78	83
$\sigma_{0,2}$ kg/mm ²	37	76	77	69	57	93	86	104	93	65	67	79	90
σ_R kg/mm ²	60	89	99	105	105	149	98	117	127	78	88	89	110
σ_K kg/mm ²	121	158	176	176	150	190	169	183	199	148	167	153	179
δ_{10} vH	20	11	10	12	16	5	10	—	8	15	14	11	8
δ_5 vH	27	17	16	17	20	8	14	—	13	23	21	17	13
ψ vH	67	63	62	48	36	29	62	54	49	65	63	63	58
A mkg/cm ² vH	100	115	131	91	56	58	129	116	96	—	—	—	—
Härteprüf. H 5/750/20 kg/mm ²	181	275	313	312	304	387	320	393	422	241	276	271	344
Biegeversuch + 20° kg/mm ²	—	>168	>181	194	195	249	—	—	—	>147	>161	>162	178
σ_R — 20° kg/mm ²	—	>168	>182	199	—	248	—	—	—	>151	>168	—	203
— 60° kg/mm ²	—	>174	>195	209	—	255	—	—	—	>162	>167	>183	186
Kerbbiegevers. + 20° kg/mm ²	—	167	188	175	170	207	—	—	—	153	167	166	186
σ_{RK} — 20° kg/mm ²	—	173	186	175	—	230	—	—	—	153	169	173	221
— 60° kg/mm ²	—	249?	208	189	—	230	—	—	—	164	177	176	193
Kerbschlagprobe													
σ_K + 20° mkg/cm ²	5,4	16,3	9,8	9,1	5,5	6,3	12,0	6,2	7,2	17,5	14,5	16,8	12,4
— 20° mkg/cm ²	—	9,1	6,8	7,0	5,0	5,0	9,8	6,3	7,1	12,1	9,4	15,3	7,2
— 60° mkg/cm ²	> 2	7,9	6,3	5,0	3,8	7,4	6,7	6,6	5,1	10,9	2,5-6,3	9,6	6,5

*) Probestücke einzeln gehärtet, in allen anderen Fällen Stangenabschnitte im ganzen gehärtet.

Zahlentafel 7a. Vergütbarkeit von Blechen von 3 bis 10 mm Dicke und Stangen von 50 mm Durchmesser aus schweißbaren Cr-Mn-V-Stählen

Zusammensetzung	0,26 C, 0,85 Cr, 0,74 Mn, 0,28 Si, 0,12 Mo, 0,23 V, 0,024 S, 0,008 P								0,26 C, 0,68 Cr, 1,23 Mn, 0,25 Si, 0,04 Mo, 0,20 V, 0,019 S, 0,007 P							
Wärme- behandlungszustand	Ölgehärtet von 870° C, angelassen bei								Ölgehärtet von 870° C, angelassen bei				Wassergehärtet von 870° C, angelassen bei			
	550° C				400° C				550° C		400° C		550° C		400° C	
Blechdicke mm	3	6	10	—	3	6	10	—	6	10	6	10	6	10	6	10
Stangendurchmesser mm	—	—	—	50	—	—	—	50	—	—	—	—	—	—	—	—
Zugversuch:																
$\sigma_{0,01}$ kg/mm ²	100	87	86	55	126	94	90	70	87	83	123	103	105	104	131	131
σ_R kg/mm ²	105	95	94	72	137	110	107	93	94	91	130	111	107	107	136	137
σ_K kg/mm ²	—	149	144	154	—	164	156	176	140	145	175	159	147	153	173	181
δ_{10} vH	7	9	10	18	5	7	7	10	7	8	5	4	8	8	5	6
δ_5 vH	11	13	15	25	7	11	12	16	12	15	9	8	13	13	8	10
ψ vH	—	49	49	69	—	46	46	62	44	51	37	40	40	44	36	38
Kerbschlagprobe																
σ_K + 20° C mkg/cm ²	—	—	7,4	17,5	—	—	5,1	11,7	—	8,8	—	4,4	—	6,4	—	3,5
— 20° C mkg/cm ²	—	—	6,9	18,1	—	—	4,8	7,5	—	7,5	—	4,0	—	6,0	—	3,1
— 60° C mkg/cm ²	—	—	3,5	8,3	—	—	3,6	2,8	—	4,4	—	3,9	—	4,3	—	2,9

Zahlentafel 8. Untersuchung des Schmiedestückes nach Abb. 9 aus vier verschiedenen Werkstoffen

Werkstoff-Norm	FL.W. 1610			VMC 140			FL.W. 1620			FL.W. 1208		
Zusammen- setzung in vH	C	0,46		0,40			0,24			0,20		
	Mn	0,72		1,21			0,77			1,36		
	Si	0,29		0,58			0,46			0,41		
	P	0,014		0,02			0,008			0,019		
	S	0,013		0,011			0,005			0,016		
	Cr	0,77		1,12			2,47			1,50		
	Ni	Sp		Sp			Sp			Sp		
	Mo	< 0,01		< 0,01			0,09			< 0,01		
	V	0,18		0,0			0,16			—		
Probeentnahme	längs	quer	diagonal	längs	quer	diagonal	längs	quer	diagonal	längs	quer	diagonal
σ_{el} kg/mm ²	~ 105	~ 111	~ 97	~ 96	~ 92	~ 90	~ 99	~ 99	~ 89	~ 84	~ 91	—
σ_{el} kg/mm ²	110,1	114,8	102,9	101,5	100,4	99,4	108,1	109,5	109,5	117,5	119,3	—
σ_{B} kg/mm ²	118,2	120,6	112,0	113,2	112,9	111,0	118,1	117,8	119,5	147,7	150,0	—
δ_5 vH	9,4	10	10,9	14,3	10	11,1	13,4	11,7	14,3	10	6	—
δ_{10} vH	6,3	6,6	5,4	9,3	7,6	8,1	8,3	7,0	8,4	5,9	3,9	—
ψ vH	44,6	32,7	26,7	47,5	29,2	26,1	57,5	42,2	43,7	52	23	—
σ_{R} kg/mm ²	165,0	158,0	137,0	168,0	142,0	141,0	188,0	165,0	164,0	231,0	177,5	—
E kg/mm ²	20 650	20 750	—	20 600	20 100	—	20 800	20 920	—	20 450	—	—
$\sigma_{\text{el}} : \sigma_{\text{B}}$	0,93	0,95	0,92	0,90	0,91	0,90	0,92	0,93	0,92	0,80	0,80	—
H_{B} kg/mm ²	351	362	334	338	329	338	360	345	345	441	—	—
$\sigma_{\text{B}} : H_{\text{B}}$	0,34	0,33	0,34	0,34	0,34	0,33	0,33	0,34	0,345	0,34	—	—
$\sigma_{\text{K} + 20^\circ}$ mkg/cm ²	8,2	4,2 + 3,3	3,8	4,1	2,0 + 3,2	3,1	5,4	3,2 + 4,6	3,7	10,4	6,3 + 7,3	—
$\sigma_{\text{K} - 30^\circ}$ mkg/cm ²	4,4	3,1	—	1,7	2,6	2,2	5,3	4,5	4,2	6,6	2,6	—
$\sigma_{\text{K} - 60^\circ}$ mkg/cm ²	(3,0—4,0)*	3,2	2,9	2,3	1,5	0,9	5,5	3,6	3,3	4,3	2,6	—

*) Geschätzt.

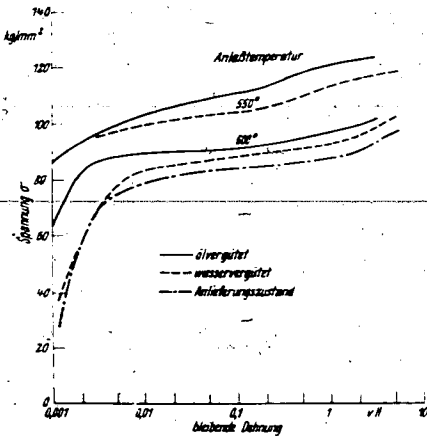


Abb. 10 Feinmeßversuche mit Cr-Mn-Stahl bei Öl- und Wasservergütung

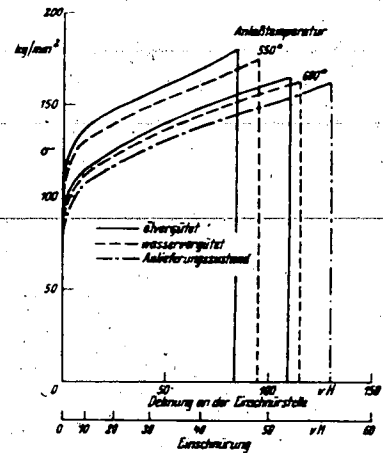
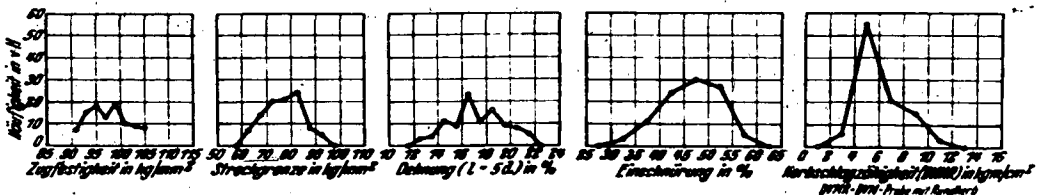


Abb. 11 Verlauf der wahren Spannung bei Cr-Mn-Stahl bei verschiedener Vergütung

Abb. 13 Festigkeitseigenschaften eines Mn-Si-Vergütungsstahles mit 0,55 C, 1,30 Mn und 0,70 Si. Vergütet auf 90 bis 105 kg/mm² Zugfestigkeit (Häufigkeitskurven von je 167 Proben)

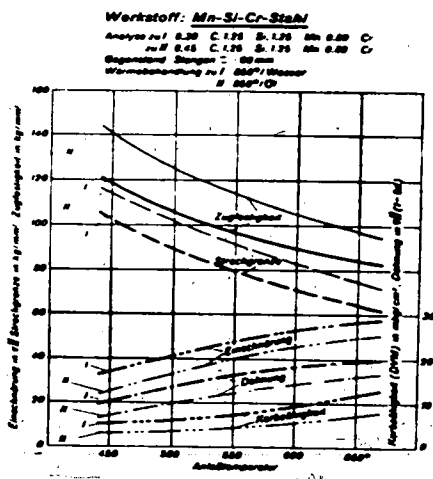


Abb. 12 Vergütungsschaubilder von zwei Mn-Si-Cr-Stählen, verschieden vergütet

so daß dieser Stahl weniger gut geeignet ist. Das gleiche ergibt sich auch aus dem Vergleich der Schmiedestücke, s. Zahlentafel 9.

Nach Untersuchungen bei der Friedrich-Krupp-A.-G. sind auch Mn-Si-Cr-Stähle zur Erzielung hoher Festigkeitswerte bei großen Durchmessern gut geeignet. Abb. 12 zeigt das Ergebnis dieser Versuche⁴⁾.

Die geforderten Festigkeitswerte, zum mindesten soweit es sich um die Vergütungsstufe 90 kg/mm² handelt, lassen sich auch durch chromfreie Stähle erzielen. Dies kann sowohl aus wirtschaftlichen Erwägungen als auch um Chrom als Legierungselement zu sparen von Bedeutung sein. Für diese Vergütungsstufe eignen sich die reinen Mangan-Silizium-Stähle⁵⁾. In Zahlentafel 10 und Abb. 14 und 15 sind die Eigenschaften eines Mangan-Silizium-Stahls (VMS 135 nach DIN-Vornorm) bei verschiedener Vergütung dargestellt. Der Stahl enthält allerdings 0,22 vH Cr. Die Werte beziehen sich auf einen Stangendurchmesser von 60 mm. Bei einer Vergütung auf 90 kg/mm² sind die Zähigkeitswerte längs noch recht gut und quer werden wenigstens bei Raumtemperatur noch die Werte erreicht, die bisher von den höher legierten Stählen 1456 und 1460 in den höheren Vergütungsstufen als Mindestwerte gefordert wurden und die daher auch hier noch ausreichen müßten. Bei 50 mm Stangendurchmesser wurden mit einem etwas niedriger legierten Mangan-Siliziumstahl noch günstigere Werte erzielt. Der Werkstoff hatte folgende Zusammensetzung: 0,36 C, 1,24 Mn, 1,34 Si, 0,005 P, 0,020 S, 0,10 Cr, < 0,05 Mo. Nach Wasserhärtung von 880°C und Anlassen bei 500°C wurden folgende Werte erzielt: $\sigma_{0,2} = 76 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_B = 99 \text{ kg/mm}^2$, $\delta_L = 19 \text{ vH}$, $\Psi = 41 \text{ vH}$. Die Kerschlagzähigkeit beträgt bei +20°C 7,7 mkg/cm² bei -20°C 4,9 mkg/cm² und bei -60°C 4,2 mkg/cm².

Ebenso gut verhalten sich Mangan-Vanadium-Stähle, wie aus den Untersuchungen der Friedrich-Krupp-A.-G. (Anm. 4) hervorgeht, s. Abb. 16. Eigene Untersuchungen an Stangen von 80 mm Quadratquerschnitt aus

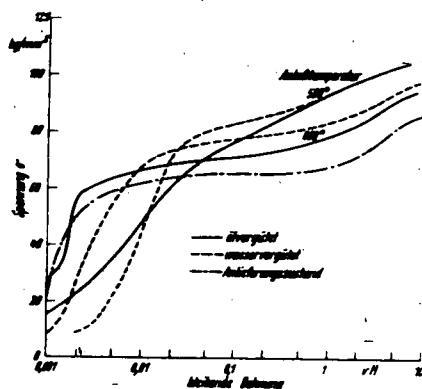


Abb. 14 Feinmeßversuche von Mn-Si-Stahl bei Öl- und Wasservergütung

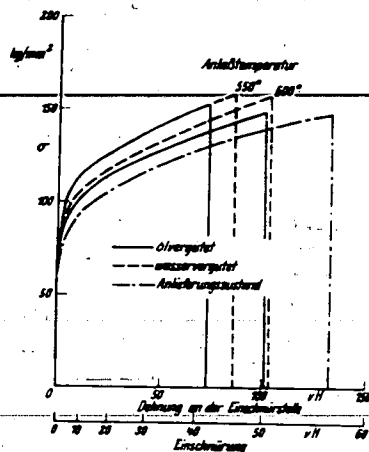


Abb. 15 Verlauf der wahren Spannung bei Mn-Si-Stahl bei verschiedener Vergütung

MnV-Stahl ergaben die in Zahlentafel 11 angegebenen Werte. Der Stahl mit 0,41 vH C ergibt auch bei 525°C Anlaßtemperatur noch Festigkeitswerte unter 90 kg/mm², die Vergütbarkeit des Stahls mit 0,5 C ist ausreichend, auch Dehnung, Einschnürung und Kerschlagzähigkeit sind gut. Nur die Kerschlagzähigkeit in Querrichtung ist verhältnismäßig niedrig.

