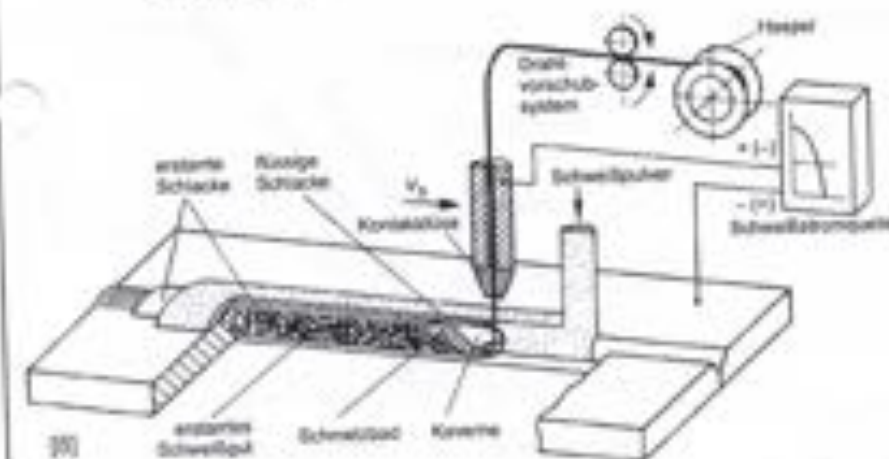


4.2.1.1 Lichtbogenhandschweißen (E-111)

- Energie: Lichtbogen
- Zusatzmaterial: abschmelzende, umhüllte Elektrode
- Bauteile: Behälter, Röhre
- Werkstoffe: Eisen- und Nichteisenmetalle
- überlagernde Schlacke verhindert Oxidation



4.2.1.2 Unterpulverschweißen (UP-12)

- Energie: Lichtbogen
- Zusatzmaterial: abschmelzende Elektrode
- Bauteile: Behälter, Fahrzeugbau, Schiffbau
- Werkstoffe: Stahl, Aluminium
- Nähte: lang, dick, horizontal
- Pulverschüttung verhindert Oxidation

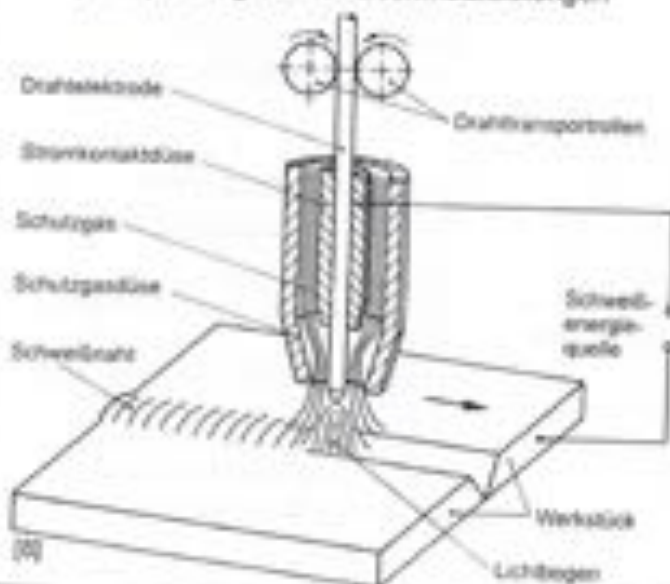
Lichtbogenschweißen allgemein: „Das Schweißbad entsteht durch Einwirken eines Lichtbogens oder mehrerer Lichtbögen. Der Lichtbogen brennt zwischen einer Elektrode und dem Werkstück. Bei Verwendung einer abschmelzenden Elektrode ist diese gleichzeitig Schweißzusatz [3]“. Es gibt eine ganze Reihe von Schweißverfahren, welche Lichtbogen-basiert funktionieren.

