

## Welding of Metals

Welding is the most important manufacturing process for joining machine elements.

### Joining methods in mechanical engineering:

- Fasteners: screws and nuts
  - not applicable in any cases
  - very costly
  - limits for big parts and very small parts
  
- Riveting
  - nowadays obsolete, very labour intensive
  - costly
  - application is limited
  - difficult for automation
  
- Welding: arc welding or resistance welding
  - wide range for application
  - useful for high strength application
  - extremely flexible for different designs
  - reliable, cost effective
  - suitable even for extremely big parts
  - state of the art joining process in technology

### Different types of welding: acc. to DIN1910

( for details see copies of lecture books)

- Fusion welding (*Schmelzschweißen*)
  - electric arc welding (by electric current)
  - gas (flame) welding ( $C_2H_2$  Acetylen welding)
  - high energy beam welding (laser)
  
- resistance welding (*Widerstandsschweißen*) /
- pressure welding (*Press-Schweißen*)
- friction welding (*Reibschweißen*)

## Welding for a design depends on:

- weldability of materials
- safety condition for the design with respect to welding
- possibility for welding in manufacturing

Practically every material and metal alloy can be weld: in some cases the process, the preparation of the parts and the welding practice may be difficult or costly.

## Welding of steels:

- main and decisive condition: Carbon-content of the steel
- steels with  $C < 0.25\%$  normally weldable without any problems
- steels with  $0.25\% \leq C \leq 0.35\%$ : weldable with preheating of parts to  $\approx 150^\circ\text{C}$
- steels with  $C > 0.4\%$ : difficult for welding, preheating of parts to  $200^\circ\text{C} - 350^\circ\text{C}$  necessary

But not only the carbon content, but the combination with other alloying elements are important:

- Criterion for weldability: C-equivalent:

$$C_{eq} = [C\%] + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Ni}{40} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Si}{24}$$

This is an empirical formula to take other elements into consideration (no physical background):

- if  $C_{eq} \leq 0.4\%$  : good weldability
- if  $0.4 \leq C_{eq} \leq 0.6\%$  : weldable with preheating (conditional weldability)
- if  $C_{eq} > 0.6\%$  : difficult weldability

Mandatory condition for construction steels:

- weldable without any precondition or preparation (preheating)

Evaluation and quality of welds:

- quality of weld line (defect free)
- qualification of welders and workshops
- quality control, inspection, design calculation data material, inspection records

## **Evaluation groups and requirements of welds:**

acc. to DIN-EN-25817/ DIN 8563: (*Schweißnahtbewertungsgruppen*)

**Group A: ( AS or AK)** S = butt weld (*Stumpfnah*t)  
K = fillet weld (*Kehlnah*t)

- highest requirements, the failure of the weld line destroys the total design (*catastrophe*), for highest loadings
- only very experienced, and specially certified welders are allowed to weld A-group welds
- evaluation and certification of welders only by special welding institutes (SLV's in Germany) re-certification every 6-months
- very seldom applied, detailed inspection and quality tests required

Examples: nuclear power station, submarine ship yard

### **Group B: ( BS or BK)**

- for high requirements if the failure of the welding line affects major functions of the design (seldom), high loads
- certified welders only, control of welders by certified welding engineers (*Schweißfachingenieur, SLV*)

Examples: pressure vessels, pressure pipes, vehicles, steam turbine pipes, reinforcements in steel construction

### **Group C: ( CS or CK)**

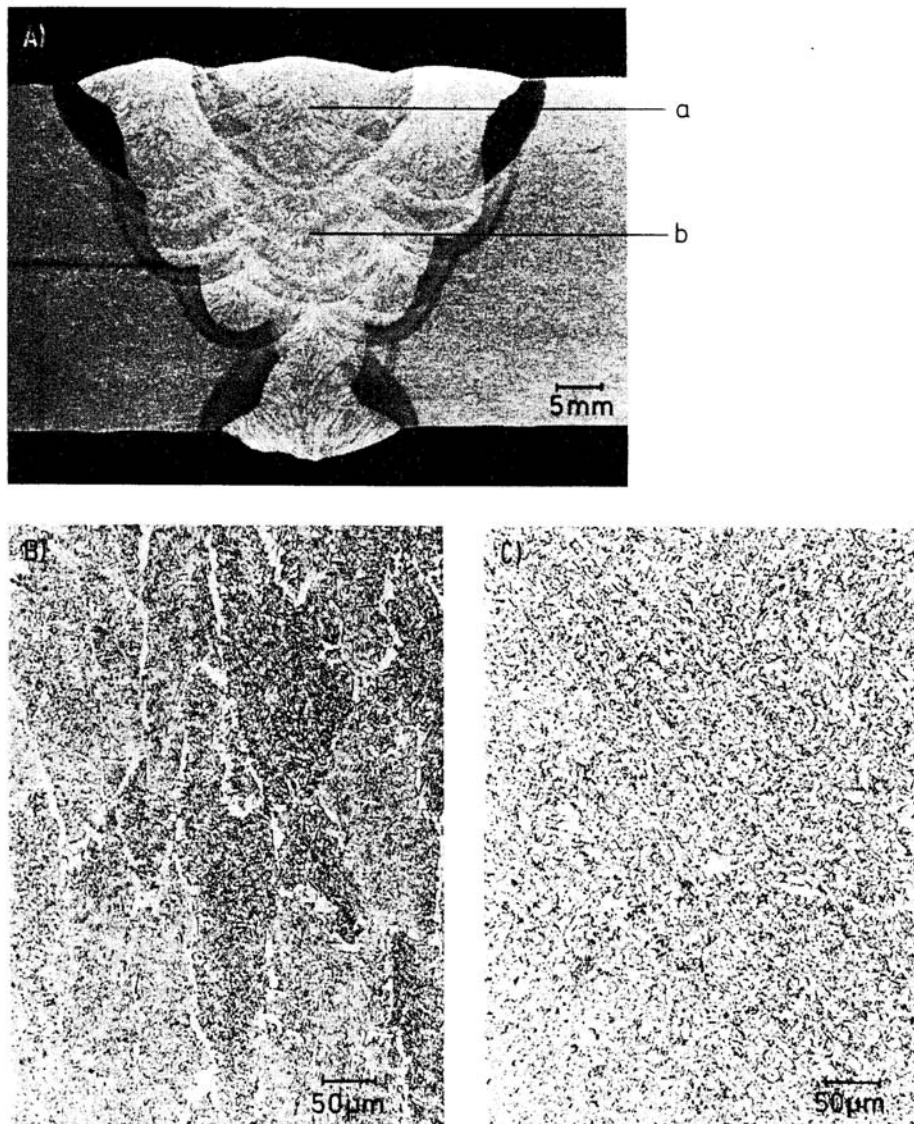
- for medium requirements if a failure of the welding line affects the operation of the parts without stopping operation, medium loadings
- qualified, trained welders supervised by certified welding engineers
- widespread application in manufacturing

### **Group D: ( DS or DK)**

- low requirements, low loading, a failure of the welding line has no major consequences
- no certification for welders only introductory training required by experienced personal (no certified welding engineers)

Examples: home and hobby application

## Microstructure and metallurgy of weldings



Mehrlagenschweißung

A) Gefügegesamtansicht, B) Decklage (a), vergrößert, C) Feinkornbereich (b), vergrößert  
(geätzt mit alkohl  $\text{HNO}_3$ )

**Figure 01:** Multi-layer welding:

A) total microstructure B) final run C) fine-grained area

Microstructure of a multi-layer weld (Fig. 01)

liquid metal area of the weld

heat affected zone around (HAZ)

different microstructure in the weld area: grain size variation

fine and coarse grain size

The mechanical properties around a weld are different to the base material!!!

## Temperature profile and heat influence:

### Temperature profile in the weld line for fusion welding ( see Fig. 02)

Durch örtlich begrenzte Wärmeerbringung und sehr hohe Temperaturgradienten beim Schweißen entsteht ein vom Grundwerkstoff abweichendes Gefüge.