3. Höher legierte Stähle

Zur Durchvergütung größerer Querschnitte, z. B. für Flügelanschlußbeschläge, aber auch größerer Motor- und Fahrwerksteile großer Flugzeuge und zur Erzielung höherer Festigkeitswerte, über 110 kg/mm², sind höher legierte Stähle erforderlich. Hierfür wurde früher hauptsächlich der Chrom-Nickel-Stahl VCN 45 mit einer Mindestfestigkeit von 120 bis 130 kg/mm² verwendet. Mit Rücksicht auf die Einsparung des Nickels wurde bereits im Jahre 1934 zu einem Cr-Ni-Mo-Stahl mit 2 vH Ni übergegangen. Die Durchhärbarkeit dieses Stahls erwies sich in der Folge als ausreichend für alle Zwecke des Zellenbaues, und der Stahl erwies sich außerdem infolge fehlender Anlaßsprödigkeit und hoher Zähigkeit auch in

⁴⁾ H. Kallen und F. Meyer: Sparstoffarme Mangan-Vergütungsstähle mit Zusätzen von Si, Cr oder V und ihre Bewährung in der Praxis. Techn. Mitteilungen Krupp, Forschungsberichte, 2. Jg. 1933, S. 215.

⁵⁾ Abb. 13 zeigt die Eigenschaften eines Stahls mit 0,55 C, 1,3 Mn und 0,7 Si nach H. Kießler: Nickel- und molybdänfreie Baustähle. VDI-Zeitschrift Bd. 84 (1940) Nr. 23, S. 335.

Zahlentafel 8b.

Festigkeit vorgeschmiedeter Stücke für den Beschlag nach Abb. 9, geliefert von einem anderen Herstellerwerk

Werkstoff-Norm	FLW. 1610	VMC 140	FLW. 1620	FLW. 1208	FLW. 1460,5										
Werkstoff-behandlung	1½ Std. 860° C Öl 1½ Std. 580° C Luft	1½ Std. 880° C Öl 1½ Std. 570° C Luft	1½ Std. 880° C Öl 1½ Std. 550° C Luft	1½ Std. 860° C Öl 2 Std. 100° C Luft	Anlieferungszustand										
Zusammensetzung in vH	C	0,54	0,38	0,31	0,22	0,30									
	Mn	0,66	1,14	0,63	1,28	0,63									
	Si	0,31	0,66	0,31	0,26	0,33									
	P	0,006	0,024	0,010	0,008	0,049									
	S	0,023	0,020	0,010	0,018	0,016									
	G	1,02	1,11	2,46	1,21	2,16									
	Ni	—	—	—	—	2,22									
	Mo	0,09	0,03	0,06	0,13	0,34									
V	0,14	Spuren	0,23	0,04	—										
Probeneinnahme	längs	quer	diagonal	längs	quer	diagonal	längs	quer	diagonal	längs	quer	diagonal	längs	quer	diagonal
$\sigma_{0,2}$ kg/mm²	81	85	88	86	90	92	75	75	78	29	44	35	90	92	71
$\sigma_{0,5}$ kg/mm²	85	86,2	92,6	97,8	98,5	101	96,3	95,9	97,8	59,9	69	62,5	107,2	106,8	106
σ_B kg/mm²	105,2	108,3	111	110	111,3	111,6	112,3	114,2	112,8	111,8	105,9	121,4	119,1	121,9	121,9
δ_5 vH	16	11,4	10,3	13,1	12,3	11,7	16	10,9	11,7	26,3	14,3	17,4	13,7	12,9	12,9
δ_{10} vH	10,6	8,6	7,9	8,3	8,7	7,7	10,6	9,3	8,3	15	8,9	11,9	8,7	8,6	9
ψ vH	49,2	34,1	23,5	46,4	34	35,4	53,2	40,4	37,4	39,1	32,7	38,9	57,5	38,5	51,7
σ_R kg/mm²	162	145,5	137	164	149	152	173	156	167	171	158,5	158	194	162	188,5
E kg/mm²	20 900	20 850	20 500	20 800	20 550	20 600	21 000	21 000	20 850	20 580	20 000	20 500	20 300	20 000	20 200
$\sigma_{0,2} - \sigma_B$ kg/mm²	0,81	0,82	0,83	0,90	0,88	0,91	0,85	0,85	0,86	0,53	0,62	0,59	0,88	0,90	0,87
$H_{5/750/20}$ kg/mm²	323	329	361	337	333	334	356	361	366	324	325	317	366	366	363
$\sigma_B : \sigma_{0,2}$	0,33	0,33	0,31	0,33	0,33	0,33	0,32	0,31	0,31	0,35	0,34	0,33	0,33	0,33	0,34
$\sigma_K + 20^\circ \text{C}$ mkg/cm²	4,1	2	2,1	2,4	1,4	1,2	3,4	3,1	3	1,3	1,9	5,7	4,6	3,5	3,9
$\sigma_K - 20^\circ \text{C}$ mkg/cm²	3,7	1,3	1,8	1,2	0,8	0,7	2,7	2,8	1,2	4,8	3,9	2,7	—	3,3	5,5
$\sigma_K - 60^\circ \text{C}$ mkg/cm²	2,8	1	1,6	0,75	0,8	0,5	2,2	1,4	1,1	3,8	2,7	2,3	3,7	3,4	3,7

Zahlentafel 9. Festigkeitswerte von Cr-Mn-Stahl mit folgender Zusammensetzung:

0,29 C, 1,34 Mn, 0,54 Si, 0,024 P, 0,015 S, 1,12 Cr, 0,04 Mo.

Stängendurchmesser 80 mm.

Zustand	Anlieferungszustand vergütet	Ölgehärtet von 860° C. 1 $\frac{1}{2}$ Std. angelassen bei °C		Wassergehärtet von 860° C. 1 $\frac{1}{2}$ Std. angelassen bei °C	
		600	550	600	550
Zugversuch E kg/mm ² vH	207	208	202	209	205
$\sigma_{0,2}$ kg/mm ²	82	90	106	85	101
$\sigma_{0,5}$ kg/mm ²	85	93	113	89	106
σ_B kg/mm ²	98	105	125	102	119
σ_R kg/mm ²	161	165	180	162	175
δ_5 vH	13	11	9	10	10
δ_{10} vH	19	13	12	13	14
ψ vH	56	52	46	54	49
A mkg/cm ²	108	101	93	102	98
Härteprüfung $H_{5/750/20}$ kg/mm ²	294	310	376	310	356
Biegeversuch $\sigma_B + 20^\circ \text{C}$ kg/mm ²	185	195	204	191	220
— 20°C kg/mm ²	191	195	238	193	219
— 60°C kg/mm ²	200	206	251	204	225
Kerbbiegeversuch $\sigma_{BK} + 20^\circ \text{C}$ kg/mm ²	171	189	208	179	183
— 20°C kg/mm ²	170	183	190	187	175
— 60°C kg/mm ²	161	178	183	172	165
Kerbschlagprobe $\sigma_K + 20^\circ \text{C}$ mkg/cm ²	3,7	2,5	2,0	4,6	2,3
— 20°C mkg/cm ²	2,3	2,0	1,8	1,9	1,0
längs — 60°C mkg/cm ²	1,3	1,3	1,2	1,5	1,0
Kerbschlagprobe $\sigma_K + 20^\circ \text{C}$ mkg/cm ²	—	0,6	—	—	—
— 20°C mkg/cm ²	1,1	—	—	—	—
quer — 60°C mkg/cm ²	0,3	—	0,4	—	0,5

Zahlentafel 10. Festigkeitswerte von Mn-Si-Stahl mit folgender Zusammensetzung:
0,36 C, 1,32 Mn, 1,53 Si, 0,025 P, 0,013 S, 0,22 C, 0,06 Mo. Stangendurchmesser 60 mm

Zustand	Anlieferungs- zustand vergütet	Ölgehärtet von 860° C, 1 1/2 Std. angelassen bei °C		Wassergehärtet von 860° C, 1 1/2 Std. angelassen bei °C	
		600	550	600	550
Zugversuch E kg/mm ² vH	206	206	200	206	203
$\sigma_{0,02}$ kg/mm ²	63	68	60	73	70
$\sigma_{0,2}$ kg/mm ²	65	73	81	79	86
σ_B kg/mm ²	86	94	104	97	106
σ_K kg/mm ²	148	148	153	157	157
δ_{10} vH	18	16	12	15	13
δ_5 vH	22	23	15	23	18
ψ vH	57	50	43	51	46
A mkg/cm ²	100	85	70	98	81
Härteprüfung H 5/750/30 kg/mm ²	247	238	326	277	325
Biegeversuch $\sigma_B + 20^\circ$ kg/mm ²	> 167	183	205	190	203,5
— 20° kg/mm ²	> 173	176	206	183	208
— 60° kg/mm ²	> 183	185	219	188	223
Kerbbiegeversuch $\sigma_{BK} + 20^\circ$ kg/mm ²	159	166	183	177	191
— 20° kg/mm ²	162	166	186	180	190
— 60° kg/mm ²	161	158	195	161	182
Kerbschlagprobe $\sigma_K + 20^\circ$ mkg/cm ²	7,5	3,7	3,4	4,8	3,4
— 20° mkg/cm ²	6,1	3,5	2,5	2,7	2,5
längs — 60° mkg/cm ²	5,6	2,2	2,2	1,7	1,7
Kerbschlagprobe $\sigma_K + 20^\circ$ mkg/cm ²	3,7	1,3	—	1,5	—
— 20° mkg/cm ²	2,0	—	—	—	—
quer — 60° mkg/cm ²	1,2	0,6	—	0,6	0,6

Zahlentafel 11. Mn V-Stahl. Stangen von 60 mm Quadratquerschnitt

Zusammensetzung	0,41 C, 0,73 Mn, 0,81 Si, 0,12 V, 0,07 Cr, 0,06 Mo, 0,021 P, 0,014 S								0,50 C, 0,86 Mn, 0,95 Si, 0,15 V, 0,01 Cr, 0,02 Mo, 0,024 P, 0,026 S							
	Ölgehärtet von 860° C, 2 h angelassen bei				Wassergeh. v. 860° C, 2 h angelassen bei				Ölgehärtet von 860° C, 2 h angelassen bei				Wassergeh. v. 860° C, 2 h angelassen bei			
Wärmebehandlung	625° C		525° C		625° C		525° C		625° C		525° C		625° C		525° C	
Probenentnahme	außen	innen	außen	innen	außen	innen	außen	innen	außen	innen	außen	innen	außen	innen	außen	innen
Zugversuch E kg/mm ² vH	212	214	204	206	209	211	208	210	214	212	207	209	210	212	207	209
$\sigma_{0,02}$ kg/mm ²	60	56	60	61	60	60	66	62	66	62	71	67	69	60	76	70
$\sigma_{0,2}$ kg/mm ²	60	56	60	61	62	60	66	62	66	62	71	67	69	64	77	71
σ_B kg/mm ²	83	83	87	84	86	85	89	87	92	87	96	90	92	89	100	96
σ_K kg/mm ²	152	153	147	99	155	150	151	148	165	147	160	103	159	153	168	155
δ_{10} vH	19	20	17	17	19	20	16	14	19	17	18	19	20	18	15	15
δ_5 vH	26	26	20	22	24	25	24	20	24	24	24	24	25	25	20	21
ψ vH	60	56	55	34	61	58	56	55	58	53	55	34	57	56	55	54
Härteprüfung H 5/750/30 kg/mm ²	252	247	267	264	260	260	278	272	263	265	278	273	266	266	272	275
Biegeversuch $+ 20^\circ$ kg/mm ²	> 153	> 160	> 160	> 160	> 160	> 160	> 160	> 160	> 168	> 178	> 178	> 178	> 172	> 172	> 172	> 172
σ_{BK} — 60° kg/mm ²	> 167	> 173	> 173	> 173	> 174	> 174	> 174	> 174	> 182	> 192	> 192	> 192	> 185	> 185	> 185	> 185
Kerbbiegeversuch $+ 20^\circ$ kg/mm ²	142	142	148	148	152	152	153	153	147	152	152	152	153	153	153	153
σ_{BK} — 60° kg/mm ²	132	132	145	145	142	142	146	146	144	144	150	150	142	142	152	152
Kerbschlagprobe $\sigma_K + 20^\circ$ mkg/cm ²	7,9	6,5	7,8	6,5	10,4	7,7	9,2	5,5	5,7	6,7	5,1	5,4	8,2	7,5	5,2	5,1
— 20° mkg/cm ²	5,6	7,77	4,3	4,3	5,6	6,1	5,3	4,7	12,6	5,6	5,7	4,3	4,7	6,0	4,7	4,5
längs — 60° mkg/cm ²	3,0	3,1	1,5	3,7	4,8	2,4	4,3	4,8	4,7	3,9	4,7	3,9	4,3	4,3	4,1	3,9
Kerbschlagprobe quer $\sigma_K + 20^\circ$ mkg/cm ²	1,8	2,6	1,9	3,0	2,2	3,2	2,3	2,4	2,3	1,8	1,8	2,4	2,5	2,9	1,8	1,8
— 60° mkg/cm ²	1,2	1,1	1,3	1,3	1,6	—	1,5	1,6	1,5	1,5	1,6	1,0	1,5	1,3	1,5	0,5

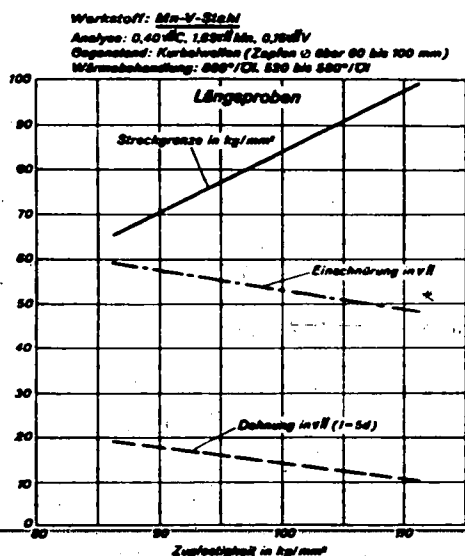


Abb. 16 Verhältnis der Streckgrenze, Dehnung und Einschnürung zur Zugfestigkeit bei Kurbelwellen aus Mn-V-Stahl

der Kälte als überlegen. Für diesen Stahl wurde in dem Fliegwerkstoffblatt 1460 folgende Zusammensetzung festgelegt: 0,20 bis 0,24 C, 1,8 bis 2,3 Ni, 1,8 bis 2,3 Cr, 0,2 bis 0,4 Mo (0,1 bis 0,25 V), 0,3 bis 0,8 Mn, < 0,5 Si, < 0,06 P + S. Der Stahl läßt sich bei Durchmessern bis zu 200 mm auf 90 kg/mm² Festigkeit vergüten, bei Durchmessern bis zu 150 mm auf $\sigma_B = 115$ kg/mm² und bei Durchmessern bis etwa 100 mm auf $\sigma_B = 130$ kg/mm². In Zahlentafel 12 sind die nach dem Fliegwerkstoffblatt an diesen Stahl gestellten Anforderungen zusammengestellt und durch die gemäß Sonderabmachungen erreichbaren Werte ergänzt. Der Werkstoff ist bei richtiger Vergütung selbst bei sehr tiefen Temperaturen noch zäh. Versuche von A. Pomp, A. Kriech und G. Haupt*) (s. Zahlentafel 13) ergaben, daß bei einem Molybdäengehalt von 0,4 vH selbst bei -180° noch eine Kerbschlagzähigkeit von 5 mkg/cm² bei $\sigma_B = 105$ und 118 kg/mm² erreicht wird. Bei geringerem Molybdäengehalt ist die Kerbzähigkeit bei dieser tiefen Temperatur schon wesentlich niedriger, doch ist sie bei den praktisch in Frage kommenden Temperaturen von -60° noch ausreichend. In der höheren Festigkeitsstufe und insbesondere bei Beanspruchung quer zur Faser bei größeren Stangendurchmessern ist die Zähigkeit selbstverständlich niedriger als die hier angegebenen Werte. Aus Zahlentafel 12 sind hierfür die Grenzen zu entnehmen. Infolge seiner guten Eigenschaften ist der Stahl 1460 der wichtigste Baustoff für höchstbeanspruchte Flugzeugteile geworden.