Lichtbogenhandschweißen: „Der Lichtbogen brennt zwischen einer manuell zugeführten Stabelektrode und dem Werkstück. Lichtbogen und Schweißbad werden gegen die Atmosphäre nur durch Gase bzw. Schlacke abgeschirmt, welche von der Elektrode stammen [1]“. Die abschmelzende Elektrode ist mit einer Keramik-Umhüllung versehen, welche mit abschmilzt und als Schlacke diese Schutzfunktion des Schmelzbades übernimmt. Sie hat also drei Funktionen gleichzeitig: stromdurchflossene Elektrode, Schweißzusatz und Schweißbadschutz. Das Verfahren ist universell einsetzbar, es wird jedoch vor allem in Werkstatt und Montage im Stahl-, Behälter- und Rohrleitungsbau verwendet. Geeignet für alle Stoß- und Nahtarten.

Unterpulverschweißen: „Ein Lichtbogen brennt unsichtbar zwischen einer abschmelzenden Elektrode und dem Werkstück. Lichtbogen und Schweißzone werden durch eine Pulverschicht abgedeckt. Die aus Pulver gebildete Schlacke schützt das Schweißbad vor der Atmosphäre. Besonderheiten, Hinweise: Hohe Abschmelzleistungen, gute Nahtformung, hohe Röntgensicherheit. Für dicke Bleche und lange Nähte [1]“. Unterpulverschweißen ist nur für horizontale Nähte einsetzbar.

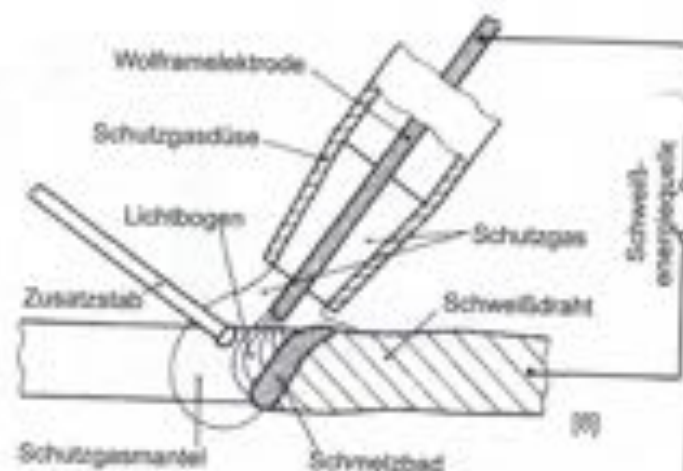
4.2.1.2.1 MIG/MAG (131/135)

- Energie: Lichtbogen
- Zusatzmaterial: abschmelzende Elektrode
- Bauteile: Behälter, Schiff- und Flugzeugbau
- Werkstoffe: un- bzw. niedrigleg. Stähle (MAG); hochleg. Stähle, Alu., Kupferlegierungen (MIG)
- Schutzgas (MIG) verhindert Oxidation; Aktivgas (MAG) erzeugt hohe Abschmelzleistungen



4.2.1.2.2 WIG (141)

- Energie: Lichtbogen
- Zusatzmaterial: extern, da nichtabschmelzende Wolfram-Elektrode
- Bauteile: Apparate, Behälter, Kernreaktorbau, Hausgeräte
- Werkstoffe: nahezu alle Metalle
- alle Schweißpositionen
- Schutzgas verhindert Oxidation