Es sind zu unterscheiden:

1. Bereiche mit Temperaturen oberhalb der Liquiduslinie:  
 Es bilden sich Stengelkristalle mit bevorzugter Wachstumsrichtung senkrecht zu den Schweißnahtkanten. Es entsteht ein Gußgefüge.
2. Bereiche teilweisen Schmelzens:  
 In dieser Zone entstehen netzförmige, niedrig schmelzende Kristallseigerungen. Nichtmetallische Verunreinigungen beginnen in diesem Bereich zu schmelzen, so daß Heißrisse hiervon ausgehen können.
3. Bereiche mit Temperaturen oberhalb  $Ac_3$ :  
 An Stellen hoch über  $Ac_3$  entsteht durch Sammelkristallisation ein grobkörniges Gefüge mit meistens Widmannstättenstruktur. Bereiche nur knapp über  $Ac_3$  werden aufgrund der zweifachen Umkristallisation feinkörnig.
4. Bereiche mit Temperaturen zwischen  $Ac_3$  und  $Ac_1$ :  
 In diesem Temperaturbereich erfolgt eine unvollständige Umwandlung, die je nach Temperaturhöhe unterschiedlich ausgedehnt ist.
5. Bereiche mit Temperaturen unter  $Ac_1$ :  
 Bei sehr langsamen Abkühlen kann es zwischen  $600^\circ\text{C}$  und  $700^\circ\text{C}$  noch zu Phasenumwandlungen kommen. Bei niedrigen Temperaturen ändert sich das Gefüge nicht mehr [17].

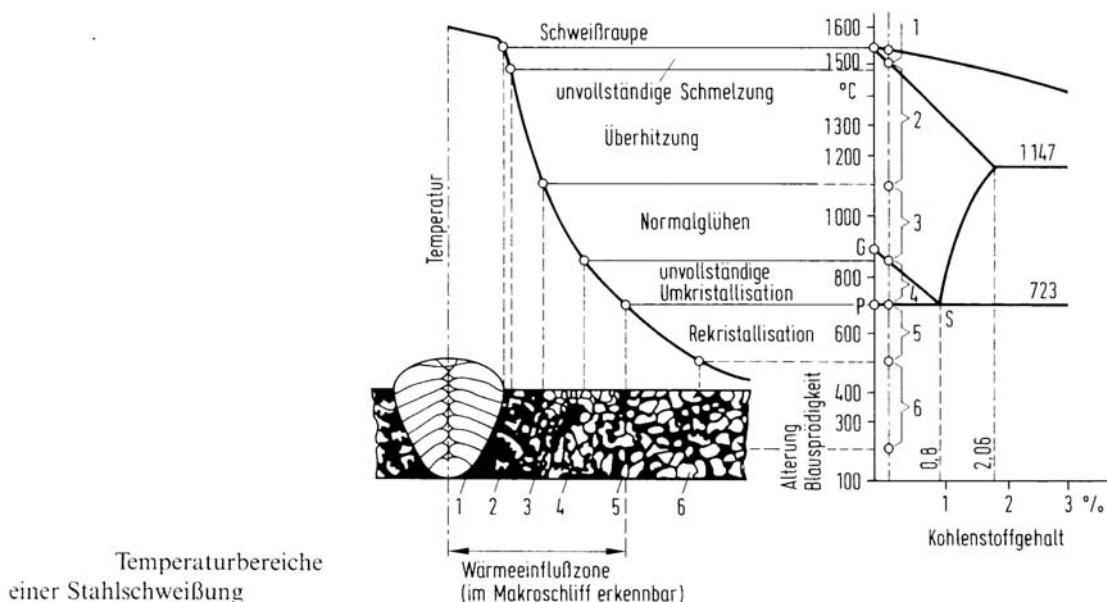
Bereich 1: Bereich mit  $T > T_s$

Bereich 2: Bereich teilweisen Schmelzens

Bereich 3: Bereich  $T > Ac_3$

Bereich 4: Bereich mit  $Ac_1 < T < Ac_3$

Bereich 5: Bereich mit  $T < Ac_1$

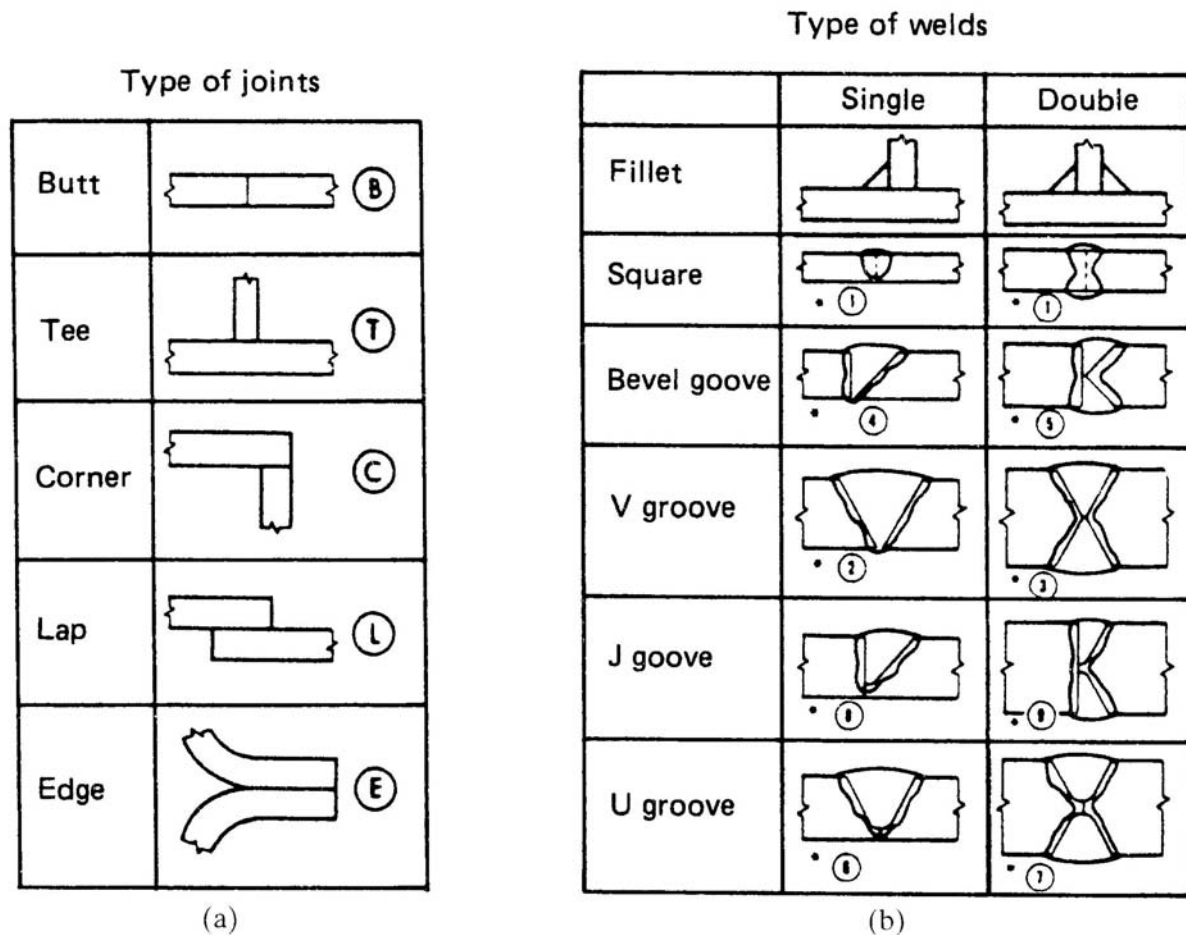


(Figure 02)

**Temperature profile:**

- liquid metal  $\vartheta > 1600^\circ \text{C}$
- partly liquid zone  $1600^\circ \text{C} < \vartheta < 1500^\circ \text{C}$
- range of overheating of metal  $1500^\circ \text{C} < \vartheta < 1100^\circ \text{C}$   
 (coarse grains ; inhomogeneous microstructure)
- range of normalising annealing  $900^\circ \text{C} - 1100^\circ \text{C}$   
 (any microstructure of previous heat treatment is dissolved)
- range of incomplete restructuring
- range of recrystallisation  
 (any strain hardening is removed, new grains generated)
- heat affected zone, blue brittleness range

The weld itself and the surrounding areas are affected by the heat of welding process. Not only the strength of the weld but also the strength of the neighbourhood (HAZ) "heat affected zone" must be considered.