Um für Teile mit geringeren Durchmessern, für die der Stahl 1460 noch nicht erforderlich ist (andererseits aber 1453 nicht ausreicht), einen nickelfreien Werkstoff verwenden zu können, wurde ein Cr-Mo-Stahl in den Fliegwerkstoffen vorgesehen. Dieser Stahl, Fliegwerkstoff 1453, hat folgende Zusammensetzung: 0,24 bis 0,24 C, 2,3 bis 2,7 Cr, 0,2 bis 0,26 Mo, 0,2 bis 0,35 V, 0,4 bis 0,8 Mn, < 0,4 Si, < 0,06 P + S. Der Werkstoff läßt sich in Stangen bis zu 150 mm Durchmesser auf $\sigma_B = 90$ kg/mm² vergüten und bis zu 100 mm Durchmesser auf $\sigma_B = 110$ kg/mm². Die geforderten und erzielbaren Werte

*) A. a. O.

sind in Zahlentafel 12 mit angegeben. In Zahlentafel 14 sind einige Versuchsergebnisse über Festigkeit und Zähigkeit vergüteter Stangen in der früher verwendeten Festigkeitsstufe $\sigma_B = 125$ kg/mm² angegeben. Der Stahl erreicht verhältnismäßig hohe Festigkeitswerte und ist für kleinere Durchmesser gut geeignet bei größeren Durchmessern ergibt er aber in den höheren Festigkeitsstufen häufig nicht mehr genügende Zähigkeit. Er hat sich daher für Durchmesser über 50 mm bei der Festigkeitsstufe $\sigma_B = 125$ kg/mm² nicht bewährt, so daß diese Festigkeitsstufe fallen gelassen werden mußte. Auch bei geringerer Festigkeit sind praktisch gelegentlich Schwierigkeiten durch ungenügende Zähigkeit vorgekommen. Bei einwandfreier Vergütung, insbesondere durch Wasserhärtung, und genügend hohes Anlassen werden jedoch gute Kerbzähigkeitswerte, auch bei tiefen Temperaturen erzielt. Abb. 17 zeigt die Zähigkeit des Werkstoffes bei tiefen Temperaturen.

Ein Stahl gleicher Zusammensetzung, jedoch ohne den Molybdäengehalt, ist ebenfalls für sehr viele Teile in bezug auf Festigkeit und Zähigkeit ausreichend. Dieser Werkstoff wurde unter der Bezeichnung 1620 in den Fliegwerkstoffblättern aufgenommen. Der Vanadengehalt ist mit 0,15 bis 0,30 vH vorgesehen. Die Festigkeitseigenschaften sind in Zahlentafel 12 mit angegeben. In Zahlentafel 14 sind Versuchsergebnisse mit diesem Werkstoff angegeben; über die Eigenschaften vgl. auch Zahlentafel 81. Die bisherigen Ergebnisse mit diesem Stahl zeigen jedoch, daß die Zähigkeit in den meisten Fällen sehr gering ist, so daß die Anwendung des Stahles mit größeren Querschnitten und für höchstbeanspruchte und lebenswichtige Flugzeugteile besondere Vorsicht erfordert. Es ist daher stets die Zähigkeit besonders zu prüfen.

4. Spitzstähle

Die höchsten Festigkeitswerte bei noch guter Zähigkeit lassen sich mit Chrom-Nickel-Stählen erzielen, die zusätzlich mit Wolfram oder Molybdän + Vanadin legiert sind. Diese Stähle erreichen bei Lufthärtung Festigkeitswerte von über 200 kg/mm². Zahlentafel 15 zeigt die bei Cr-Ni-Mo-V-Stahl durch Luft- und Ölvergütung erzielbaren Festigkeitswerte.

Gleich hohe oder sogar noch etwas günstigere Werte lassen sich mit Cr-Ni-W-Stahl erzielen, wie aus Zahlentafel 16 hervorgeht. Abb. 18 zeigt die Feinmeßkurven dieses Stahls in verschiedenen Vergütungsstufen, Abb. 19 den Verlauf der wahren Spannung über der Einschnürdehnung. Die erzielbaren Festigkeitswerte sind bei Ölhärtung noch etwas höher als bei Lufthärtung. Mit einem Stahl von fast gleicher Zusammensetzung, wie in Zahlentafel 16 angegeben, wurden bei Ölhärtung von 850 bis 880° C (ohne Anlassen) folgende Werte erzielt: $\sigma_{0,2} = 130$ kg/mm², $\sigma_B = 244$ kg/mm², $\delta_5 = 5$ vH.

III. Anwendung und Eigenschaften der verschiedenen Halbzeuge; Bauweisen

1. Stangen und ihre Anwendung für Dreh- und Frästelle

Die Anforderungen des Flugzeugzellenbaues in bezug auf Stangen aus hochfesten Stählen werden praktisch durch Verwendung von nur 2 Werkstoffen vollkommen erfüllt:

- 1453 als schweißbarer Stahl,
 - vergütbar auf $\sigma_B = 90$ kg/mm², bis 60 Durchmesser,
 - " " " " 110 " " 30 " "
- 1460, nicht schweißbar,
 - vergütbar auf $\sigma_B = 90$ kg/mm², bis 200 Durchmesser,
 - " " " " 115 " " 150 " "
 - " " " " 130 " " 80 " "

Wenn im Flugzeugzellenbau weitere Werkstoffe, nämlich 1454 und 1456, in erheblichem Umfang angewendet wurden, so erfolgte dies ausschließlich mit Rücksicht auf

Zahlentafel 12. Übersicht über die Anforderungen an die Fliegwerkstoffe 1460, 1456 und 1620 (und zusätzliche Werksvereinbarungen = Klammerwerte)

Größter Stangendurchmesser mm	40	60	80	100	150	200
Fliegwerkstoff 1460 mit 0,26 bis 0,34 C, 1,8 bis 2,3 Ni, 1,8 bis 2,3 Cr, 0,2 bis 0,4 Mo (0,1 bis 0,25 V), 0,3 bis 0,8 Mn, < 0,5 Si, < 0,06 P + S						
Zustandszahl	—	—	6 ¹⁾	—	5	3
Streckgrenze σ_S kg/mm ²	—	—	115	—	95	75
Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²	—	—	130	—	115	90
Bruchdehnung δ_{10} %	—	—	5	—	7	10
Bruchdehnung δ_5 %	—	—	8	—	9	14
Einschnürung ψ %	—	—	40	—	45	60 [50]
Kerbsähigkeit längs α_{Kl} mkg/cm ³	—	—	(5)	—	6	(10)
Kerbsähigkeit quer α_{Kq} mkg/cm ³	—	—	(3)	—	4	(6)
Brinellhärte H kg/mm ²	—	—	388	—	341	269

Fliegwerkstoff 1456 mit 0,24 bis 0,34 C, 2,3 bis 2,7 Cr, 0,2 bis 0,35 Mo (0,2 bis 0,35 V), 0,4 bis 0,8 Mn, < 0,4 Si, < 0,06 P + S						
Zustandszahl	6 ²⁾	—	fehlt ³⁾	5	4	—
Streckgrenze σ_S kg/mm ²	(100)	—	(95)	90	75	—
Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²	(125)	—	(115)	110	90	—
Bruchdehnung δ_{10} %	(7)	—	(7)	7	10	—
Bruchdehnung δ_5 %	—	—	—	10	13	—
Einschnürung ψ %	—	—	—	45	50	—
Kerbsähigkeit längs α_{Kl} mkg/cm ³	(4)	—	(5)	(5)	(6)	—
Kerbsähigkeit quer α_{Kq} mkg/cm ³	(2,8)	—	(2,8)	(3)	(3,5)	—
Brinellhärte H kg/mm ²	—	—	—	331	269	—

Fliegwerkstoff 1620 (noch nicht endgültig) mit 0,24 bis 0,34 C, 2,3 bis 2,7 Cr, 0,4 bis 0,8 Mn, 0,15 bis 0,30 V, < 0,4 Si, < 0,06 P + S						
Zustandszahl	—	5	4	3	—	—
Streckgrenze σ_S kg/mm ²	—	90	80	75	—	—
Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²	—	110	100	90	—	—
Bruchdehnung δ_{10} %	—	—	—	—	—	—
Bruchdehnung δ_5 %	—	10	11	13	—	—
Einschnürung ψ %	—	40	45	50	—	—
Kerbsähigkeit längs α_{Kl} mkg/cm ³	—	3	5	6	—	—
Kerbsähigkeit quer α_{Kq} mkg/cm ³	—	1,5	2,5	3	—	—
Brinellhärte H kg/mm ²	—	331	294	269	—	—

¹⁾ Im Fliegwerkstoffblatt seit August 1938 auf 40 ϕ eingegrenzt.

²⁾ Im Fliegwerkstoffblatt nicht mehr zugelassen (früher für alle ϕ !).

³⁾ Zum Austausch von 1460,5 angewendet.

eine Einsparung von Nickel. Die Notwendigkeit, noch weitere Legierungsbestandteile, insbesondere Molybdän oder u. U. auch Chrom einzusparen, führt zu einer weiteren Unterteilung und Vermehrung der zu verwendenden Werkstoffe. Dies stellt zwar erhöhte Anforderungen in bezug auf Lagerhaltung und Materialkennzeichnung und -kontrolle, bedeutet jedoch keine Qualitätsverringerung der Flugzeuge, wenn für die wenigen Teile, in denen große Querschnitte aus hochvergüteten Werkstoffen schwer zu umgehen sind, das sind aber höchstens 20 vH der bisher verwendeten Menge, die Legierungsbestandteile zur Verfügung stehen. Dabei können insbesondere durch Unterteilung der Stähle in solche für Schweißteile und nicht zu schweißende Teile Legierungsbestandteile eingespart werden, ohne Leistungsfähigkeit und Sicherheit zu beeinträchtigen. In Zahlentafel 17 ist der Anwendungsbereich der verschiedenen Werkstoffe unter diesem Gesichtspunkt dargestellt. Die Stangendurchmesser in dieser Aufstellung beziehen sich auf den Fall, daß aus der fertigvergüteten Stange Teile durch spanabhebende Bearbeitung herausgenommen werden. Dies ist bei kleineren Teilen und nicht zu großer spanabhebender Bearbeitung zweckmäßig. Die Erhöhung der Bearbeitungskosten infolge des härteren Werkstoffes wird

meist ausgeglichen durch den Wegfall der Vergütung der einzelnen Teile und die dann stets erforderliche genaue Kontrolle jedes einzelnen Stückes auf Risse. Da Risse in Walzstangen nicht sehr häufig vorkommen und Kontrolle der Stangen verhältnismäßig einfach ist, weil Ungenzen sich meist über die ganze Länge oder wenigstens einen großen Abschnitt der Stange erstrecken, hat dieses Verfahren den Vorteil der größtmöglichen Sicherheit. Bei größeren Querschnitten, bei denen die Durchverfügbarkeit nicht ausreichend ist oder wenn die spanabhebende Bearbeitung sehr umfangreich oder schwierig ist, wird stets die Vergütung im vorbearbeiteten Zustand vorgenommen. Es werden daher Stangen mit weit größeren Durchmessern verwendet, als in den Zahlentafeln angegeben. Maßgebend für die Durchhärtung sind dann die durch die Gestalt bedingten Abkühlungsverhältnisse. Hierauf wurde in bezug auf die Vergütbarkeit von 1452 an Hand mehrerer Beispiele hingewiesen.

Für die Auswahl der Werkstoffe ist nicht so sehr die erreichbare Kernfestigkeit maßgebend als die Forderung nach einer genügenden Zähigkeit. Wegen der besonderen Wichtigkeit dieser Frage bei der Auswahl wie bei der Abnahmeprüfung bei den eher zur Sprödigkeit neigenden nickel- und molybdänfreien Stählen soll hier-

Zahlentafel 13. Festigkeitswerte von Cr-Ni-Mo-(V)-Stahl, Fliegwerkstoff 1460, ölvergütet¹⁾

Zusammensetzung in	C	vH	0,28	0,33	0,34			
	Si	vH	0,40	0,33	0,27			
	Mn	vH	0,64	0,64	0,45			
	P	vH	0,01	0,013	0,012			
	S	vH	0,01	0,010	0,009			
	Cr	vH	2,46	2,23	1,88			
	Ni	vH	1,53	2,19	2,27			
	Mo	vH	0,23	0,30	0,40			
	V	vH	0,09	0,16				
Festigkeit	$\sigma_{0.2}$	kg/mm ²	93	104	86	105	90 ²⁾	104 ²⁾
	σ_B	kg/mm ²	106	117	99	118	105	118
	δ_5	vH	17	15	20	15	19	17
	ψ	vH	63	60	69	60	69	65
Kerbschlagigkeit bei Temperaturen von °C	$a_K + 20^\circ$	mkg/cm ²	9,3	9,3	16,1	10,5	15,1	12,6
	—50°	mkg/cm ²	—	—	—	—	14,1	10,4
	—80°	mkg/cm ²	—	—	—	—	11,5	8,0
	—183°	mkg/cm ²	1,3	2,0	1,8	2,2	4,8	5,3

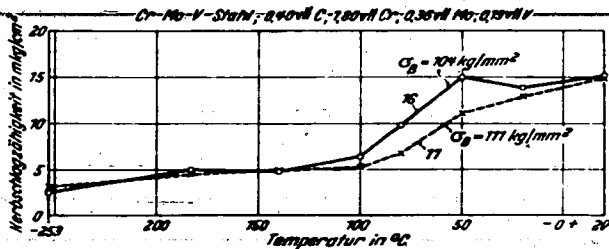
¹⁾ Nach A. Pomp, A. Kriech und G. Haupt, a. a. O.²⁾ Gehärtet von 850°, angelassen bei 590°.¹⁾ Gehärtet von 850°, angelassen bei 620°.