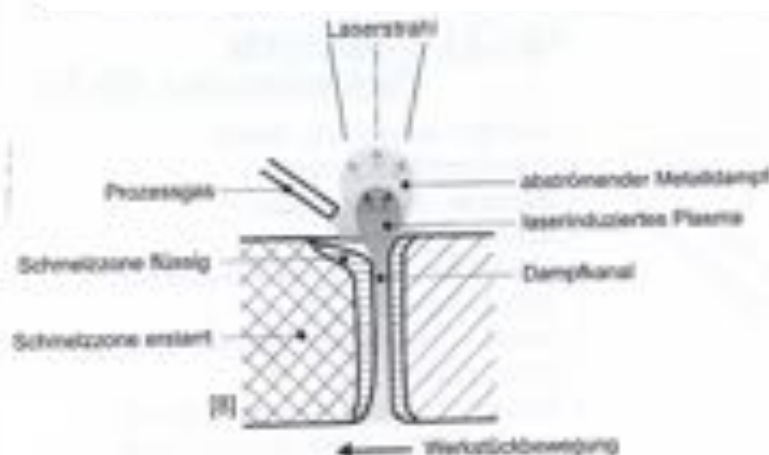


Unter dem Begriff **Schutzgasschweißen** sind eine Reihe von Schweißverfahren zusammengefasst. Diese sind zumeist Lichtbogen-basiert, so dass sie in der Norm DIN EN ISO 4063 auch unter dem Begriff Lichtbogenschweißen aufgeführt sind.

Metall-Inertgas-Schweißen (MIG): „Der Lichtbogen brennt sichtbar zwischen der abschmelzenden Elektrode und dem Werkstück. Als Schutzgase dienen inerte (reaktionsträge) Gase, z.B. Helium, Argon oder ihre Gemische [1]“. Vorzüge dieses Verfahrens sind die sehr variable Abschmelzleistung und ein geringer Verzug. Es wird vorzugsweise für hochlegierte, austenitische Stähle, Aluminium- und Kupferlegierungen verwendet. Vorteil gegenüber dem WIG-Schweißen ist die höhere Wirtschaftlichkeit.

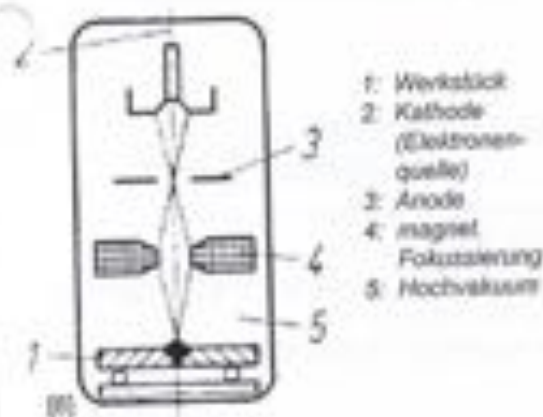
Metall- Aktivgas-Schweißen (MAG): Wie MIG-Schweißen. Als Schutzgase kommen chemisch aktive Gase wie CO_2 und Mischgase zum Einsatz. Vor allem in Industrie- und Handwerkszweigen werden un- bzw. niedriglegierte Stähle mit dem MAG-Verfahren geschweißt.

Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG): „Der Lichtbogen brennt sichtbar zwischen der Wolfram-Elektrode und dem Werkstück. Aufgrund des sehr hohen Schmelzpunktes von Wolfram schmilzt die Elektrode nicht selbst mit ab, sondern der Schweißzusatz wird extern, meist stabförmig zugeführt. Schutzgas: meist Edelgase (Argon). WIG-Schweißen ist für fast alle metallischen Werkstoffe geeignet, ebenso zum Wurzelschweißen dicker Bleche. Auch sind hohe Schweißgeschwindigkeiten zu erreichen [1]“.



4.2.1.3.1 Laserstrahlschweißen (LA-52)

- Energie: Laserstrahl
- Zusatzmaterial als Pulver oder Draht (auch ohne möglich)
- Bauteile: Fahrzeugbau, Elektroindustrie, Medizin, Schiffbau,
- Werkstoffe: nahezu unbeschränkt
- Nähte: tief und schlank
- Schutzgas (Ar, He) verhindert Oxidation
- Schweißen und Schneiden auf gleicher Anlage möglich