**Figure 03: Types of weld-joints and types of welds**

## Type of joints for welding and type of welds ( see Fig. 03) (Stoßarten)

- butt joint: equal parts are connected  
same thickness at the weld line  
for bigger thicknesses multilayer weld are necessary  
in certain cases welding from both sides
- tee joint :  
two parts come perpendicular together
- corner joint:  
connection of two parts forming an edge
- lap joint:  
overlapping of two parts
- edge joint:  
parallel joint of two parts

## German definitions (Stoßarten)

- butt joint: *Stumpfnaht*
- tee joint: *T-Stoß, Doppel-T-Stoß*
- corner joint: *Eckstoß ( $\alpha \neq 90^\circ$ )*
- lap joint: *Überlappstoß*
- edge joint : *Flachstoß*

## Types of Weld : (Nahtformen) (see Fig. 03)

- fillet weld (single/ double)  $\sphericalangle$  : *Kehlnaht*  
(most used case in welding process)
- square weld (single/double) : *Stumpfnaht ( I - Naht)*
- bevel groove weld: *HV-Naht*
- V-groove weld : *V-Naht*
- J-groove weld : *HU-Naht*
- U-groove weld: *U-Naht*

## Types of Welds and Symbols for Welds:

- fillet weld : *Kehlnaht*
- plug or shot : *Verschlussschweißung*
- spot weld : *Punktschweißung*
- flash weld : *Widerstandsschweißung*

## Types of grooves for welding and groove preparation

acc. to DIN 8551 T1( see Fig. 04a, 04b, 04c, 04d)

- dimensional conditions for different types of grooves
- thickness conditions for different types of welds
- special symbols for grooves and welds
- welding method for different grooves

### Types of welds and symbols

Form of weld	Sectional representation	Appropriate symbol	Form of weld	Sectional representation	Appropriate symbol
Fillet			Plug or slot		
Square butt			Backing strip		
Single-V butt			Spot		
Double-V butt			Seam		
Single-U butt			Mashed seam		
Double-U butt			Stitch		
Single-bevel butt			Mashed stitch		
Double-bevel butt			Projection		
Single-J butt			Flash		
Double-J butt			Butt resistance or Pressure (upset)		
Stud					
Bead (edge or seal)					
Sealing run					

(Figure 04a)





**Figure 04b:** Groove shapes for gas fusion welding, arc welding or inert gas welding of steel acc. to DIN 8551 T1

Tabelle 1. Fugenformen für das Gasschmelz-, Lichtbogenhand- und Schutzgasschweißen von Stahl nach DIN 8551 T1

Kennzahl	Werkstückdicke <i>s</i>	Ausführung	Benennung	Symbol	Fugenform Schnitt	Maße				Schweißverfahren	Bemerkungen
						Grad $\alpha, \beta$	Spalt <i>b</i>	Steghöhe <i>c</i>	Flankenhöhe <i>h</i>		
1	bis 2	einseitig	Bördelnaht			-	-	-	-	G, E, WIG, MIG, MAG	meist ohne Zusatzwerkstoff
2	bis 4	einseitig	Stirnflachnaht			-	-	-	-	G, E, WIG, MIG, MAG	-
3.1	bis 4	einseitig	I-Naht			-	$\approx s$	-	-	G, E, WIG	-
						-	0 bis <i>S</i>	-	-	MIG, MAG	Mit Badsicherung auch bis 8 mm
3.2	bis 8	beidseitig				-	$\approx \frac{s}{2}$	-	-	E, WIG	-
						-	0 bis $\frac{s}{2}$	-	-	MIG, MAG	-
4	3 bis 10 3 bis 40	einseitig oder beidseitig	V-Naht			$\approx 60$ $\approx 60$ 40 bis 60	0 bis 3	-	-	G E, WIG MIG, MAG	Gegebenenfalls mit Badsicherung und größerem Stegabstand
5	über 16	einseitig	Steilflanken-naht			5 bis 15	6 bis 10	-	-	E, MIG, MAG	-
6	über 10	beidseitig	Y-Naht			$\approx 60$ 40 bis 60	0 bis 3	2 bis 4	-	E, WIG MIG, MAG	In Sonderfällen auch für kleinere Werkstückdicken und G möglich
7	über 10	beidseitig	DY-Naht			$\approx 60$ 40 bis 60	0 bis 4	2 bis 6	-	E, WIG MIG, MAG	-

Tabelle 1. (Fortsetzung)

Kennzahl	Werkstückdicke <i>s</i>	Ausführung	Benennung	Symbol <sup>1)</sup>	Fugenform Schnitt	Maße				Schweißverfahren <sup>4)</sup>	Bemerkungen
						Grad <sup>2)</sup> $\alpha, \beta$	Spalt <sup>3)</sup> <i>b</i>	Steghöhe <i>c</i>	Flankenhöhe <i>h</i>		
8	über 10	beidseitig <sup>5)</sup>	DV-Naht			$\approx 60$ 40 bis 60	0 bis 3	-	$\frac{s}{2}$	E, WIG <sup>5)</sup> MIG, MAG	-
9	über 10	beidseitig <sup>5)</sup>	$\frac{2}{3}$ DV-Naht			$\alpha_1 \approx 60$ $\alpha_2 \approx 60$ $\alpha_1$ 40 bis 60 $\alpha_2$ 40 bis 60	0 bis 3	-	$\frac{s}{3}$	E WIG <sup>5)</sup> MIG, MAG	-
10	über 12	einseitig	U-Naht auf V-Wurzel			$\alpha \approx 60$ $\beta \approx 8$	0 bis 3	-	$\approx 4$	E, WIG <sup>5)</sup> MIG, MAG	Wurzel auch mit G $e = 4,6 + 0,14 s$ , wenn $h = 4$ mm
11	über 12	einseitig oder beidseitig <sup>5)</sup>	U-Naht			$\approx 8$	0 bis 3	$\approx 3$	-	E, WIG <sup>5)</sup> , MIG, MAG	Wurzel auch mit G $e = 4,6 + 0,14 s$ , wenn $c = 4$ mm und $\beta = 8^\circ$
12	über 30	beidseitig <sup>5)</sup>	DU-Naht			$\approx 8$	0 bis 3	$\approx 3$	$\approx \frac{s}{2}$	E, WIG <sup>5)</sup> MIG, MAG	Diese Fugenform kann auch mit unterschiedlichen Flankenhöhen analog der $\frac{2}{3}$ -DV-Naht ausgeführt werden. $e = 5 + 0,1 s$ , wenn $c = 3$ mm und $\beta = 8^\circ$

1) Eventuelle Zusatzzeichen siehe DIN 1912 Teil 5

2) Für Schweißen in Schweißposition q (waagrecht an senkrechter Wand) auch größer und/oder unsymmetrisch.

3) Die angegebenen Maße gelten für den gehefteten Zustand. Der günstigste Stegabstand ist abhängig von der Schweißposition und vom Schweißverfahren.

4) E = Lichtbogenhandschweißen, G = Gasschweißen, MIG = Metall-Inertgas-Schweißen, MAG = Metall-Aktivgas-Schweißen, WIG = Wolfram-Inertgas-Schweißen.

5) Beim Wolfram-Inertgas-Schweißen kann Schutz gegen Oxidation und Badsicherung durch Schutzgas (siehe DIN 32 526, z. Z. noch Entwurf), z. B. Formiergas, erforderlich sein.

6) Wurzel gegebenenfalls ausgearbeitet und gegengeschweißt.