Abb. 17 Änderung der Kerbschlagigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur

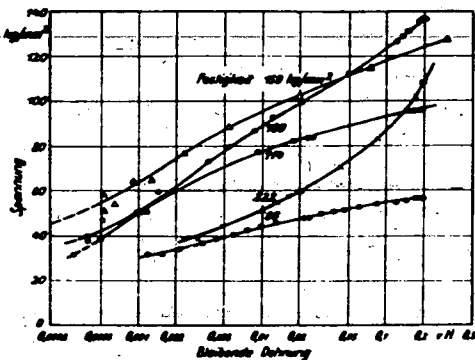


Abb. 18 Feinmeßversuche an verschieden hoch vergütetem Stahl

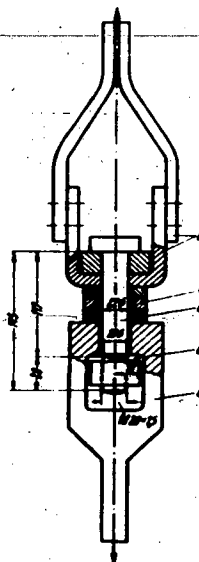


Abb. 20 (rechts) Belastungsvorrichtung zur Prüfung von Bolzen mit schräger Auflage

- a Stahlvorrichtung zum Einspannen in Zerreißmaschine
- b Distanzscheiben
- c Beschlagbolzen
- d schiefe Unterlage
- e Duralvorrichtung

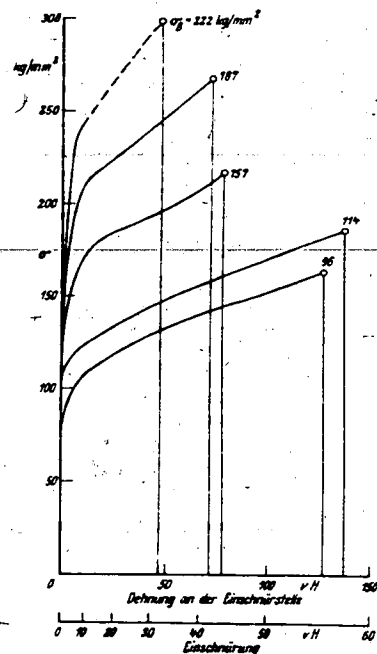


Abb. 19 Verlauf der wahren Spannung über der Einschnürdehnung bei luftvergütetem Cr-Ni-W-Stahl

Zahlentafel 14. Festigkeitseigenschaften von Cr-V-Stahl mit und ohne Molybdän

Fliegerwerkstoff-Bezeichnung	1456		1620									
Zusammensetzung ¹⁾	0,30 C (<0,48 Si, 0,4–0,8 Mn, 2,3–2,7 Cr, 0,2–0,35 Mo, 0,2–0,35 V, <0,035 P, <0,035 S)		0,27 C, 0,32 Si, 0,64 Mn, 2,43 Cr, 0,18 V, 0,009 P, 0,007 S									
Stangendurchmesser mm	50	90	80									
Wärmebehandlungszustand	Anlief. vergütet	Anlief. vergütet	Anlief. vergütet		Ölgehärtet von 870° C, angelassen bei				Wassergehärtet von 870° C, angelassen bei			
					650° C		550° C		650° C		550° C	
Probenentnahme	Kern	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern
Zugversuch ²⁾ E kg/mm ² vH	—	—	206	207	208	209	207	206	208	209	211	207
$\sigma_{0,02}$ kg/mm ²	—	—	114	92	77	74	84	80	74	70	113	87
$\sigma_{0,2}$ kg/mm ²	115	111 (114)	133	112	80	77	104	99	76	75	127	107
σ_B kg/mm ²	130	125 (124)	146	131	89	86	119	116	87	85	136	120
σ_R kg/mm ²	—	—	206	183	168	167	189	183	175	161	197	183
δ_{10} vH	—	—	5	7	13	13	10	10	14	14	7	9
δ_5 vH	14	15 (9)	9	11	20	20	15	14	21	21	12	14
ψ vH	59	56 (29)	45	46	69	70	58	57	72	70	51	53
Härteprüf. H 5/750/20 kg/mm ²	378	372	422	385	274	266	396	360	262	268	401	396
Biegeversuch + 20° C kg/mm ²	—	—	254	> 165		215		> 160		231		
σ_B — 20° C kg/mm ²	—	—	253	> 170		217		> 165		232		
— 60° C kg/mm ²	—	—	264	> 178		228		> 177		241		
Kerbziegeversuch + 20° C kg/mm ²	—	—	230	179		218		175		239		
— 20° C kg/mm ²	—	—	147	179		186		178		231		
σ_{BK} — 60° C kg/mm ²	—	—	148	178		215		177		231		
Kerbschlag + 20° C mkg/cm ²	5,8	6,0	3,8	14,8		5,3		18,1		4,9		
probe ²⁾ 0° C mkg/cm ²	5,7	5,9	—	—		—		—		—		
langes σ_K — 20° C mkg/cm ²	—	—	3,9	7,8		5,3		10,4		4,6		
— 40° C mkg/cm ²	4,8	5,3	—	—		—		—		—		
— 60° C mkg/cm ²	—	—	3,4	2,7/6,4		4,5		9,9		3,9		
Kerbschlag + 20° C mkg/cm ²	1,6	2,4	1,4	3,5		2,5		5,7		2,1		
probe ²⁾ 0° C mkg/cm ²	2,1	2,3	—	—		—		—		—		
quers σ_K — 20° C mkg/cm ²	—	—	1,4	1,6		1,6		1,6		1,3		
— 40° C mkg/cm ²	1,3	2,1	—	—		—		—		—		
— 60° C mkg/cm ²	—	—	1,4	1,1		0,9		1,0		0,8		

¹⁾ Werte in () = Zusammensetzung nach Fliegnorm.²⁾ Werte in () = Quer zur Faser.³⁾ Keine wesentlichen Unterschiede zwischen Kern- und Randzone.

Zahlentafel 15. Festigkeitseigenschaften von Cr-Ni-Mo-V-Stahl mit folgender Zusammensetzung: 0,45 C, 0,14 Si, 0,68 Mn, 4,22 Ni, 1,41 Cr, 0,40 Mo, 0,45 V, 0,013 P, 0,01 S

Probestäbe einzeln vergütet

Zustand	Luftgehärtet von 850° C, angelassen bei ° C						Ölgehärtet von 850—860°, angelassen bei ° C		
	nicht	300	350	450	500	650	nicht	300	500
Zugversuch $\sigma_{0,02}$ kg/mm ²	58	120	114	116	103	84	83	121	116
$\sigma_{0,2}$ kg/mm ²	117	153	140	137	126	106	145	151	136
σ_B kg/mm ²	214	180	176	161	156	123	236	173	155
σ_R kg/mm ²	209	—	—	209	—	191	234	247	240
δ_5 vH	4	5	8	9	9	13	7	5	9
ψ vH	23	35	37	34	42	51	22	42	43
Kerbschlagprobe σ_K + 20° C mkg/cm ²	—	—	—	—	—	—	—	4	—
— 60° C mkg/cm ²	—	—	—	—	—	—	—	5	—

Zahlentafel 16. Einfluß der Vergütung auf die Festigkeitseigenschaften von Cr-Ni-W-Stahl mit 0,39 C, 0,32 Si, 0,43 Mn, 1,23 Cr, 4,23 Ni, 0,96 W, 0,012 P, 0,009 S

Zustand	Geglüht bei $\sim 680^\circ$	Anlieferung	Luftgehärtet bei 850° C		
			bei 420°	bei 240° angelasen	nicht angelasen
Elastizitätsgrenze $\sigma_{0,2}$ kg/mm ²	47,8	82,7	102,1	98,9	59,5
Streckgrenze $\sigma_{0,2}$ kg/mm ²	56,7	98,4	123,9	136,5	108,8
Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²	96,2	114,1	158,9	189	221,5
Reißspannung σ_R kg/mm ²	163	185	217	267	$\sim 298^*)$
Dehnung δ_{10} vH	11,8	12,3	8,2	7,8	7,7
Dehnung δ_5 vH	19,4	19,2	12	12,4	9,8
Einschnürung ψ vH	58	58	44	42	32,5
Elastizitätsmaß E kg/mm ² vH	206,8	202,5	200	198	197
Einschnürarbeit A mkg/cm ²	107	119	108	123	103

*) Berechnet.

Zahlentafel 17. Anwendungsbereich der verschiedenen Werkstoffe

Stangen- Durchmesser mm	Schweißbar		Nicht schweißbar		
	$\sigma_B = 90 \text{ kg/mm}^2$	$\sigma_B = 110 \text{ kg/mm}^2$	$\sigma_B = 90 \text{ kg/mm}^2$	$\sigma_B = 110/115 \text{ kg/mm}^2$	$\sigma_B = 130 \text{ kg/mm}^2$
200	—	—	CrNiMo 1460,3	—	—
150	—	—	CrMoV 1456,4	CrNiMo 1460,5	—
100	—	—	CrV 1630,3	CrNiMo 1460,5	—
80	(CrMo) (1452,5)	—	CrV 1630,3	CrMoV 1456.—	CrNiMo 1460,6
60	CrMo 1452,5	—	MnSi VMS 135	CrV 1630,5	CrNiMo 1460,6
40	CrV*) 1604,5	CrMo 1452,6	MnSi VMS 135	CrV 1630,5	CrNiMo 1460,6

*) U. U. bis 50 $\varnothing$.

auf noch besonders eingegangen worden. Während die Zugfestigkeit von Stahl durch Kerben im allgemeinen nicht verringert wird, wenn nicht extrem ungünstige Verhältnisse vorliegen, ist bei Biegebeanspruchung mit einer erheblichen Festigkeitsminderung zu rechnen, wenn der Werkstoff spröde ist. Bei der Untersuchung der Stähle wurde deshalb dieser Einfluß durch Bestimmung der Kerbziege- und Biegefestigkeit, soweit möglich, mit erfaßt. Eine besondere Gefahr bedeutet die Sprödigkeit bei auf Zug beanspruchten Teilen, wenn unkontrollierbare Biegebeanspruchungen, z. B. durch Unebenheit von Paßflächen oder Montageungenauigkeiten auftreten können. Diese Verhältnisse wurden bei 2 Bolzenverbindungen genauer untersucht. Abb. 20 zeigt die für die erste Versuchsreihe gewählte Anordnung. Hierzu wurden fertig angelieferte Bolzen aus legiertem Stahl mit einer Zugfestigkeit von etwa 130 kg/mm^2 verwendet. Die Bolzen wurden unter Zwischenschalten einer schrägen Unterlegscheibe unter die Mutter zu einem Verbindungselement entsprechend Abb. 20 zusammengebaut und in einer Zerreißmaschine belastet. Nach dem Versuch wurden aus sämtlichen Bolzen Zerreißstäbe und Kerbschlagproben entnommen und geprüft. Danach ließen sich die Bolzen in 3 Gruppen einteilen mit

- einer Kerbzähigkeit von 3 mkg/cm^2 ,
- einer Kerbzähigkeit von 4 mkg/cm^2 ,
- einer Kerbzähigkeit von 10 mkg/cm^2 .

Abb. 21 zeigt das Ergebnis der Versuche, und zwar ist das Verhältnis „Bolzenfestigkeit : Zugfestigkeit des Werkstoffes“ über dem Winkel der Unterlegscheibe aufgetragen. Schon bei kleinem Winkel der Unterlegscheiben fällt die Festigkeit außerordentlich stark ab, besonders bei den Bolzen aus dem Stahl mit geringer Kerbzähigkeit. Die Bruchlast des Bolzens, die bei zentrischer Belastung 40 t beträgt, sinkt bei einer Unter-

legscheibe mit 3° Schräge auf 24 t, bei einer Auflagenfläche mit 7° beträgt sie nur noch 9 t. Bei größerer Kerbzähigkeit werden die Verhältnisse sehr viel günstiger. Wir finden ein Hochlagegebiet der Festigkeit bei kleinen Auflagenwinkeln, dann ein steiles Abfallen der Festigkeit und schließlich bei größeren Winkeln der Unterlegscheiben eine Tieflage der Festigkeit. Bei geringen Auflagenwinkeln wird offenbar die Biegebeanspruchung nahezu vollkommen durch die Verbiegung des Bolzenendes im Gewindeteil ausgeglichen. Bei größeren Auflagenwinkeln ist die Zähigkeit des Werkstoffes nicht mehr ausreichend, um diesen Ausgleich herbeizuführen, und die Festigkeit sinkt infolgedessen mit zunehmendem Auflagenwinkel sehr steil ab.

Auf Grund dieser Feststellungen wurde bei Bolzen für einen besonders lebenswichtigen Anschluß die Abnahmeprüfung mit der in Abb. 22 gezeigten Vorrichtung vorgenommen; dabei beträgt der Auflagenwinkel am Bolzenkopf und unter der Mutter 4° . Die Bolzen waren durch Warmpressen aus folgendem Werkstoff hergestellt: Cr-Mo-V-Stahl mit etwa 0,35 C, 0,8 Mn, 0,25 Si, 1,1 Cr, 0,25 Mo, 0,10 V.

$$\begin{aligned}\sigma_{0,2} &= 108 \text{ kg/mm}^2, \\ \sigma_B &= 120 \text{ bis } 140 \text{ kg/mm}^2, \\ \delta_5 &= 15 \text{ bis } 9 \text{ vH}, \\ \psi &= 54 \text{ bis } 58 \text{ vH}.\end{aligned}$$

Das Bolzenengewinde ist $M 16 \times 1,5$, der Kernquerschnitt $152,1 \text{ mm}^2$. Die aus Festigkeitsgründen erforderliche Bruchlast beträgt 17 t, entsprechend einer Bruchspannung σ_B effektiv = 112 kg/mm^2 im kleinsten Querschnitt. Geprüft wurden 15 Lieferungen mit insgesamt 4000 Bolzen. Von den ersten 14 Lieferungen mit insgesamt 3600 Bolzen wurden 36 Stück geprüft. Dabei wurde eine Bruchlast von 20,8 bis 24,8 t gefunden. Die 15. Lieferung bestand aus 2 Sendungen mit zusammen 400 Bolzen; da-

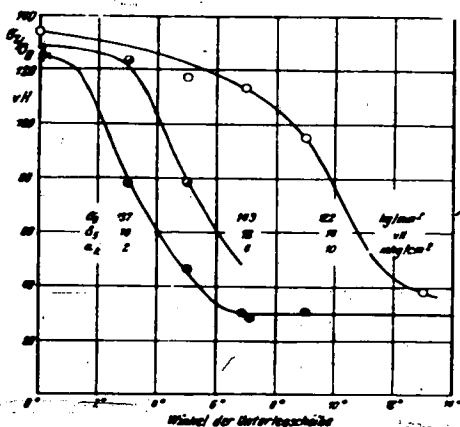


Abb. 21 Einfluß der Kerbzähigkeit auf die Festigkeit von Anschlußbolzen bei schräger Auflage

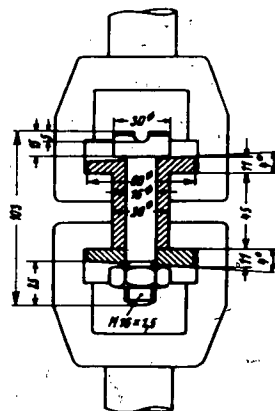


Abb. 22 Prüfvorrichtung zur Abnahmeprüfung von Bolzen

-von wurden 13 Stück geprüft.—Von dieser ergaben 4 eine Bruchlast von 8,0, 12,9, 18,4, 18,5 t, die übrigen 9 Stück 22,4 bis 24,8 t Bruchlast. Aus den gebrochenen Bolzen wurden Kerschlagproben entnommen, die den folgenden Zusammenhang zwischen Tragkraft und Kerbhähigkeit ergaben:

Tragkraft	8,0	12,9	18,5	23,5 t,
σ_K	5,1	5,4	7,7	8,4 mkg/cm ² .