Schweißnaht
(Querschnitt):
tief und schlank

4.2.1.3.2 Elektronenstrahlschweißen (EB-51)

- Energie: Elektronenstrahl
- Zusatzmaterial: ohne
- Bauteile: Turbinen, Motoren, Mikroschw.
- Werkstoffe: Stahl, Aluminium, Titan
- Nähte: tief und schlank
- Vakuum: verhindert Oxidation
- hohe Anlagen- und Prozesskosten

Laserstrahlschweißen: Ein Laserstrahl (meist CO_2 - oder Festkörperlaser) wird mittels einer optischen Einheit (Spiegel, Linsen, Teleskope, u.a.) auf eine Werkstückoberfläche fokussiert und schmilzt diese auf. Aufgrund der sehr hohen Energiedichte auf kleinstem Raum wird das Material verdampft, es entsteht ein sog. laserinduziertes Plasma. Dieses bohrt beim Abdampfen einen schlanken Kanal in die Tiefe des Werkstückes, die sog. Dampfkapillare. Es entsteht eine sehr dünne, schlanke Naht, die Wärmebelastung des Bauteils ist im Vergleich zu anderen Schweißverfahren dadurch sehr gering und es gelingt verzugsarm zu schweißen. Schweißen und Schneiden mit Laserstrahlung unterscheidet sich nur durch einfaches Zu- bzw. Abschalten eines Schneidgases (treibt beim Schneiden die Schmelze aus der Fuge heraus), so dass bei Bedarf beide Prozesse kostengünstig auf derselben Anlage durchgeführt werden können. Das Werkstoffspektrum ist nahezu unbegrenzt, neben Metallen lassen sich auch Gläser, Kunststoffe, Keramiken, selbst Holz oder Körpergewebe mittels Laserstrahlung bearbeiten.

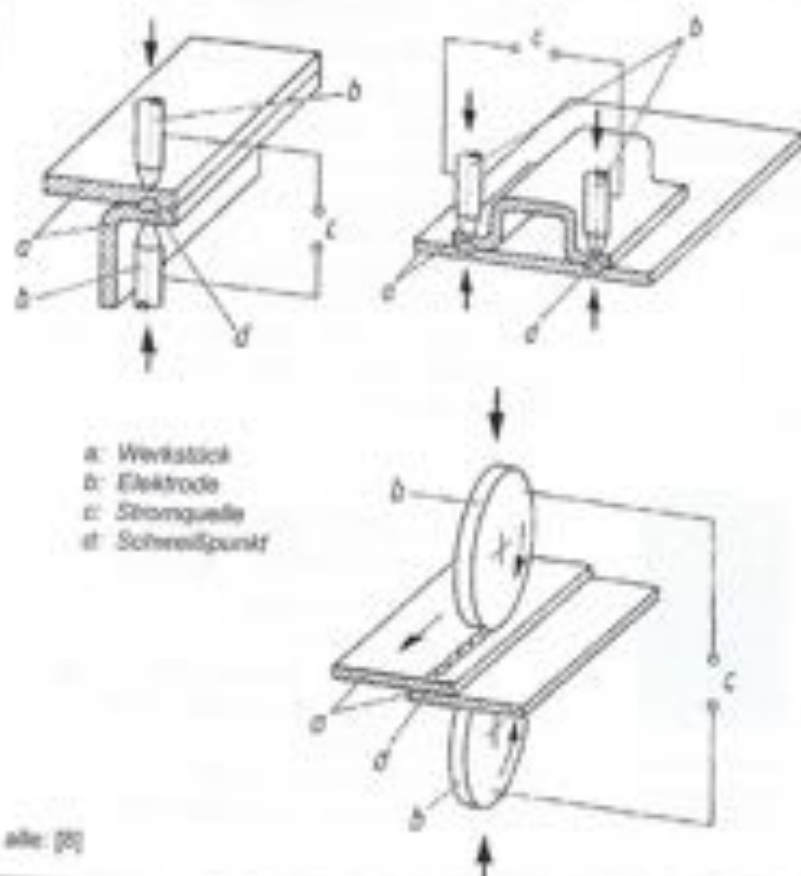
Elektronenstrahlschweißen: Die Energie eines auf wenige Zehntel mm Durchmesser gebündelten Elektronenstrahls wird auf die Werkstückoberfläche mittels elektromagnetischer Elemente fokussiert und dort in Wärme umgewandelt. Dies geschieht im Vakuum, so dass keine sonstigen Vorkehrung zum Schutz des Schmelzbades vor Luftsauerstoff zu treffen sind. Wie beim Laserstrahlschweißen entstehen dünne, tiefe und schlanke Nähte, so dass auch Schweißen von Mikroteilen z.B. in der Elektronik möglich ist. Nachteilig sind die hohen Investitions- und Anlagenkosten, die das Elektronenstrahlschweißen nur bei hohen Stückzahlen und hoher Automatisierung wirtschaftlich machen.