(Fig. 04c)

Tabelle 1. (Fortsetzung)

Kennzahl	Werkstückdicke <i>s</i>	Ausführung	Benennung	Symbol	Fugenform Schnitt	Maße				Schweißverfahren	Bemerkungen
						Grad <i>a, β</i>	Spalt <i>b</i>	Steghöhe <i>c</i>	Flankenhöhe <i>h</i>		
13	3 bis 40	einseitig oder beidseitig	HV-Naht			40 bis 60	0 bis 4	-	-	E WIG MIG MAG	-
14	über 16	einseitig	H-Steilflanken-naht			15 bis 30	6 bis 10 ≈ 10	-	-	E MIG MAG	Mit Badsicherung
15	über 10	beidseitig	DHV-Naht (Doppel-HV-Naht)			40 bis 60	0 bis 4	-	$\frac{s}{2}$	E WIG MIG MAG	Diese Fugenform kann auch mit unterschiedlichen Flankenhöhen analog der $\frac{2}{3}$ -DV-Naht ausgeführt werden.
16	über 16	einseitig oder beidseitig	HU-Naht			10 bis 20	0 bis 3	IV 2	-	E MIG MAG	$e = 6,4 + 0,2 s$ , wenn $c = 2$ mm und $\beta = 10^\circ$  $e = 4,9 + 0,36 s$ , wenn $c = 2$ mm und $\beta = 20^\circ$
17	über 30	beidseitig	DHU-Naht			10 bis 20	0 bis 3	IV 2	-	E MIG MAG	Diese Fugenform kann auch mit unterschiedlichen Flankenhöhen analog der $\frac{2}{3}$ -DV-Naht ausgeführt werden. $e = 6,6 + 0,1 s$ , wenn $c = 2$ mm und $\beta = 10^\circ$  $e = 6,7 + 0,2 s$ , wenn $c = 2$ mm und $\beta = 20^\circ$

(Fig. 04d)

**Figure 05: Welding methods acc. to different materials and plate dimensions**

Werkstoffgerechte Zuordnung von Schweißverfahren

Blechdicke	Baustahl			leg. Stahl			Austenite			Gußeisen			Al			Cu			Ni			Ti		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
G	●	○	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	○	-	○	○	○	-	-	-	-	-	-
E	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	○	-	○	○	○	○	○	○	-	-	-
MAG	○	●	●	○	●	●	○	○	○	●	●	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MIG	○	○	○	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
WIG	●	○	-	●	○	-	●	○	-	●	○	-	●	●	○	●	●	○	●	●	○	●	●	○
Plasma	●	●	●	●	○	-	●	○	-	-	-	-	-	-	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●
UP	-	○	●	-	○	●	-	○	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	-
RES	-	-	●	-	-	●	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EB	●	○	○	●	●	○	●	○	-	-	-	-	○	○	○	△	△	△	●	●	○	●	●	△
Laser	●	○	-	●	△	△	●	○	-	-	-	-	○	-	-	△	△	△	●	○	-	●	○	-
Widerstands-schweißen	●	●	○	●	●	○	△	△	△	△	△	△	●	●	●	○	○	-	△	△	△	●	○	-

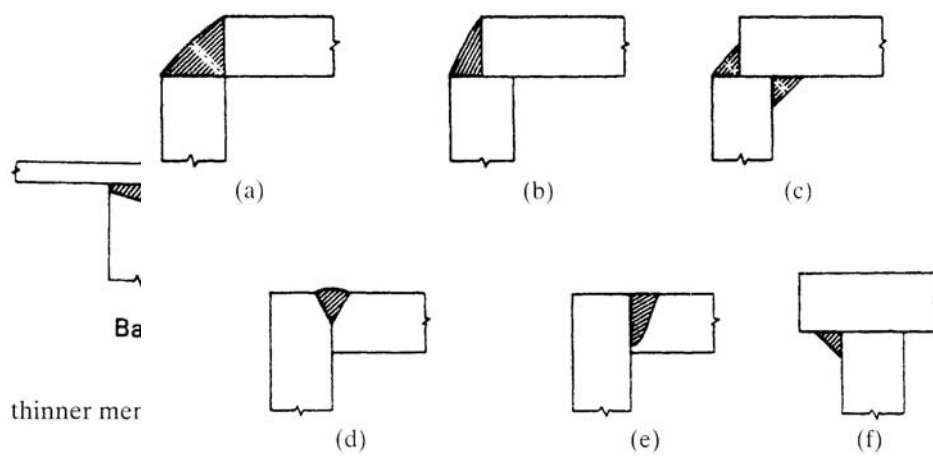
● = gut , ○ = mit Einschr. , - = nicht , △ = keine Ang. , A = 1-5 mm , B = 5-10 mm , C = >10 mm

- G: gas welding ; *Gasschmelzschweißen*
- E: electric arc welding; *Elektrolichtbogenschweißen*
- MAG: metal-active gas welding;  
*Metall-Aktiv Gasschweißen(CO<sub>2</sub>,Edelgas+CO<sub>2</sub>)*
- WIG: Tungsten inert gas welding; *Wolfram-Inert Gasschweißen*
- Plasma: Plasma-welding ; *Plasmaschweißen*
- UP: under power welder; *Unterpulverschweißen*
- RES: *Elektro-Schlacke-Schweißen*
- EB: electronic beam welding ; *Elektronen Strahlschweißen*
- Laser: laser welding

Flash-welding: Different materials:

- construction steels
- austenitic stainless steels
- low alloyed steels
- cast iron
- Al-alloys
- Cu-alloys
- Ni-Ti-alloys

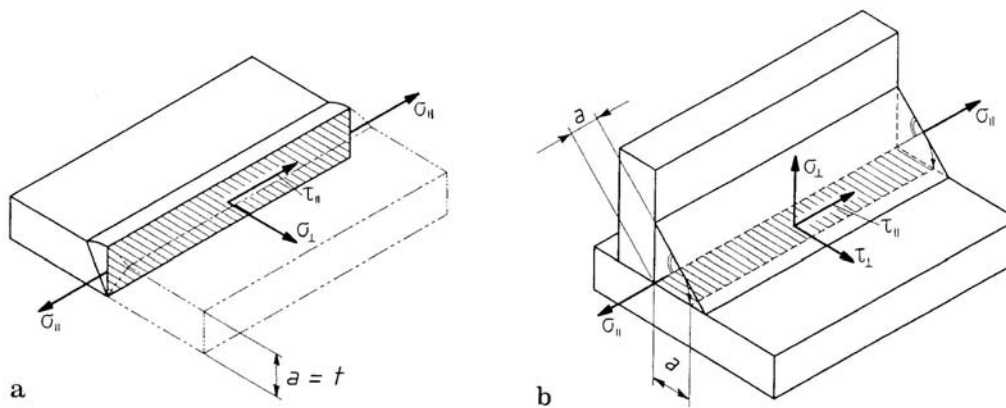
Various corner joints and weld sizes (see Fig. 06)



Various corner joints.

(Fig. 06)

## Stress model for weld lines:



Schweißnahtmodell für die Spannungen in der Schweißnaht a) Stumpfnah; b) Kehlnah

### Figure 07:

Stress model for a weld line a) butt joint ; b) corner joint (fillet weld)

a) for butt welds

$a = t$ : thickness of weld line

normal stresses  $\sigma_{\perp}$  perpendicular to weld line

normal stresses  $\sigma_{\parallel}$  parallel to weld line

shear stresses  $\tau_{\parallel}$  parallel to weld line

$A_w$ : weld area (  $w$  = welding)

$$A_w = a \cdot l$$

$a$ : thickness of weld

$l$ : length of weld ;  $l = b - 2a$  effective length of weld line

$a$ : depth of end craters (welding without backup plate)

b) for fillet welds

normal stresses  $\sigma_{\perp}$  perpendicular to weld line

normal stresses  $\sigma_{\parallel}$  parallel to weld line

shear stresses  $\tau_{\perp}$  perpendicular to weld line

shear stresses  $\tau_{\parallel}$  parallel to weld line

**Figure 08:** Geometrical size and stresses of butt weld lines

**Geometric data for butt welds**

loading	sketch	geom. data*	nom. stress
tension / compression		$A_w = a \cdot l$	$\sigma_{w,z(d)} = \sigma_{\perp} = \frac{F}{A_w}$
bending		$W_b = \frac{a \cdot l^2}{6}$	$\sigma_{w,b} = \sigma_{\perp} = \frac{M_b}{W_b}$
		$W_b = \frac{l \cdot a^2}{6}$	
shear		$A_{wS} = a \cdot l$	$\tau_{w,s} = \tau_{\parallel} = \frac{F}{A_{wS}}$
torsion		$W_t = c_2 \cdot l \cdot a^2$	$\tau_{w,t} = \tau_{\parallel} = \frac{T}{W_t}$