Durch Nachvergüten mit höherem Anlassen ließ sich die Kerbzähigkeit auf 13 bis 14 mkg/cm^2 steigern. Hierbei wurde ein Tragkraft der Bolzen von 19,0 bis 19,5 t erreicht. Das höhere Anlassen ergibt also trotz etwas veringert Zugfestigkeit zweifellos eine größere Sicherheit.

Die angegebene Prüfung durch Zugversuche mit schräger Auflage vermag die Kerbschlagprobe teilweise zu ersetzen und hat den Vorteil, unmittelbar den Einfluß der Zähigkeit auf die Festigkeit des Bauteils anzugeben. Bis zu einer Weiterentwicklung dieser Prüfmethode, die zu einer allgemeinen Anwendung führen könnte, werden in erster Linie Kerbschlagproben zur Zähigkeitsprüfung vorgenommen. Dabei ist, insbesondere bei dicken Stangen, die Probenentnahme wichtig. Bei der Herstellung von Drehteilen aus fertigtvergüteten Stangen handelt es sich meist um Bolzen oder Beschlagteile, bei denen erhebliche Verspannungsarbeit vorkommt und meist gerade die hochwertigere Randzone entfernt wird. Bei Augenbolzen, Gabelbolzen, Kugelpfannen usw., bleibt regelmäßig im Bolzenschaft nur etwa der halbe Durchmesser übrig. Der Zähigkeitsnachweis für das Bauteil erfordert daher, daß der Probestab für die Kerbschlagprobe etwa bei $\frac{1}{4}$ des Durchmessers von außen (nicht, wie bisher, aus dem äußeren Sechstel) entnommen wird. Bei den meisten aus Stangen hergestellten Teilen ist außerdem mit einem Kraftverlauf zu rechnen, bei dem der Werkstoff örtlich quer zur Faser beansprucht wird. Dies betrifft allerdings meist die äußeren Teile der Stangen. Die Zähigkeit für diese Stellen wird durch Entnahme von Querkerbschlagproben nachgewiesen, die im äußeren Sechstel des Durchmessers entnommen werden können:

2. Walzprofile

Außer Rundstangen werden im Flugzeugbau hauptsächlich für Bolzen und Muttern Sechskantstangen verwendet. Die Verwendung von Flachstangen ist seltener. Eigentliche Stahlwurzprofile werden bisher nur in ganz

seltenen-Fällen-angewendet. Es ist aber sicher, daß eine größere Anwendung von Stahlwalzprofilen im Zusammenbau mit anderen Teilen, besonders für Beschläge und dergleichen, zu recht zweckmäßigen Konstruktionen führen kann und deshalb mehr beachtet werden sollte. Wenn auch das Walzprofil beim Stahl nicht die mannigfaltigen Formen zuläßt, die beim Leichtmetallprofil möglich sind, so dürfte auch hier eine Überprüfung der Konstruktion zeigen, daß durch zweckentsprechende Anwendung von Walzprofilen Fertigungsarbeit erspart werden kann und die Sicherheit erhöht wird. Leider ist die Beschaffung von Walzprofilen aus Stahl hoher Festigkeit oft schwierig, zumal im Flugzeugbau (wenigstens soweit es sich nicht um Gurtquerschnitte handelt) nur verhältnismäßig geringe Mengen gebraucht werden.

3. Schmiedestücke

Zur Herstellung von Schmiedestücken sind grundsätzlich alle Stähle geeignet, die als Stangen verwendet werden. Da die mechanische Bearbeitung (und damit die Bearbeitungszeit) naturgemäß viel geringer ist als bei Drehteilen, tritt die Frage der Durchhärtung im allgemeinen mehr zurück und höher legierte Werkstoffe sind nur in Ausnahmefällen, nämlich besonders für Hauptanschlußteile großer Flugzeuge erforderlich. Man kommt daher praktisch mit wenigen Stählen aus. Beispielsweise waren von den bei den Ernst-Heinkel-Flugzeugwerken im Jahr 1939 verwendeten Stahl schmiedestücken 78 vH aus 1452, 20 vH aus 1456 und 1460 und nur 2 vH aus unlegierten Stählen geringer Festigkeit (in diesen Zahlen sind die Normteile nicht enthalten). Bei den Schmiedestücken aus 1456 und 1460 handelt es sich um große und schwere Bauteile mit Wanddicken bis zu 40 mm (an den dicksten Stellen bis zu 150 mm und mehr) und Stückgewichten bis zu 80 kg, bei denen eine Festigkeit von 125 kg/mm² gefordert und erreicht wurde, vgl. Abb. 23.

Zur Einsparung von Molybdän kann bei dünnwandigen Schmiedeteilen, die mit anderen Halbzeugen verschweißt und anschließend vergütet werden, auf Chrom-Vanadin-Stahl übergegangen werden. Bei der Mehrzahl der Schmiedestücke wird Schweißbarkeit jedoch nicht gefordert, und es können daher auch die bereits besprochenen Chrom-Mangan- und Chrom-Vanadin-Stähle (u. U. auch Mangan-Silizium- und Mangan-Vanadin-Stähle) angewendet werden; vgl. hierzu Zahlentafel 9, die die Eigenschaften des gleichen Schmiedestückes bei Verwendung verschiedener Werkstoffe zeigt.



Abb. 23 Schmiedestücke aus Cr-Mo-Stahl mit 115 kg/mm² Festigkeit

4. Rohre und Bleche und ihre Anwendung für geschweißte Bechläge, Streben usw.

Der wichtigste und am meisten verwendete Werkstoff für Rohre ist der Chrom-Molybdän-Stahl 1452. Als Festigkeit im vergüteten Zustand kommt 90 kg/mm² oder bei nicht zu hohen Wanddicken 110 kg/mm² und mehr in Frage. Über die Verwendung eines schweißbaren Chrom-Vanadium-Stahls an Stelle des Chrom-Molybdän-Stahlgusses siehe Abschnitt II, Punkt 2. Der Ersatz in der Festigkeitsstufe 90 kg/mm² macht bei der üblichen geringen Wanddicke von Rohren keine Schwierigkeiten. Für die meisten Konstruktionsteile ist die durch die Vergütung erzielte Knic- bzw. Beulfestigkeit maßgebend. Einen Überblick über die Beulfestigkeit bei verschiedenen Wanddickenverhältnissen im Vergleich zu Leichtmetall gibt Abb. 24. Bei einer Festigkeit von $\sigma_B = 109 \text{ kg/mm}^2$ wird erst die Gütezahl wie bei Duralumin 3125 mit $\sigma_B = 47 \text{ kg/mm}^2$ erreicht. Dabei ist noch zu berücksichtigen, daß in der Abbildung das Verhältnis „Beulfestigkeit : spezifisches Gewicht“ über dem Wanddickenverhältnis aufgetragen ist und daß bei Stahl im allgemeinen ein geringeres Wanddickenverhältnis angewendet werden muß als bei Leichtmetall.

Stahlrohre werden mit ganz seltenen Ausnahmen mit geschweißten Anschlüssen versehen. Die Schweißbarkeit und Schweißfestigkeit ist daher besonders wichtig. Sie soll deshalb an dieser Stelle eingehender besprochen werden. Die Angaben über die Schweißung beziehen sich selbstverständlich nicht nur auf Rohre, sondern auch allgemein auf andere Halbzeuge. Auf den Zusammenhang der Schweißbarkeit mit dem Reinheitsgrad des Stahls und die Prüfung der Schweißrisigkeit mit der Focke-Wulf-Einspann-Schweißprobe braucht hier nicht eingegangen zu werden, da die Fragen die gleichen sind wie bei den nicht hoch vergüteten Stählen, die bereits an anderen Stellen behandelt wurden. Es braucht daher nur auf die Vergütbarkeit der Schweißung auf hohe Festigkeit näher eingegangen zu werden. Diese erfordert einen geeigneten Schweißdraht und geeignete Schweißverfahren. Bei der meist verwendeten Autogen schweißung ist es erforderlich, daß der Schweißdraht die gleiche Zusammensetzung besitzt wie der zu verschweißende Werkstoff, d. h. als Schweißdraht ist ebenfalls 1452 zu verwenden. Der niedriger legierte Draht 1453 ist nicht ausreichend, um mit Sicherheit hohe Festigkeit beim Nachvergüten zu erzielen. Für schwierigere Teile wird in zunehmendem Maße an Stelle der Autogenschweißung die Arcatomachweißung angewandt. Sie hat sich insbesondere zur Schweißung von Bechlägen und ähnlichen Bauteilen mittlerer und größerer Wanddicke in großem Umfang eingeführt. Der Vorteil dieses Verfahrens ist die gleichmäßigere und saubere Naht, die Verkleinerung der Überhitzungszone im Grundwerkstoff, höhere Zähigkeit und eine wesentliche Verringerung der Schweißrißgefahr. Es hat sich aber

gezeigt, daß die Arcatomachweißnähte wesentlich geringere Vergütungsfestigkeit ergeben. Das ist dadurch bedingt, daß durch den atomaren Wasserstoff im Lichtbogen eine starke Entkohlung des Schweißgutes eintritt. Dabei kann die Festigkeit in der Schweißnaht bis auf etwa 60 kg/mm² zurückgehen, wenn das Bauteil selbst auf 90 kg/mm² vergütet wird. Um die Entkohlung und damit den Festigkeitsrückgang möglichst zu verringern, muß die Schweißzeit so kurz wie möglich gehalten werden. Das Mittel ist jedoch nicht ausreichend, um die Festigkeit von 90 kg/mm² bzw. 110 kg/mm² in der Naht mit Sicherheit zu erreichen. Hierzu stehen 2 bei den Ernst-Heinkel-Flugzeugwerken entwickelte Verfahren zur Verfügung: 1. die Verwendung eines Schweißdrahtes mit erhöhtem Chromgehalt, der weniger zur Entkohlung und Festigkeitsminderung neigt, und 2. die Verwendung eines Azetylenzusatzes^{*)} zu Wasserstoff. Mit diesen beiden Verfahren gelingt es ohne weiteres in der Schweißung die gleiche Festigkeit wie im Bauteil zu erreichen. Als weiteres Schweißverfahren, bei dem mit Sicherheit hohe Festigkeitswerte einwandfrei erreicht werden, ist die elektrische Pressschweißung zu nennen. Das Verfahren kann jedoch nur bei dickwandigen Stücken angewendet werden.

Die nachträgliche Vergütung zusammengeschweißter Bauteile setzt besondere Vergütungsöffnungen voraus, die ein möglichst verzugsfreies Vergüten gewährleisten. Für die meist zu vergütenden langgestreckten Teile haben sich senkrecht stehende elektrisch beheizte Öfen bewährt, in die das Bauteil senkrecht hängend von unten eingebracht wird und nach dem Glühen unmittelbar in ein darunter befindliches Ölbad herabgelassen wird. Die Verwendung derartiger Öfen hat den Vorteil, daß 1. beim Glühen selbst Durchbiegungen der Bauteile vermieden werden und 2. das Abschrecken der glühenden Bauteile auf dem schnellsten Wege und im allgemeinen symmetrisch erfolgt.

Die Abb. 25 und 26 zeigen große geschweißte Bauteile aus 1452, die auf $\sigma_B \geq 110 \text{ kg/mm}^2$ vergütet wurden.

In vielen Fällen ist es erwünscht, bei großen Bauteilen sogar erforderlich, eine Vergütung des ganzen Bauteils nach dem Schweißen zu vermeiden. Es ist dann u. U. erforderlich, das Bauteil in Einzelteile aufzulösen, die sich infolge ihrer Gestalt noch gut vergüten lassen, und diese durch Nieten oder Schrauben zu verbinden. Ein anderer Weg ist bei den Focke-Wulf-Flugzeugwerken entwickelt worden. Hier werden an die Rohre dickere Anschlußmuffen angeschweißt, dann die Rohre mit diesen Muffen vergütet und anschließend werden die Muffen miteinander verschweißt. Durch den größeren Querschnitt der Muffen wird die Festigkeitsabminderung durch die Ausglühwirkung beim Schweißen ausgeglichen.

*) DRP a.

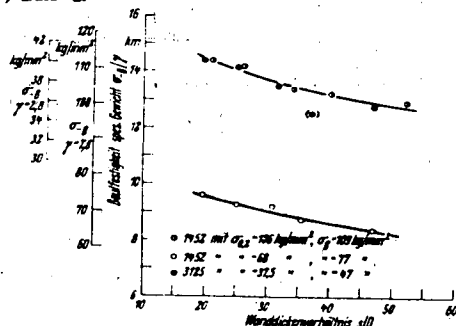


Abb. 24 Beulfestigkeit von Cr-Mo-Stahlrohren im Vergleich zu Leichtmetall. Rohrdurchmesser $D = 40$, Länge $l = 130 \text{ mm}$, $l \approx 10$



Abb. 25 Geschweißter Motorträger aus Cr-Mo-Stahl 1452, vergütet auf $\sigma_B = 110 \text{ kg/mm}^2$

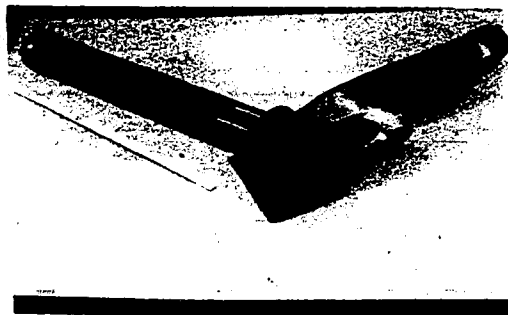


Abb. 26 Geschweißte Spornradgabel aus Cr-Mo-Stahl 1452, vergütet auf $\sigma_B = 110 \text{ kg/mm}^2$

Die für den Flugzeugbau zweckmäßigste Lösung wäre gefunden, wenn es gelingen würde, einen Stahl zu entwickeln, der beim Schweißen keine Festigkeitsabminderung zeigt. Auf diesem Gebiet liegen recht erfolgversprechende Versuche vor. So wurde bereits 1933 bei der Friedrich-Krupp-A.-G. ein Mangan-Molybdän-Stahl mit folgender Zusammensetzung entwickelt: $0,10\text{-}vH\text{-}C$, $4,5\text{-}vH\text{-}Mn$, $0,26\text{-}vH\text{-}Si$, $0,44\text{-}vH\text{-}Mo$, $0,002\text{-}vH\text{-}S$ und $0,02\text{-}vH\text{-}P$. Derselbe weist nach Versuchen bei EHF folgende Festigkeitswerte auf: $\sigma_{0,2} = 94$ bis 100 kg/mm^2 , $\sigma_B = 103$ bis 114 kg/mm^2 , $\delta_{10} = 6$ bis $9\text{-}vH$ und geschweißt: $\sigma_B = 90$ bis 104 kg/mm^2 . Schwierigkeiten bei diesem Werkstoff bestanden nur insofern, als die Biegefähigkeit für die herzustellenden Teile nicht ausreichend war, und vor allem, weil der Werkstoff in der Schweiße nicht gleichmäßig floß bzw. ein geeigneter Schweißdraht, der diesen Nachteil beseitigt hätte, aber selbst genügend hohe Festigkeit ergab, nicht zur Verfügung stand. — Der Werkstoff ist inzwischen auf geänderter Legierungsbasis (Mo-frei) weiterentwickelt worden.