4.2.1.4.1 Widerstands- Punktschweißen (RP-21)

- Energie: elektrischer Strom
- Zusatzmaterial: ohne
- Bauteile: Karosseriebau
- Werkstoffe: Metalle
- Nähte: punktförmig („Schweißlinse“)
- Schutzgas: nein
- hoher Automatisierungsgrad, daher sehr wirtschaftlich
- keine Nahtvorbereitung erforderlich
- nur im Überlappstoß möglich, daher geringe Festigkeit pro Schweißpunkt

4.2.1.4.2 Rollennaht- schweißen (RR-22)

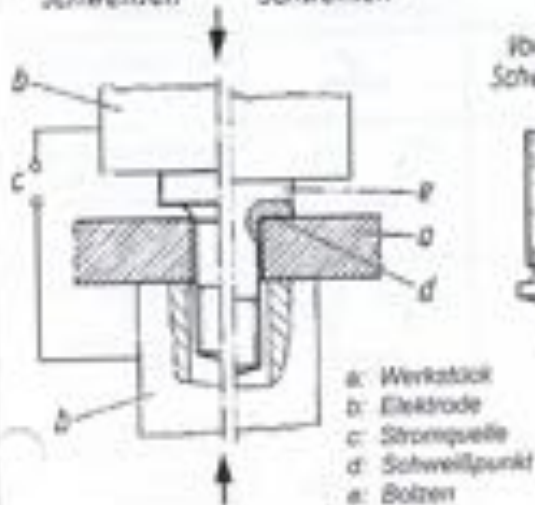
- wie Punktschweißen, nur ohne Nahtunterbrechung
- Bauteile: Fahrzeugbau, Haushaltsgeräte
- Nähte: lang, schmal
- verzugsarmes Schweißverfahren



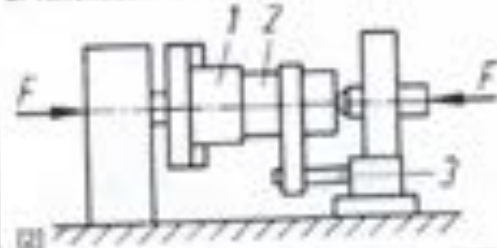
Widerstandspunktschweißen: „Strom und Kraft werden durch Punktschweißelektroden übertragen. Die aufeinander gepressten Flächen der Werkstücke werden nach ausreichendem Erwärmen durch den Stromfluß unter Druck punktförmig (linsenförmig) geschweißt [1]“. Das Verfahren ist sehr gut automatisierbar (Roboter!), es bedarf keiner Nahtvorbereitung, daher ist das Widerstandspunktschweißen sehr wirtschaftlich. Nachteil: verfahrensbedingt kann nur im Überlapp geschweißt werden, was die Festigkeit pro Schweißpunkt erheblich reduziert, dies kann durch eine Erhöhung der Anzahl an Schweißpunkten kompensiert werden. Im Karosseriebau („Rohbau“) ist das Widerstandspunktschweißen auch heute noch das „Brot- und Butter-Geschäft“.