\* mit  $l = b - 2 \cdot a$  (with respect to ends)

und $c_2$	0,208	0,231	0,246	0,267	0,282	0,299	0,307	0,312	0,33
für $l/a =$	1	1,5	2	3	4	6	8	10	$\infty$

## Calculation of weld stresses for butt welds (s. slide 08)

**a)** tension / compression loading:

$$A_w = a \cdot l ; l = b - 2a \quad (\text{without end craters})$$

$$\sigma_{wt,c} = \sigma_{\perp} = \frac{F}{A_w}$$

**b)** bending (of butt welds)

$$W_b = \frac{a \cdot l^2}{6} \quad \sigma_{bw} = \sigma_{\perp} = \frac{M_b}{W_b}$$

$$l = b - 2a \quad (\text{bending of "long" side})$$

$$W_b = \frac{l \cdot a^2}{6} \quad (\text{bending of "short" side})$$

**c)** shear:

$$A_{ws} = a \cdot l \quad \tau_{ws} = \tau_{\parallel} = \frac{F}{A_{ws}}$$

$$l = b - 2a$$

**d)** torsion of a rectangular sections:  
 (complicated case)

$$W_t = c_2 \cdot l \cdot a^2 \quad \tau_{w.t} = \tau_{\parallel} = \frac{T}{W_t}$$

$$l = b - 2a$$

$$c_2 = f(l/a) \quad c_2 = 0.208 \text{ for square}$$

$$c_2 = 0.333 \text{ for } l/a \rightarrow \infty$$



**Figure 09:** Geometrical size and nominal stress of fillet welds

Geometrische Größen und Nennspannungen bei Kehlnähten

Beanspruchung	Anordnung	Geometrische Größen	Nennspannung
Zug (Druck)		$A_w = \sum a_i \cdot l_i = 2 a (h + b)$	$\sigma_{w,z(d)} = \sigma_{\perp} = \frac{F}{A_w}$
		$W_b = \frac{I_{b\Box}^a}{e_{\max}}$	$\sigma_{w,b} = \sigma_{\perp} = \frac{M_b}{W_b}$
Biegung		$W_b = \frac{I_{b\bigcirc}^b}{e_{\max}}$	
	Schub		$A_{wS} = 2 a h$
		$A_{wS} = 0,5 \pi d a$	
Torsion		$W_t = 2 (h + a) (b + a) a$	$\tau_{w,t} = \tau_{\parallel} = \frac{T}{W_t}$
		$W_t = \frac{\pi}{2} (d + a)^2 a$	

<sup>a</sup> mit  $I_{b\Box} = 2 \left[ \frac{b a^3}{12} + b a \left( \frac{h + a}{2} \right)^2 + \frac{a h^3}{12} \right]$  und  $e_{\max} = \frac{h}{2} + a$

<sup>b</sup> mit  $I_{b\bigcirc} = \frac{\pi [(d + 2a)^4 - d^4]}{64}$  und  $e_{\max} = \frac{d}{2} + a$

(Fig. 09)

## Calculation of weld stresses for fillet weld (s. Fig. 09)

**a) tension/compression: rectangular section:**

$$A_w = \Sigma a_i \cdot l_i = 2 \cdot a \cdot (h + b)$$

$$\sigma_{wt,c} = \sigma_{\perp} = \frac{F}{A_w}$$

**b) bending: rectangular section:**

$$W_b = I_{b\Box} / e_{\max} \quad \sigma_{bw} = \sigma_{\perp} = \frac{M_b}{W_b}$$

$$I_{b\Box} = 2 \left[ \frac{b \cdot a^3}{12} + b \cdot a \left( \frac{h+a}{2} \right)^2 + \frac{a \cdot h^3}{12} \right]$$

$$e_{\max} = \frac{h}{2} + a$$

- circular section:

$$W_b = I_{bO} / e_{\max} \quad \sigma_{bw} = \sigma_{\perp} = \frac{M_b}{W_b}$$

$$I_{bO} = \frac{\pi \left[ (d+2a)^4 - d^4 \right]}{64}; \quad e_{\max} = \frac{d}{2} + a$$

**c) shear**

- rectangular section:

$$A_{ws} = 2 \cdot a \cdot h \quad \tau_{ws} = \tau_{\parallel} = \frac{F}{A_{ws}}$$

- circular section:

$$A_{ws} = \frac{\pi \cdot d \cdot a}{2} \quad \tau_{ws} = \tau_{\parallel} = \frac{F}{A_{ws}}$$

**d) torsion:**

- rectangular section:

$$W_t = 2 \cdot (h+a)(b+a) \cdot a \quad \tau_{wt} = \tau_{\parallel} = \frac{T}{W_t}$$

- circular section:

$$W_t = \frac{\pi}{2} (d+a)^2 \cdot a \quad \tau_{wt} = \tau_{\parallel} = \frac{T}{W_t}$$

## Combination of different stresses in a weld to a equivalent stress $\sigma_{eq}$ :

$$\sigma_{\perp} ; \sigma_{\parallel} ; \tau_{\perp} ; \tau_{\parallel}$$

a) for static loading ( $N < 2 \times 10^4$ )

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \sigma_{\parallel}^2 + \sigma_{\perp}\sigma_{\parallel} + \tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2}$$

$$\approx \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2} \quad (\text{simplified})$$

b) for dynamic loading: (DET)

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \sigma_{\parallel}^2 - \sigma_{\perp}\sigma_{\parallel} + 2 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)}$$

Allowable stresses in welds for static loading (DIN18 800)  
 case  $H$  or  $H_z$  (**Hauptlast**-mainload) ; **Zusatzlast**

Allowable stresses for all butt welds:

	<u>S235JRG2</u>		<u>S355J2G3</u>	
	H	HZ	H	HZ
Compression/ bending Compression	160	180	240	270
For tension/ bending Tension	135	150	170	190
For fillet welds and any loading	135	150	170	190

**Allowable stresses in weld lines for dynamic loading:**  
**acc. to DS 95201 ; (Deutsche Gesellschaft f. Schweißtechnik)**  
 (s. Fig. 10a,10b,10c)

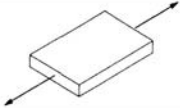
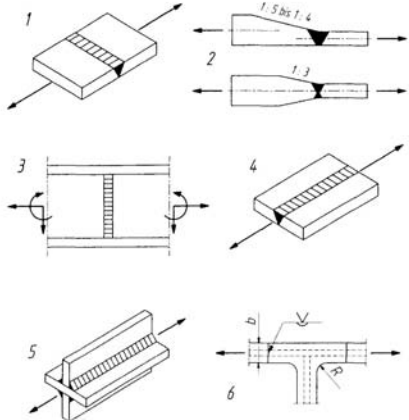
Linie nach 2.11	Anordnung, Stoß- und Nahtform, Belastung, Prüfung		mögliche Bewertungsgruppe
	Darstellung	Beschreibung	
A		Auf Biegung oder durch Längskraft beanspruchte <i>nicht geschweißte Bauteile</i> (Vollstab).	-
B		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bauteil mit quer zur Krafrichtung beanspruchter <i>Stumpfnah</i>t. Wurzel gegengeschweißt, Schweißnaht kerbfrei bearbeitet und 100% durchstrahlt.</li> <li>2. Bauteile <i>verschiedener Dicke</i> mit quer zur Krafrichtung beanspruchter <i>Stumpfnah</i>t. Wurzel gegengeschweißt, Schweißnaht kerbfrei bearbeitet und 100% durchstrahlt.</li> <li>3. <i>Trägerstegblech</i>: Querkraft-Biegung mit überlagerter Längskraft. Wurzel gegengeschweißt, Schweißnaht kerbfrei bearbeitet und 100% durchstrahlt.</li> <li>4. Bauteile mit längs zur Krafrichtung beanspruchter <i>Stumpfnah</i>t. Wurzel gegengeschweißt, Schweißnaht kerbfrei bearbeitet und 100% durchstrahlt.</li> <li>5. Bauteile mit längs zur Krafrichtung beanspruchten <i>DHV-(K-) oder Kehlnähten</i>. Schweißnahtübergänge ggf. bearbeitet und auf Risse geprüft.</li> <li>6. <i>Bleckkonstruktionen</i> mit Gurtstößen (<math>R \geq 0,5 b</math>). Wurzeln gegengeschweißt, Schweißnähte in Krafrichtung bearbeitet und 100% durchstrahlt.</li> </ol>	B