Stahlrohre mit noch höherer Festigkeit ($\sigma_B > 115 \text{ kg/mm}^2$) bei größeren Querschnitten sind im Flugzeugbau ebenfalls schon seit langem in geringem Umfang verwendet worden. Als Werkstoff wurde früher ausschließlich Cr-Ni-Stahl verwendet. Beispielsweise bestanden die Rohrholme eines Doppeldeckers der EHF aus Vierkantrohren 90×45 von $1,25 \text{ mm}$ Wanddicke, der Werkstoff war ein Cr-Ni-Stahl mit $0,35\text{-}C$, $1,3\text{-}Cr$, $4,3\text{-}Ni$ mit folgenden Mindestwerten: $\sigma_{0,2} = 90 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_B = 115 \text{ kg/mm}^2$, $\delta_{10} = 5\text{-}vH$. Der gleiche Werkstoff wurde für andere Teile auch als Rundrohr verwendet. Abb. 27 zeigt die Knickfestigkeitskurve. Der Werkstoff wurde später auf Cr-Mo-Stahl umgestellt, da sich die angegebenen Festigkeitswerte bei der geringen Wanddicke einhalten lassen. Zur Vergütung mußte allerdings ein besonderer Ofen⁷⁾ entwickelt werden, um trotz hoher Abschreckgeschwindigkeit Verzugfreiheit zu erhalten.

Für Fahrwerksachsen und ähnliche Teile hoher Festigkeit, bei denen Schweißbarkeit nicht erforderlich ist, werden Rohre aus Flw.1460 mit folgenden Mindestfestigkeitswerten verwendet: $\sigma_{0,2} = 115 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_B = 130 \text{ kg/mm}^2$, $\delta_{10} = 6\text{-}vH$, $\delta_5 = 9\text{-}vH$, $\psi = 40\text{-}vH$.

5. Stahlguß

Stahlguß hoher Festigkeit wurde früher in verhältnismäßig geringem Umfang angewendet. Als Werkstoff diente Cr-Ni-Stahl. Die Einführung von Cr-Mo-Stahl erfolgte 1934 bei der Umstellung von Knotenpunkten aus Nickel-Bronze bei den EHF. Für diese Teile wurde von der Friedrich-Krupp-A.-G. der Cr-Mo-Stahlguß „FK 34“

vorgeschlagen, der sich in der Folgezeit sehr gut bewährte. Die Zusammensetzung dieses Stahls ist deshalb bis heute unverändert beibehalten und in den Fliegwerkstoffblättern unter der Bezeichnung 1811¹⁾ aufgenommen. Die Zusammensetzung des Stahls ist: $0,23$ bis $0,3\text{-}C$, $0,8$ bis $1,1\text{-}Cr$, $0,2$ bis $0,3\text{-}Mo$, $0,5$ bis $0,75\text{-}Mn$, $0,35$ bis $0,5\text{-}Si$, $<0,35\text{-}P$, $<0,025\text{-}S$. — Auf die form- und gießtechnische Frage braucht an dieser Stelle nicht eingegangen zu werden, da hierfür ein getrennter Bericht vorgesehen ist. In diesem Zusammenhang interessiert ausschließlich Vergütbarkeit und Festigkeit. Die für den hartvergüteten Zustand in den Fliegwerkstoffblättern vorgesehenen Mindestwerte für 1811,6 betragen: $\sigma_{0,2} = 70 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_B = 90 \text{ kg/mm}^2$, $\delta_5 = 8\text{-}vH$, $\psi = 30$. Diese Werte lassen sich erfahrungsgemäß auch bei dickwandigen Konstruktionsteilen gut einhalten; dabei ist die Zähigkeit durchaus befriedigend. Der Stahlguß ist gut schweißbar und läßt sich daher auch mit anderen Halbzeugen zusammenschweißen und vergüten. Die Vergütung zusammenschweißter Teile ist dadurch möglich, daß der Stahlguß fast die gleiche Zusammensetzung hat als der Fliegwerkstoff 1452, so daß eine einheitliche Wärmebehandlung gegeben ist.

Zur Ersparnis von Molybdän kann statt des Chrom-Molybdän-Stahls ein Chrom-Vanadin-Stahlguß mit $0,2\text{-}vH\text{-}V$ bei im übrigen gleicher Zusammensetzung verwendet werden, der die gleichen Festigkeitswerte ergibt. Auch dieser Werkstoff kann mit Schmiede- oder Walzzeugnissen von ähnlicher Zusammensetzung verschweißt und mit diesen vergütet werden. Die Neigung der vanadiumhaltigen Stähle zur Sprödigkeit tritt aber bei dem Stahlguß noch mehr als bei Schmiedeteilen in Erscheinung. Die Verwendung des Stahles setzt daher besondere Sorgfalt in der Erschmelzung und Vergütung voraus. Selbstverständlich ist außerdem die Durchvergütbarkeit geringer als beim Cr-Mo-Stahl, so daß er diesen nur bei einfacheren Gußteilen mit nicht zu großem Querschnitt voll zu ersetzen vermag.

Es wurde versucht, den Cr-Mo-Stahl noch in höheren Vergütungsstufen mit einer Mindestfestigkeit von 110 kg/mm^2 anzuwenden. Dabei ergaben sich Schwierigkeiten, besonders bei schlecht zu gießenden Teilen. Es wurden deshalb Versuche mit höher legierten Werkstoffen durchgeführt, und zwar mit einem Stahlguß mit $2,6\text{-}Cr$, $0,7\text{-}Mn$ und mit einem Stahlguß mit $1,6\text{-}Cr$, $1,2\text{-}Mn$. Eine Zusammenstellung der mit diesen beiden Werkstoffen und zum Vergleich mit 1811 durchgeführten Zug-, Biege- und Kerbschlagproben ist in Zahlentafel 18 gegeben. Man erkennt daraus, daß mit dem Stahl mit $2,6\text{-}vH\text{-}Cr$ zwar recht günstige Festigkeitswerte erzielt wurden, daß aber der Werkstoff nur geringe Kerbzähigkeit besitzt. Kerbschlagversuche bei verschiedenen Temperaturen bestätigten diese Unterschiede, s. Abb. 28. Auch

⁷⁾ K. Matthaes und E. Falke: Vergüten dünnwandiger Profilrohre. Maschinenbau, Der Betrieb 14 (1935) S. 619.

Zahlentafel 18. Biege- und Kerbbiegefestigkeit von Cr-Mo-Stahlguß mit 0,28 C bis 0,34 C, 0,35 bis 0,50 Si, 0,18 bis 0,30 Mo

Cr vH	Mn vH	$\sigma_{0,2}$ kg/mm ²	σ_B kg/mm ²	δ_5 vH	ψ vH	α_K mkg/cm ²	σ_B kg/mm ²	σ_{BK} kg/mm ²	σ_{BK}/σ_B vH
1	0,7	97	101	9	24	8,7	186	186	100
1	0,7	109	114	8	25	5,2	196	208	106
1,6	1,2	102	111	14	40	3,2	211	188	89
2,6	0,7	107	114	10	19	4,4	206	170	83
2,6	0,7	117	129	7	11	1,6	235	110	47

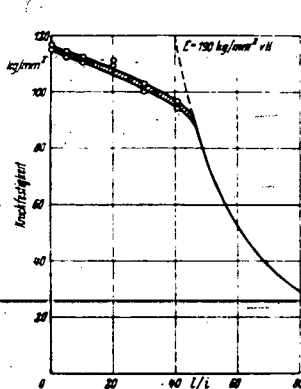
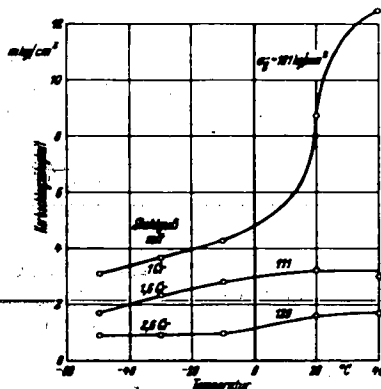
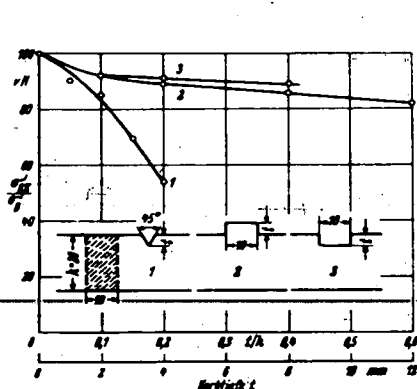
Abb. 27 Knickefestigkeit von Cr-Ni-Stahlrohr mit $\sigma_{0,2} = 109 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_B = 113 \text{ kg/mm}^2$ 

Abb. 28 Kerbzähigkeit von Cr-Mo-Stahlguß bei verschiedener Temperatur

Abb. 29 Einfluß der Kerbform auf die Biegefestigkeit von Cr-Mo-Stahl mit 2,6 vH Cr, vergütet auf $\sigma_B = 120$ bis 130 kg/mm^2

bei den Kerbbiegeversuchen zeigte sich bei dem Werkstoff mit 2,6 Cr ein erheblicher Abfall der Biegefestigkeit, besonders bei der hohen Vergütungsstufe. Die Biegefestigkeit des gekerbten Stabes betrug weniger als die des ungekerbten. Vergleichsversuche mit verschiedenen Kerbformen sind in Abb. 29 dargestellt. Sie zeigen, daß der Einfluß bei geringerer Kerbwirkung sehr viel kleiner ist. Versuche über die Biegefestigkeit bei verschiedenen gegossenen Trägerquerschnitten sind in Zahlentafel 19 angegeben. Mit Rücksicht auf die Sprödigkeit des Stahls mit 2,6 Cr wurde dem Stahl mit 1,6 Cr und 1,2 Mn der Vorzug gegeben. Als Versuchsstück aus diesem Stahl wurden gegossene Rohrabschnitte, die durch mehrere Schweißnähte miteinander verbunden waren, untersucht. Das Ergebnis ist in Zahlentafel 20 dargestellt. Abb. 30 und 31 zeigen eine Reihe Gußstücke aus dem angegebenen Werkstoff.

Abb. 30 Achschenkeln aus Cr-Mo-Mn-Stahlguß, vergütet auf $\sigma_B = 110 \text{ kg/mm}^2$

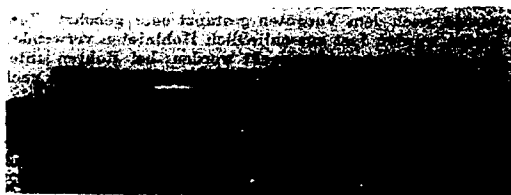
6. Stahlbänder und -bleche höchster Festigkeit*)

a) Die in England entwickelte Bauweise ATS

Weit durchentwickelt wurde eine Stahlbauweise im englischen Flugzeugbau. Sie war zeitweise die in England vorherrschende Bauweise geworden. Als Werkstoff dient Cr-Ni-Stahl (z. B. DTD 16 S mit etwa 0,3 C, 0,8 Cr, 3,5 Ni) oder Cr-Stahl (z. B. DTD 46 mit 0,12 bis 0,16 C, < 0,5 Si, > 12 Cr, < 1 Ni; Prüfspannung $\sigma_{0,2} = 102 \text{ kg/mm}^2$). Stähle mit einer Festigkeit bis zu 120 kg/mm^2 werden im fertigvergüteten Zustand verarbeitet; Stähle mit höherer Festigkeit, 130 bis 160 kg/mm^2 , müssen nach der Verarbeitung vergütet werden. Die Stähle werden in Bändern bis herab zu 0,12 mm Dicke geliefert.

Als Bauform werden durchweg sehr dünnwandige Profile mit starken Krümmungen zur örtlichen Versteifung verwendet. Dabei werden abwechselnd große und kleine Krümmungsradien angewendet, um ebene Flächen

*) Nach DVL-Bericht Kf 200/4. Hochfeste Stähle für den Flugzeugbau. K. Matthaeus. 1. 12. 1933.

Abb. 31 Fahrwerksträger, bestehend aus drei Gußstücken aus Cr-Mo-Mn-Stahlguß (und einem Strebenrohr aus 1452), verbunden durch elektrische Pressschweißung und vergütet auf $\sigma_B = 110 \text{ kg/mm}^2$

Zahlentafel 19. Biegefestigkeit von Cr-Mo-Stahlguß mit 0,34 C, 0,75 Mn, 0,37 Si, 2,56 Cr, 0,18 Mo, 0,014 P, 0,015 S. $\sigma_{0,2} = 103$ bis 124 kg/mm^2 , $\sigma_B = 110$ bis 132 kg/mm^2 , $\delta_{10} = 4$ bis 6 vH

Form	Biegefestigkeit kg/mm^2
	$\sigma'_B = 232$
$a = 3,5-6$	$\sigma'_B = 181$
$a = 2$	$\sigma'_B = 163$
$a = 10$	$\sigma'_B = 134$
$a = 6$	$\sigma'_B = 149$
	$\sigma'_{+B} = 251$ $\sigma'_{-B} = 99$

an den Übergängen möglichst zu vermeiden. Der Krümmungshalbmesser soll bei Profilen $< 30 d$, bei glatten Rohren $< 60 d$, die Breite flacher Flanschen $< 20 d$ sein, wobei d die Wanddicke ist. Wegen der Herstellung werden auch bei den Holmstegen alle Wellungen längslaufend angeordnet; die Abstützung durch die Rippen genügt für die Quersteifigkeit.

Die Profilherstellung erfolgt durch Walzen oder kombiniertes Ziehen und Walzen. Hierzu werden die Streifen bei einfachen Querschnitten durch 3 bis 4, bei schwierigen Querschnitten durch bis zu 8 hintereinander angeordnete Walzenpaare hindurchgezogen. Die Wellungen werden vom Außenrande des Bandes aus stufenweise erzeugt.