Abb. 2.10. Beispiele für die Ausführung von Schweißverbindungen im Maschinenbau nach DS 95 201 (zugehörige Spannungslinien s. Abb. 2.11)

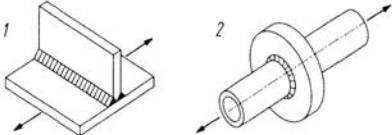
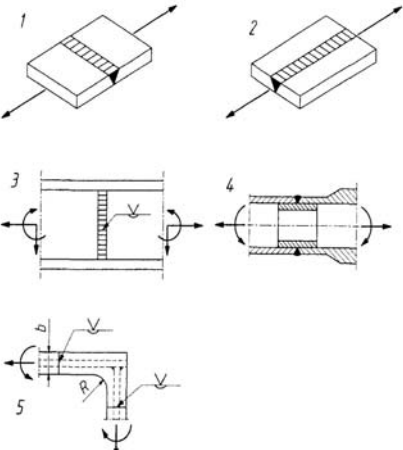
Linie nach 2.11	Anordnung, Stoß- und Nahtform, Belastung, Prüfung		mögliche Bewertungsgruppe
	Darstellung	Beschreibung	
C		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Durchlaufendes Bauteil</i> mit nicht belasteten Querversteifungen. DHV-(K-)Nähte kerbfrei bearbeitet und auf Risse geprüft.</li> <li>2. <i>Durchlaufendes Bauteil</i> mit angeschweißten Scheiben. DHV-(K-)Nähte kerbfrei bearbeitet und auf Risse geprüft.</li> </ol>	C
D		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bauteil mit quer zur Krafrichtung beanspruchter <i>Stumpfnah</i>t. Wurzel gegengeschweißt, Schweißnaht stichprobenweise (mindestens 10%) durchstrahlt.</li> <li>2. Bauteile mit längs zur Krafrichtung beanspruchter <i>Stumpfnah</i>t. Wurzel gegengeschweißt. Schweißnaht stichprobenweise (mindestens 10%) durchstrahlt.</li> <li>3. <i>Trägerstegblech</i>: Querkraftbiegung mit überlagerter Längskraft. Wurzel gegengeschweißt, Schweißnaht stichprobenweise (mindestens 10%) durchstrahlt.</li> <li>4. <i>Rohrverbindungen</i> mit unterlegten <i>Stumpfnähten</i>. Schweißnähte stichprobenweise (mindestens 10%) durchstrahlt.</li> <li>5. <i>Bleckkonstruktionen</i> mit <i>Stumpfstößen</i> in Eckverbindungen (<math>R \geq 0,5 b</math>). Wurzeln gegengeschweißt, Schweißnähte stichprobenweise (mindestens 10%) durchstrahlt.</li> </ol>	B

Abb. 2.10 (Fortsetzung)

(Fig. 10a)

E1		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bauteil mit quer zur Krafttrichtung beanspruchter Stumpfnah. Abhängig von den Anforderungen: Wurzel gegengeschweißt. Schweißnähte nicht bearbeitet.</li> <li>2. Bauteile mit längs zur Krafttrichtung beanspruchter Stumpfnah. Schweißnähte nicht bearbeitet.</li> <li>3. Trägerstegbleche: Querkraftbiegung mit überlagerter Längskraft. Abhängig von den Anforderungen: Wurzel gegengeschweißt, nicht gegengeschweißt. Schweißnähte nicht bearbeitet.</li> <li>4. Eckverbindungen mit Stumpfstößen und Eckblechen. Schweißnähte nicht bearbeitet.</li> <li>5. Rohrverbindung (auch mit Vollstab) mit quer zur Krafttrichtung beanspruchter Stumpfnah. Schweißnähte nicht bearbeitet.</li> <li>6. Verbindung verschiedener Werkstoffdicken durch eine Stumpfnah. Wurzel gegengeschweißt. Schweißnähte nicht bearbeitet.</li> <li>7. Durch Kreuzstoß mittels DHV-(K-)Nähten verbundene Bauteile. Schweißnähte bearbeitet. (Nicht bearbeitete Nähte: Linie E5)</li> <li>8. Durch DHV-(K-)Nähte verbundene, auf Biegung und Schub beanspruchte Bauteile. Schweißnähte bearbeitet. (Nicht bearbeitete Nähte: Linie E5)</li> </ol>	C B
E5		<ol style="list-style-type: none"> <li>9. Durchlaufendes Bauteil, an das quer zur Krafttrichtung Teile mit bearbeiteten DHV-(K-)Nähten angeschweißt sind.</li> <li>10. Bauteil mit aufgeschweißter Gurtplatte. Die Kehlnähte sind an den Stirnflächen bearbeitet. (Nicht bearbeitete Nähte: Linie F)</li> </ol>	

Abb. 2.10 (Fortsetzung)

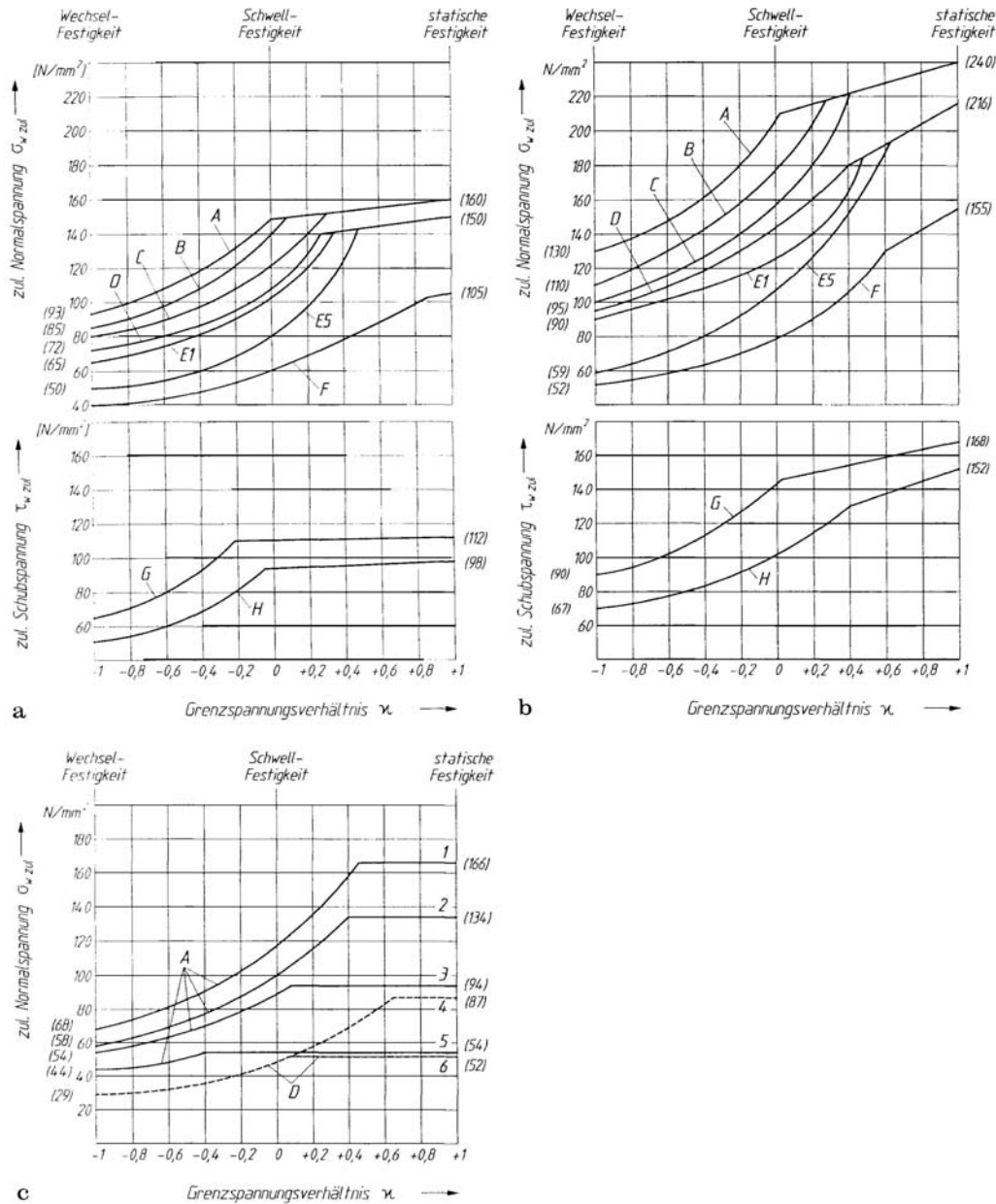
Linie nach 2.11	Anordnung, Stoß- und Nahtform, Belastung, Prüfung	mögliche Bewertungsgruppe	
2.11	Darstellung	Beschreibung	
F		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Stumpfstöße von Profilen ohne Eckbleche. Schweißnähte nicht bearbeitet.</li> <li>2. Durchlaufendes Bauteil mit einem durch nichtbearbeitete Kehlnähte aufgeschweißtem Bauteil.</li> <li>3. Durchlaufendes Bauteil mit einem durchgesteckten, durch Kehlnähte verbundenen Bauteil. Die Schweißnähte sind nicht bearbeitet.</li> <li>4. Durch Kreuzstoß mittels Kehlnähten verbundene Bauteile. Die Schweißnähte sind nicht bearbeitet.</li> <li>5. Auf Schub und Biegung durch nicht bearbeitete Kehlnähte verbundene Bauteile.</li> </ol>	

Abb. 2.10 (Fortsetzung)

G		<p>Stegblechquerstoß, maximale Schubbeanspruchung in Trägernulllinie. Die Linie gilt auch für auf Torsion beanspruchte, nicht geschweißte Bauteile.</p>	B
H		<p>Schubverbindung mit DHV-(K-) oder Kehlnähten zwischen Stegblech und Gurt bei Biegeträgern (Halsnähte)</p>	B

Abb. 2.10 (Fortsetzung)

(Fig. 10b)



**Abb. 2.11.** Zulässige Spannungen für Schweißverbindungen im Maschinenbau nach DS 95201 für Werkstückdicken  $\geq 10$  mm (Erläuterungen der Spannungslinien A bis H siehe Abb 2.10  
 a) für Bauteile aus S 235 JRG 2 (St 37-2);  
 b) für Bauteile aus S 355 J2 G3 (St 52-3);  
 c) für Bauteile aus AlMgSi 1 und AlMg 3.

**Figure 10c:** Allowable stresses for weld connections in mech. Engineering acc. to DS 95201 ; for plate thickness  $\geq 10$ mm ( explanation of stress line A to H see Fig. 2.10)  
 a) for the parts from S235JRG2  
 b) for the parts from S355J2G3  
 c) for the parts from AlMgSi 1 and AlMg 3

### Stress ratio for dynamic loading:

$$R_s = \kappa = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_L}{\sigma_u}$$

- $\kappa = R_s = +1$  : ; static loading
- $1 > \kappa > 0$  : general swell loading
- $\kappa = 0$  : released swell loading ( $\sigma_u = 0$ )
- $0 > \kappa > -1$  : general reversing loading
- $\kappa = -1$  : full reversing loading ( $\sigma_m = 0$ )

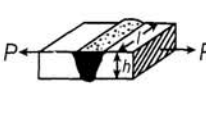
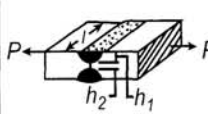
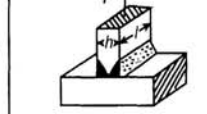
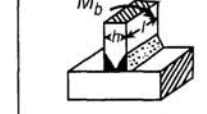
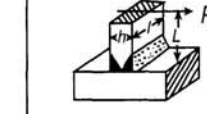
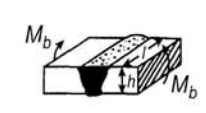
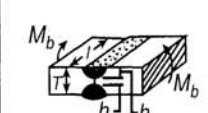
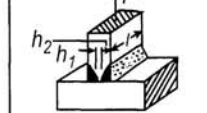
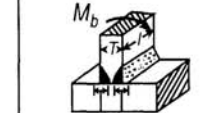
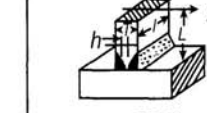
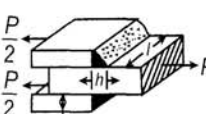
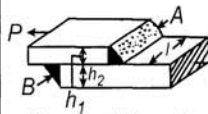
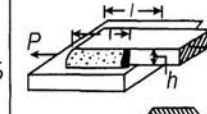
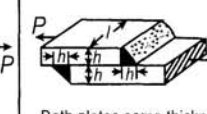
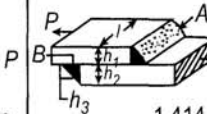
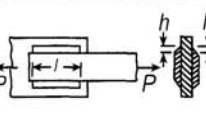
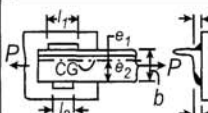
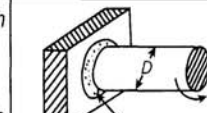



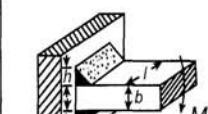
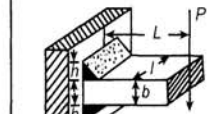







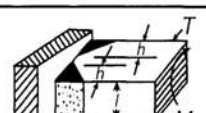
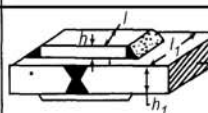
- $\sigma_{all}$  for : - S235JRG2 (St37-2)
- S355J2G3 (St52-3)
- AlMgSi 1 Al-alloy
- AlMg3 Al-alloy

- $\sigma_{w,all} = \sigma_{\perp,all}$  : allowable normal stress
- $\tau_{w,t} = \tau_{\parallel,all}$  : allowable shear stress

Line group A - B.....F acc. to different welding examples (s. [Fig. 10a,b](#))

- most critical case for  $\kappa$ : -1
  - most critical line group: F for normal stresses
  - H for shear stresses
- ↓  
showed

Weld-stress formulas

 $\sigma = \frac{P}{hl}$	 $\sigma = \frac{P}{(h_1+h_2)l}$	 $\sigma = \frac{P}{hl}$	 $\sigma_b = \frac{6M_b}{lh^2}$	 $\sigma_b = \frac{6PL}{lh^2} \quad \tau = \frac{P}{lh}$
 $\sigma_b = \frac{M_b}{lh}$	 $\sigma_b = \frac{3TM_b}{lh(3T^2-6Th+4h^2)}$	 $\sigma = \frac{P}{(h_1+h_2)l}$	 $\sigma_b = \frac{3TM_b}{lh(3T^2-6Th+4h^2)}$	 $\sigma_b = \frac{3TPL}{lh(3T^2-6Th+4h^2)}$ $\tau = \frac{P}{2lh}$
 $\sigma = \frac{0.707 P}{hl}$	 Stress in weld A equals stress in weld B $\sigma = \frac{1.414 P}{(h_1+h_2)l}$	 $\sigma = \frac{0.707 P}{hl}$	 Both plates same thickness $\sigma = \frac{0.707 P}{hl}$	 Weld A $\sigma = \frac{1.414 P}{(h_1+h_2)l}$ Weld B $\sigma = \frac{1.414 Ph_2}{h_3l(h_1+h_2)}$
 $\sigma = \frac{0.354 P}{hl}$	 $\sigma = \frac{1.414 P}{h(l_1+l_2)}$ or $l_1 = \frac{1.414 Pe_2}{\sigma hb}, l_2 = \frac{1.414 Pe_1}{\sigma hb}$	 $\tau = \frac{2.83 M_t}{hD^2\pi}$	 $\tau = \frac{5.66 M_b}{hD^2\pi}$	 $\sigma_b = \frac{4.24 M_b}{h[b^2+3l(b+h)]}$
 $\sigma = \frac{0.707 P}{hl}$	 $\sigma_b = \frac{1.414 M_b}{hl(b+h)}$	 $\tau_{av} = \frac{0.707 P}{hl}$ $\sigma_{max} = \frac{P}{hl(b+h)} \sqrt{2L^2 + \frac{(b+h)^2}{2}}$	 $\sigma_b = \frac{4.24 M_b}{hl^2}$	 $\tau_{av} = \frac{0.707 P}{hl}$ $\sigma_{max} = \frac{4.24 PL}{hl^2}$
 $\sigma_b = \frac{6 M_b}{hl^2}$	 $\sigma_b = \frac{6 PL}{hl^2} \quad \tau = \frac{P}{hl}$	 $\tau = \frac{M_t(3l+1.8h)}{h^2l^2}$	 $\sigma_b = \frac{3 M_b}{hl^2}$	 $\sigma_b = \frac{3 PL}{hl^2} \quad \tau = \frac{P}{2hl}$
 $\tau = \frac{M_t}{2(T-h)(l-h)h}$	 Fillet weld $\sigma = \frac{1.414 P}{2h_1+h_2}$ Butt weld $\sigma = \frac{P}{2h_1+h_2}$	<p><math>\sigma</math> Normal stress, MPa(ksi);      <math>P</math> External load, kN(lbf);  <math>\tau</math> Shear stress, MPa(ksi);      <math>L</math> Linear distance, m(in);  <math>M_b</math> Bending moment, N m(lbf in);      <math>h</math> Size of weld, m(in);  <math>M_t</math> twisting moment, N m(lbf in);      <math>l</math> Length of weld, m(in).</p>		