Die Bestimmung der Krümmungshalbmesser der Walzen und Ziehisen erfolgt nach folgender Faustformel:

$$\frac{1}{R_e} - \frac{1}{R} = \frac{2}{E \cdot D}$$

Darin ist: d = Blechdicke, E = Elastizitätsmaß, f = Versuchskonstante, R_e = Radius der Walzen oder Ziehisen, R = Radius des fertigen Profils. Die Verbindung der Teile erfolgt durch Nieten oder Falzen. Die Nietlöcher werden nach dem Vergüten gestanzt oder gebohrt. Zum Nieten werden fast ausschließlich Hohlketten verwendet, die mit Handzangen gepreßt werden; bei Rohren unter Verwendung von durchgesteckten Anzugstiften, die nach dem Anziehen abreißen oder abgeschnitten werden.

Rohre aus Cr-Ni-Bandstahl werden in Längen bis zu 15 m in folgender Weise durch Ziehen hergestellt: 1. Ziehen der eingerollten Ränder, 2. Krümmung zum Kreisquerschnitt, 3. Schließen durch Ziehen über einen Dorn. Dies alles erfolgt in einem Arbeitsgang. Darauf erfolgt das Härten.

Zur Vergütung werden die folgenden drei verschiedenen Verfahren angewendet:

Zahlentafel 20. Festigkeitseigenschaften von Rohren 180×10 aus Cr-Mn-Mo-Stahlguß mit Querschweißnähten

Zusammensetzung	0,23 C, 1,19 Mn, $\sim 0,45$ Si 1,52 Cr, 0,28 Mo, 0,006 S
Schweißung Röntgendurchstrahlung Vergütung Härte	elekt. Probeschweißung alle Nähte einwandfrei $850^\circ \text{C}/520^\circ \text{C}$ in Öl 330 bis 350 kg/mm^2
Festigkeit (Probestreifen mit 3 Querschweißnähten)	σ_B 107 bis 144, i. M. 111 kg/mm^2 δ_5 1,5 bis 2,9, i. M. $2,4 \text{ vH}$
Kerzbähigkeit bei 20°C , Kerb in der Schweißnaht α_K Kerzbähigkeit außerhalb der Schweißnaht α_K	3,9 bis 5,1, i. M. $4,7 \text{ mkg/cm}^2$ 3,0 bis 4,2, i. M. $3,6 \text{ mkg/cm}^2$
Biegefestigkeit eines Rohres mit 2 Probeschweißnähten $180 \varnothing$, innen ausgedreht auf 4 mm Wanddicke σ_B	155 kg/mm^2

a) Das Profil wird durch einen Glühofen hindurchgezogen. Vor dem Ofen befindet sich ein Ziehisen, das nur so viel Reibung verursacht, daß im Profil Spannung entsteht. Die Ziehgeschwindigkeit ist kleiner als 1 m/min , da jeder Teil des Profils mindestens 2 Minuten im Ofen bleiben muß. In einem Abstand hinter dem Ofen (Luftkühlung) befindet sich ein wassergekühltes Ziehisen aus Gußeisen. Zum Anlassen geht das Profil dann weiter durch einen zweiten Ofen mit 420 bis 450°C . Ziehen, Härten und Anlassen können in einem Arbeitsgang erfolgen. Es werden Profile mit etwa 140 kg/mm^2 Festigkeit erzielt.

b) Das Profil wird nach dem Ziehen an beiden Enden gefaßt und unter Zugspannung gebracht. Darauf wird ein Strom von etwa 200 bis 300 A bei etwa 30 V Spannung hindurchgeschickt und das Profil dadurch erhitzt. Die Abkühlung erfolgt durch Anblasen mit Preßluft, das Anlassen im Ölbad.

c) Das Glühen erfolgt in Rohren mit Kohlendioxid, um die Zunderbildung zu vermeiden, oder in besonderen Ofen mit Wasserstoffatmosphäre.

Im übrigen wird angestrebt, die nachträgliche Wärmebehandlung möglichst zu vermeiden und die Profile aus den fertigvergüteten Bändern herzustellen.

b) Die Bauweise von Budd und Fleetwings aus rostfreiem Stahl

In USA. wurde von der Fleetwings Inc., Roosevelt Field und der Ed. G. Budd Manuf. Co. eine andere Bauartweise entwickelt. Als Werkstoff finden hartgewalzte Bänder aus rostfreiem austenitischem Stahl Verwendung, die zu Profilen verarbeitet werden. In dieser Bauweise wurde z. B. von Budd ein Flugboot der Savoy-Marchetti-Bauart hergestellt, das sich gut bewährt haben soll.

Die Zusammensetzung des Stahles ist: 0,18 C, 18 Cr und 8 Ni. Der Stahl hat nach dem Abschrecken von 1100°C 27 kg/mm^2 Streckgrenze, 80 kg/mm^2 Zugfestigkeit und 60 vH Dehnung. Durch Kaltwalzen werden 140 kg/mm^2 Festigkeit bei 8 vH Dehnung erreicht. Das Elastizitätsmaß ist etwa 2 000 000, fällt aber bei höherer Beanspruchung sehr rasch. Der Stahl ist austenitisch und rostfrei. Der elektrische Widerstand — wichtig für die Punktschweißung — ist in weichem Zustand 8mal so groß, im hartgewalzten Zustand 14mal so groß als

bei gewöhnlichem Kohlenstoffstahl. Der Stahl wird in Bändern von 0,127 bis 3,2 mm Dicke und bis 300 mm Breite geliefert, und zwar bis 0,4 mm Dicke mit einer Festigkeit von 127 bis 141 kg/mm², über 0,4 mm Dicke mit einer Festigkeit von 127 bis 113 kg/mm².

Als Bauelement dienen Flachstücke, scharfe Winkel, V-Formen und Flanschen; für alle auf Druck beanspruchte Streben sind geschlossene Teile vorzuziehen. Eine Druck- bzw. Knickfestigkeit unter 70 kg/mm² wird als unwirtschaftlich angesehen.

Bei der Formgebung muß das starke Zurückfedern beachtet werden. Die Rückfederung wird vorher an Probestreifen geprüft. Kurze Stücke können abgekantet werden. Für die Herstellung langer Profile hat sich das Ziehen durch Formwalzen (4 Paar genügen) am besten bewährt.

Die Verbindung der Teile erfolgt durch Punktschweißen, u. U. in Verbindung mit Falzen. (Falzen allein ist nicht ausreichend, aber es ist vorteilhaft, wenn auf etwa je 25 mm ein Schweißpunkt kommt.)

Da bei normaler Punktschweißung ein Hof von ausgeschiedenen Karbiden um die Schweißpunkte herum entsteht und hierdurch die Korrosionsbeständigkeit herabgesetzt wird, wird zum Schweißen eine Punktschweißmaschine besonderer Konstruktion angewendet, bei der die Schweißzeiten sehr stark verkürzt sind: Blitz- oder Schußschweißen (Zeiteinstellung bei der Schweißmaschine von Fleetwings 1 bis 20 Perioden). Bei der Schweißmaschine von Budd werden Schweißzangen an langen Kabeln verwendet, mit denen man auch an schwer zugänglichen Stellen heran kann. Die Maschine arbeitet mit automatischer Regulierung. Die Elektroden bestehen aus einer Kupfer-Wolfram-Legierung. Die Arbeitgeschwindigkeit soll im Durchschnitt 10 Schweißungen in der Minute betragen.

Da der Werkstoff durch die Erhitzung beim Schweißen erweicht wird und nicht härtet, sind die Schweißpunkte weich und die Verbindung ist sehr zäh. (Prüfung der Zähigkeit durch Verdrehung eines Schweißpunktes zwischen zwei Blechstreifen. Die Verbindung muß sich um einen Winkel von mindestens 60° verdrehen lassen.)

Für die Festigkeitsberechnung muß bei punktschweißten Zuggliedern der Durchmesser der Schweißpunkte nur zur Hälfte abgezogen werden.

c) Untersuchungen der DVL über die Eigenschaften und die Anwendbarkeit von Stahlbändern hoher Festigkeit

Bei der DVL wurden 1932 Bleche und Bänder aus deutschen, amerikanischen, englischen und schwedischen Stählen untersucht. Die Untersuchungen erstreckten sich auf Cr-Mo, Cr-Ni, Cr-Ni-W-Stähle, ferner rostarme Cr-Stähle mit etwa 13 vH Cr und verschiedenem C-Gehalt und hartgewalzte Bänder aus austenitischem rostfreiem Stahl.

a) Festigkeitseigenschaften der untersuchten Stähle

Die Festigkeitswerte der Vergütungsstähle wurden in verschiedenen Wärmebehandlungszuständen untersucht. Mit Rücksicht auf die vorgesehene Verarbeitungsart kam für die Vergütung nur Lufthärtung mit anschließendem Anlassen in Frage. Die Cr-Mo-Stähle erwiesen sich als nicht geeignet und müssen daher außer Betracht bleiben. Die Abb. 32 zeigt die Festigkeit des (englischen) Cr-Ni-Stahles DTD 16 S nach verschiedenen hohem Anlassen, Abb. 33 die Eigenschaften des Cr-Ni-W-Stahls EFD 70. In Abb. 34 und 35 sind die Eigenschaften der rostarmen Stähle DTD 46, V 5 M und V 3 M dargestellt. Bei den Stählen EFD 70 und V 3 M, die die höchsten Festigkeitswerte erreichen, ist außerdem die Festigkeit von mit exzentrischen Lochreiben versehenen Proben (s. Abb. 36) mit angegeben, die zum Nachweis der Zähigkeit geprüft wurden. — Auf Grund der Vergütungsversuche wurde

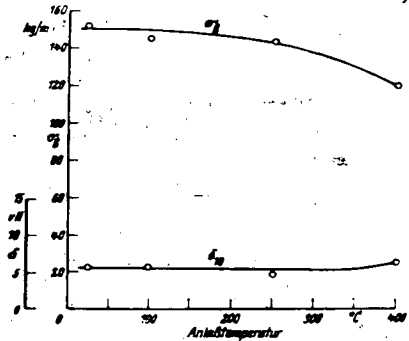


Abb. 32 Einfluß der Anlaßtemperatur auf die Festigkeit von Cr-Ni-Stahl DTD 16 S, luftgehärtet von 860° C

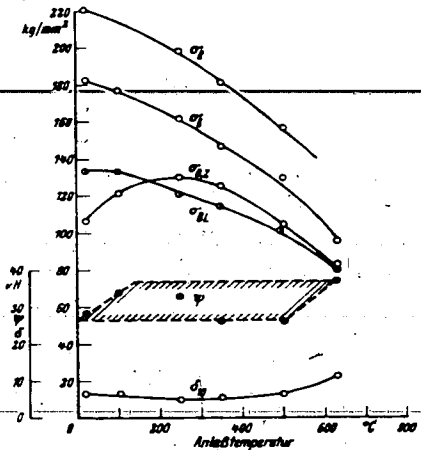


Abb. 33 Einfluß der Anlaßtemperatur auf die Festigkeitseigenschaften von Cr-Ni-W-Stahl, luftgehärtet von 840° C

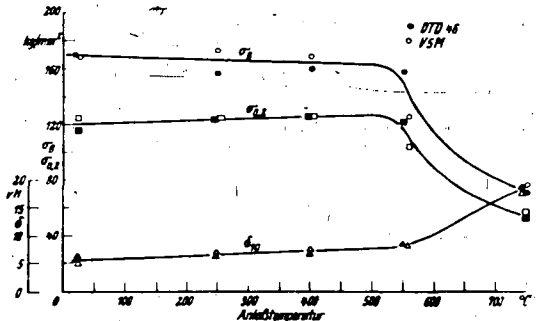


Abb. 34 Einfluß der Anlaßtemperatur auf die Festigkeitseigenschaften der rostarmen Cr-Stähle DTD 46 (geschlossene Punkte) und V 5 M (offene Punkte)

Zahlentafel 21. Eigenschaften von hochfesten Stahlbändern und Bleichen

Werkstoffe	Cr-Ni-Stähle				Cr-Ni-W-Stahl				Rostarme Cr-Stähle				Ausfällische rostfreie Cr-Ni-Stähle									
	Sandritzen 6 N 3 0 3		Haben- DTD		Krupp EP 40		Krupp EFD 70		Haben- DTD		Krupp V 5 M		Bleich		Krupp V 3 M		Sand- ritzen 18/8		Budd 18/8		Krupp V 2 A	
Halbszen mm	Bd	Bd	Bd	Bd	Bd	Bd	Bd	Bd	Bd	Bd	Bd	Bd	Bd	Bd	Bd	Bd	Bd	Bd	Bd	Bd	Bd	Bd
	1,0	0,6	0,4	0,3	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	0,9	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,6	0,4	0,37	0,13
Zusammensetzung C	0,28				0,28	0,33	0,27	0,26	0,29	0,46	0,23	0,24	0,25	0,21	0,25	0,29	0,09	0,13				0,11
	Si	0,29			0,33	0,26	0,23	0,33	0,26	0,36	0,26	0,27	0,28	0,29	0,29	0,29						
	Mn	0,61			0,50	0,58	0,58	0,48	0,51	0,43	0,26	0,49	0,31	0,34	0,35		15,7	16,9				17,2
	Cr	0,74			0,97	0,81	0,81	1,05	1,15	1,11	13,7	14,3	13,6	13,9	13,9		9,0	9,4				8,7
	Ni	3,25			4,11	3,43	3,41	4,05	4,64	4,97		0,55					0,30	0,0				0,0
Festigkeit im Längs- schnitt																	TI	TI Mo				TI Mo
	$\sigma_{0,2}$ kg/mm ²																					
	$\sigma_{0,2}$ kg/mm ²	56	56	53	56	66	69	71	121	109	43	102	56		65	65	117	107	120	115	112	99
	δ_{10} vH	26	28	29	32	17	15	9	11	11	23	8	20	21	17		3	11	7	7	10	11
	ν xH	53	54		33	31		24	34		45	40	44	41								37
Verformbarkeit																						
	Tiefung mm	9,8	9,4	9,0	8,3	8,3	7,8	7,3	6,5	6,6	6,3	7,8	10,0	10,6	9,4		6,7		7,3	6,4	6,7	6,1
	Blage-/Rückfedrig. r=4	3,7	4,3	5,8	11,7	4,4	2,3	11,6	9,9	6,0	11,0	10,3	6,1	4,1	5,0		19,8		19,8	23,3	34,7	10,4
	stabilität (RIS bei r=mm)	0,25	0	0	0	0,25	0,5	0,25	2	2	1	0,5	1,5	0	0,25	0		1	0,5	0,35	0,25	0,5
Vergrüßung																						
	Laufgeschwindigkeit von °C ausgelassen bei °C	860	860	860	860	840	860	860	840	840	1020	1020	1020	1020	1020							
Festigkeit in Verwendungs- zustand																						
	$\sigma_{0,2}$ kg/mm ²	43				92	102		91	129	151	118	76	125	122	143		74		73	64	52
	$\sigma_{0,2}$ kg/mm ²	98				130	136		129	136	139	150	103	160	139	169		117		107	130	99
	$\sigma_{0,2}$ kg/mm ²	157	171	168	166	143	177	174	161	181	165	150	120	7	170	173	169	127	120	130	133	142
	δ_{10} vH	7	7	4	5	6	7	6	6	7	4	9	8	29	5	6	5	3	11	7	7	10
	ν vH	33	33		27	26	26	33	26		30	40	11	11	11			177		171	179	180
Druckfestigkeit																						
	σ_{-2} kg/mm ²					128	103		156	159		136	120	148	154	161				101	(93)	94