Source: *Welding Handbook*, 3rd edition, American Welding Society, 1950.

(Figure: 11)



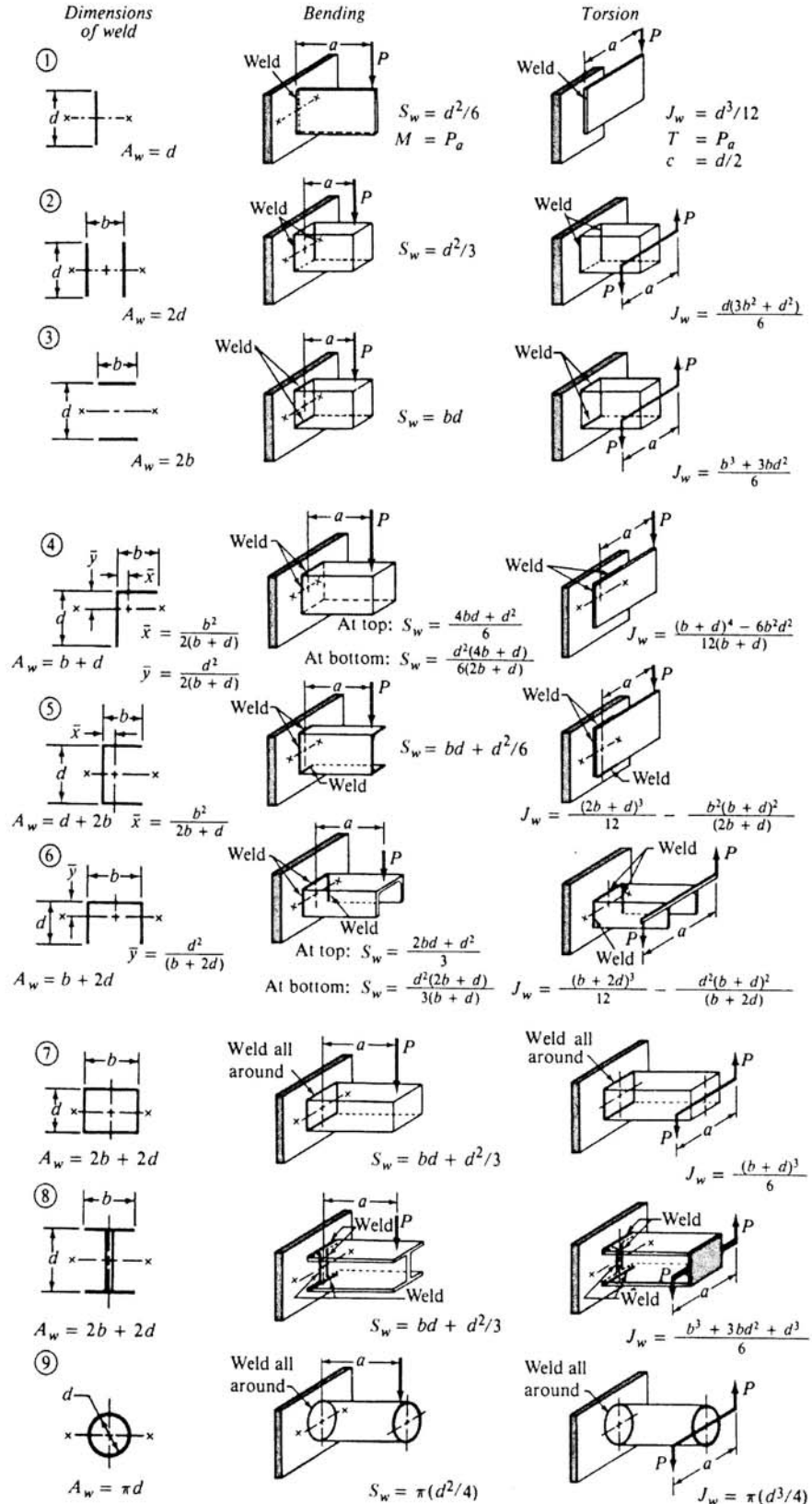
**TABLE 12-3**  
**Properties of weld—treating weld as line**

Outline of welded joint <i>b</i> = width, <i>d</i> = depth	Bending (about horizontal axis <i>x</i> - <i>x</i> )	Twisting
	$Z_w = \frac{d^2}{6}$	$J_w = \frac{d^3}{12}$
	$Z_w = \frac{d^2}{3}$	$J_w = \frac{d(3b^2 + d^2)}{6}$
	$Z_w = bd$	$J_w = \frac{b^3 + 3bd^2}{6}$
	$Z_w = \frac{4bd + d^2}{6} = \frac{d^2(4bd + d)}{6(2b + d)}$ top bottom	$J_w = \frac{(b + d)^4 - 6b^2d^2}{12(b + d)}$
	$Z_w = bd + \frac{d^2}{6}$	$J_w = \frac{(2b + d)^3}{12} - \frac{b^2(b + d)^2}{2b + d}$
	$Z_w = \frac{2bd + d^2}{3} = \frac{d^2(2b + d)}{3(b + d)}$ top bottom	$J_w = \frac{(b + 2d)^3}{12} - \frac{d^2(b + d)^2}{b + 2d}$
	$Z_w = bd + \frac{d^2}{3}$	$J_w = \frac{(b + d)^3}{6}$
	$Z_w = \frac{2bd + d^2}{3} = \frac{d^2(2b + d)}{2(b + d)}$ top bottom	$J_w = \frac{(b + 2d)^3}{12} - \frac{d^2(b + d)^2}{b + 2d}$
	$Z_w = \frac{4bd + d^3}{3} = \frac{4bd^2 + d^3}{6b + 3d}$ top bottom	$J_w = \frac{d^3(4b + d)}{6(b + d)} + \frac{b^3}{6}$
	$Z_w = bd + \frac{d^2}{3}$	$J_w = \frac{b^3 + 3bd^2 + d^3}{6}$
	$Z_w = 2bd + \frac{d^2}{3}$	$J_w = \frac{2b^3 + 6bd^2 + d^3}{6}$
	$Z_w = \frac{\pi d^2}{4}$	$J_w = \frac{\pi d^3}{4}$
	$Z_w = \frac{\pi d^2}{2} + \pi D^2$	—
	—	$J_w = \frac{b^3}{12}$

Note: Multiply the values  $J_w$  by the size of the weld  $w$  to obtain polar moment of inertia  $J_u$  of the weld.

(Fig. 12a)

Geometry factors for  
 weld analysis



(Fig. 12b)