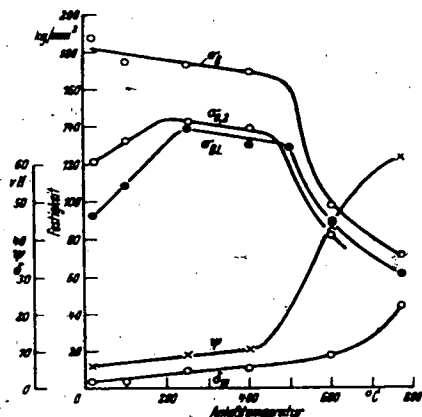


Abb. 35 Einfluß der Anlaßtemperatur auf die Festigkeitseigenschaften bei rostarmen Cr-Stählen V 3 M

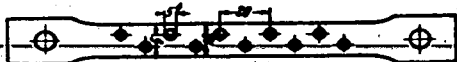


Abb. 36 Lochzugstab zur Zähigkeitsprüfung dünner Stahlbleche

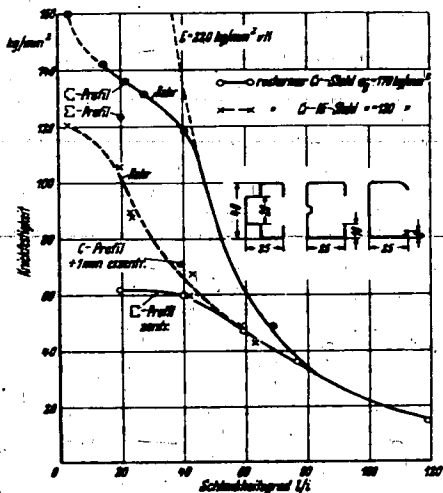


Abb. 38 Knickfestigkeit von Rohren und C-Profilen von 1 mm Wanddicke aus rostarmen Cr-Stählen

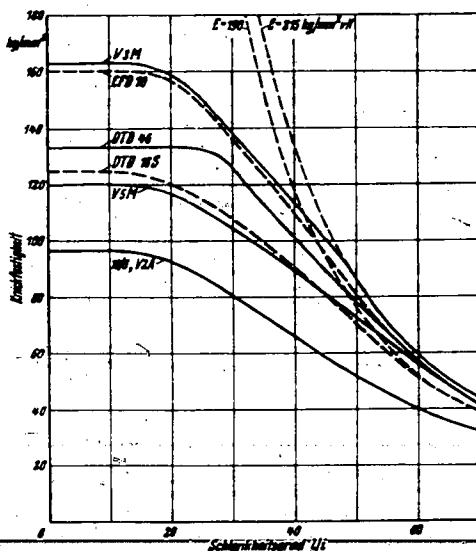


Abb. 37 Rechnerische Knickkurven genieteter (bzw. punktgeschweißter) Rohre

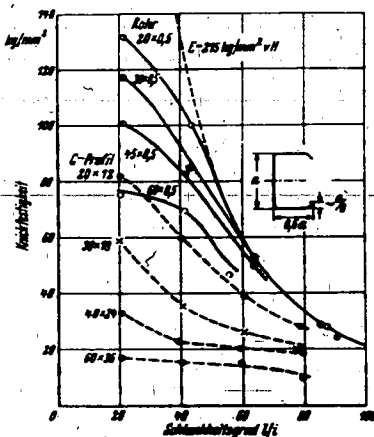


Abb. 39 Knickfestigkeit von Rohren und C-Profilen aus 0,5 mm dickem Bandstahl V 3 M

für die verschiedenen Stähle die Wärmebehandlung ausgewählt und der betr. Vergütungsstand den weiteren Untersuchungen zugrunde gelegt. In Zahlentafel 21 sind Zusammensetzung und Eigenschaften der verschiedenen Werkstoffe angegeben.

Druck- und Knickfestigkeit

Wichtiger als die Zugfestigkeit ist das Verhalten bei Druck- und Knickbeanspruchung. Ein Vergleich der verschiedenen Werkstoffe ist am einfachsten durch Druckversuche und Bestimmung des Knickmoduls mit dem

von Karmanschen Verfahren möglich. Die Versuche wurden mit 100 cm langen Abschnitten aus genieteten Rohren von 50 mm $\varnothing$ und 1 mm Wanddicke durchgeführt, da hauptsächlich dünnwandige Teile in Frage kommen. Die ermittelte rechnerische Knickfestigkeit ist in Abb. 37 angegeben, die Bruch- bzw. Beulfestigkeit der Abschnitte in Zahlentafel 21.

Die bei weitem höchste Festigkeit wird von dem Cr-Ni-W-Stahl EFD 70 und dem rostarmen Cr-Stahl V 3 M, vergütet auf 160 bis 170 kg/mm², erreicht. — Die niedrigsten Werte ergeben die austenitischen Stähle mit

$\sigma_B \approx 120 \text{ kg/mm}^2$; bei diesen macht sich das niedrige E-Maß und die niedrige Elastizitätsgrenze sehr ungünstig bemerkbar. Knickversuche an genieteten und an punktgeschweißten Rohren bestätigten dieses Ergebnis.

Mit genieteten Rohren und C-Profilen aus rostarmem Cr-Stahl V 3 M wurden außerdem Knickversuche bei verschiedenen Wanddickenverhältnissen durchgeführt, deren Ergebnis in Abb. 38 und 39 dargestellt ist.

y) Verarbeitbarkeit

Die Prüfung der Verarbeitbarkeit erfolgte im Lieferzustand (d. h. bei den Vergütungsstählen im allgemeinen im geglühten Zustand) durch Tiefungsproben nach Erichsen und Biegeproben, bei denen der kleinstmögliche Biegehalbmesser bestimmt wurde und bei großen Halbmessern die Rückfederung. Das Ergebnis ist in Zahlentafel 21 angegeben. Die Grenze der Verarbeitbarkeit liegt bei einer Festigkeit von etwa 110 bis 130 kg/mm^2 .

δ) Verbindungsarten

Nietverbindung

Weniger sperrige Teile können vor dem Vergüten vernietet werden. Auf diese Weise ist es möglich, den Werkstoff in verhältnismäßig weichem Zustand zu verarbeiten und außerdem, bei Verwendung eines lufthärtenden Stahls für die Nieten, sehr hohe Nietfestigkeiten zu erzielen. Zweckmäßig wird man hierzu einen Nietwerkstoff von gleicher oder ähnlicher Zusammensetzung wie die zu verbindenden Bleche verwenden. Probestreifen aus 1 mm-Blech, die paarweise durch Nieten von 2 und 3 mm Durchmesser verbunden und nach dem Nieten vergütet wurden, ergaben folgende Werte für die Scherfestigkeit:

für Nieten aus Cr-Ni-Stahl EF 49: $\tau = 111 \text{ kg/mm}^2$,
für Nieten aus Cr-Ni-W-Stahl EFD 70: $\tau = 120 \text{ kg/mm}^2$,
für Nieten aus dem rostarmen Cr-Stahl V 5 M:
 $\tau = 110 \text{ kg/mm}^2$.

Bei den Nieten aus austenitischen Stählen lassen sich Werte von 80 bis über 100 kg/mm^2 erzielen, da dieser Werkstoff außerordentlich verformbar ist und starke Kaltverfestigung ergibt. So ergaben Nieten aus V 2 A-Stahl mit $\sigma_B = 123 \text{ kg/mm}^2$ eine Scherfestigkeit $\tau = 107 \text{ kg/mm}^2$ in dem geschlagenen Niet. Austenitische Stähle kommen daher auch zum Nieten von anderen Werkstoffen, z. B. V 3 M- oder V 5 M-Blechen, in Frage, wenn nachträgliche Vergütung nicht angewendet wird.

Punktschweißung

Bei den kaltgewalzten austenitischen Stählen wird die Kaltverfestigung durch die Erhitzung beim Schweißen aufgehoben und eine Härtung tritt nicht ein. Daher sind die Schweißpunkte weicher und die Verbindung ist außerordentlich zäh. Für die Stähle ist daher die Punktschweißung besonders geeignet.

Untersucht wurden Punktschweißproben, die bei der Fleetwings Inc. und die bei der Ed. G. Budd Manuf. Co. in Amerika hergestellt waren. Außerdem wurden Versuche mit deutschen V 2 A-Stahlbändern durchgeführt.

Aus den Versuchen ergibt sich, daß bei kleinem Punktdurchmesser (Proben von Budd) der Bruch durch Abscheren des Schweißpunktes erfolgt. Ist dagegen der Punktdurchmesser größer als etwa die sechsfache Blechdicke, also die aus „Punktfang $\times$ Blechdicke“ gebildete Zylinderfläche kleiner als zwei Drittel der Querschnittsfläche des Schweißpunktes, so wird der Schweißpunkt als Ganzes aus dem Blech herausgerissen.

Zweckmäßig wird die Schweißmaschine so eingestellt, daß die Bruchlast der Schweißpunkte etwa der Blech-

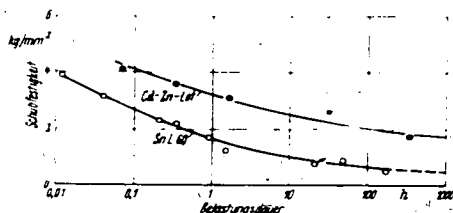


Abb. 40 Schubfestigkeit von Kadmium-Zinnlot (und Zinnlot Sn L 60) bei längerer Belastungsdauer

dicke verhältig ist und etwa 500 bis 600 kg/mm Blechdicke beträgt. Der Durchmesser der Schweißpunkte steigt dann in geringem Maße mit zunehmender Blechdicke.

Lötverbindung

Hartlöten vor dem Vergüten setzt die Verwendung eines Lotes voraus, dessen Schmelzpunkt so hoch liegt, daß beim Vergüten noch kein Erweichen oder Schmelzen des Lotes eintritt. Hierfür kommt z. B. reines Kupfer in Frage, dessen Schmelzpunkt bei 1083° liegt, oder eine Kupferlegierung mit 80 Cu und 20 Zn, die bei einer Löttemperatur von 1010°C verarbeitet werden kann. Die zu verbindenden Teile werden vor dem Löten auf Dunkelrotglut vorgewärmt und mit einer Borax-Borsäurepaste als Flußmittel bestrichen.

Auch Weichlöten kommt trotz der geringen Festigkeit der Lote in Frage, da die Stahlbänder sehr dünn sind und sich mit einer Überlappungsbreite von etwa der 40- bis 50fachen Banddicke die volle Festigkeit des Stahls übertragen ließe. Wegen der geringen Festigkeit der Zinnlote werden Kadmium-Zinnlote angewendet. Die Weichheit der Lote tritt aber bei langdauernder Belastung und bei Beanspruchung bei etwas höherer als Raumtemperatur besonders ungünstig in Erscheinung. Obgleich die im Flugbetrieb vorkommenden Höchstbeanspruchungen verhältnismäßig kurzzeitig auftreten, muß dies berücksichtigt werden.

Festigkeitsversuche der DVL mit Cd-Zn-Lot (mit 20 vH Zn) und im Vergleich dazu mit gewöhnlichem Zinnlot Sn L 60 ergaben die in Abb. 40 angegebenen Werte. Als Proben dienten 10 mm breite Streifen aus dem austenitischen 0,5 mm-Stahlband 1 R 4, weich, die mit einer Überlappungsbreite von etwa 5 mm verlötet wurden. Die Probestreifen werden vor dem Löten leicht abgeschmirgelt (in Querrichtung). Als Lötwasser diente ein Gemisch von Chlor-Zink-Lösung und Salzsäure.

Bei einträgiger Belastungsdauer und einer Temperatur von 30° C beträgt die Festigkeit des Zinnlotes nur 0,8 kg/mm^2 und die des Kadmiumlotes nur 2,5 kg/mm^2 gegenüber 2,4 bzw. 3,8 kg/mm^2 bei 10 Minuten Belastungsdauer. Bei 20° C liegt die Scherfestigkeit erheblich höher. Sie beträgt für 10 Minuten Belastungsdauer bei dem Zinnlot 4,1 kg/mm^2 , bei dem Kadmiumlot 5,5 kg/mm^2 .

Bei der Verbindung von vergüteten Cr-Mo-Stählen wurden wesentlich höhere Festigkeitswerte erreicht. Nach neueren Versuchen von Sambrasus*) wird zweckmäßig ein Cd-Zn-Lot mit 0,5 vH Ag (bei 82,6 Cd, 17,4 Zn) verwendet. Die Lötung kann durch Zwischenlage gewellter Stahlblechstreifen von 0,05 mm Dicke, 1 mm Wellenlänge und 0,35 mm Wellenhöhe wesentlich erleichtert und verbessert werden. Mit diesem Verfahren wurden etwa doppelt so hohe Festigkeitswerte erreicht als mit der hier beschriebenen einfachen Cd-Zn-Lötung.

*) Über die Weichlötlung hochfester Stahlbleche ZWB-Forschungsbericht Nr. 1188.

Schrifttum

- A. Pomp, A. Krisch und G. Haupt: Kerbschlagzähigkeit legierter Stähle bei Temperaturen von $+20^{\circ}$ bis -253° . Mitt. KWI f. Eisenforsch. Abhandlung 381 Bd. XXI, Lief. 15.
- H. Kallen und F. Meyer: Sparstoffarme Mangan-Vergütungsstähle mit Zusätzen von Silizium, Chrom oder Vanadin und ihre Bewährung in der Praxis. Technische Mitteilungen Krupp, Forschungsberichte, 2. Jg. 1939, S. 215.
- H. Kießler: Nickel- und molybdänfreie Baustähle. VDI-Zeitschrift Bd. 84 (1940) Nr. 23, S. 385.
- K. Matthaes und E. Falcke: Vergüten dünnwandiger Profilrohre. Maschinenbau, Der Betrieb 14 (1935), S. 619.
- F. Körber und A. Pomp: Einfluß der Vorbehandlung auf die mechanischen Eigenschaften von Kohlenstoff- und legierten Stählen, insbesondere die Kerbzähigkeit in der Kälte und Wärme. Mitt. KWI f. Eisenforsch. Bd. VII, Lief. 4.
- K. Matthaes: Die Kerbwirkung bei statischer Beanspruchung, Grundlagen für ihre Berücksichtigung bei Berechnung und Bemessung im Leichtbau. Lefo 15 (1938) 1/2, S. 28.

Abgeschlossen am 15. Mai 1940