Rollennahtschweißen: gleiche Funktionsweise wie beim Widerstandspunktschweißen, durch die rollenförmigen, stromdurchflossenen Elektroden ist eine Längsnaht ohne Unterbrechung möglich. Nur begrenzte, einfache Geometrien schweißbar, dies allerdings mit dichten Schweißnähten.

vor dem Schweißen nach dem Schweißen



- 1: rotierendes Werkstück
2: ruhendes Werkstück



4.2.1.4.3 Bolzenschweißen (RBO-782)

- Energie: elektrischer Strom
- Zusatzmaterial: Bolzen
- Bauteile: meist dünne Bleche
- Werkstoffe: Metalle
- Näher: punktförmig
- Schutzgas: nein
- hoher Automatisierungsgrad, daher sehr wirtschaftlich
- keine Nahtvorbereitung erforderlich

4.2.1.5 Reibschweißen (FR-42)

- Energie: Umwandlung der Rotationsenergie durch Reibung in Wärme
- Bauteile: Fahrzeugbau, Luftfahrtindustrie, Werkzeugbau
- Werkstoffe: Stahl, Al- und Cu-Leg.
- Näher: (groß-) flächig im Stumpfstoß

Bolzenschweißen: „Die Werkstücke, von denen eines ein Bolzen oder bolzenförmig ist, werden nach Anschmelzen der Stoßflächen durch den Lichtbogen unter Anwendung von Kraft ohne Schweißzusatz geschweißt. Bolzenförmige Teile mit rundem, ovalem, quadratischem und rechteckigem Querschnitt oder Gewindebolzen auf dünnem Blech lassen sich vollflächig in sehr kurzer Zeit hochwertig verschweißen. Die Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe ist möglich [1].“

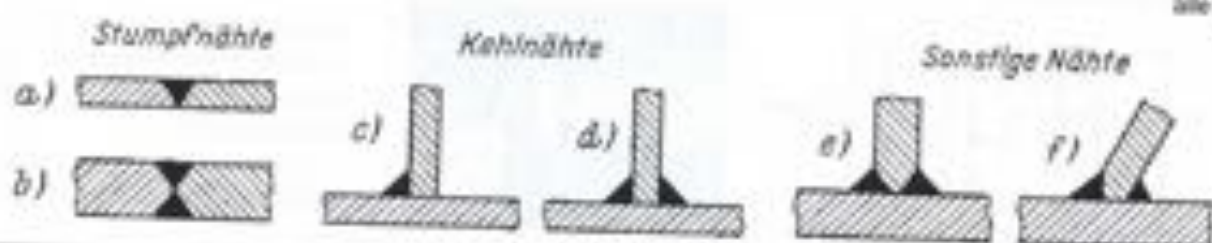
Reibschweißen: Die Werkstücke werden an den Stoßflächen durch Reiben eines rotierenden Werkstückes erwärmt. Der Werkstoff wird teigig, die Rotation gestoppt und die Teile aufeinander geschweißt. Mit dieser Methode werden in der Automobilindustrie Kardanwellen, Ventilstößel und Antriebsritzeln hergestellt. In der Werkzeugindustrie werden Bohrer, Reibahlen und Fräser mittels Reibschweißen geschäftet. Das Reibschweißen ist zum Fügen unterschiedlicher Werkstoffe geeignet, jedoch muss mindestens ein Fügeteil rotationssymmetrisch sein.

4.2.2 Stoß- arten

Stoßen	Lage der Teile	Beschreibung	Stoßen	Lage der Teile	Beschreibung
Stumpfstoß		Die Teile liegen in einer Ebene und stoßen stumpf gegeneinander.	Schrägstoß		Ein Teil stößt schräg gegen ein anderes.
Parallelstoß		Die Teile liegen parallel aufeinander.	Eckstoß		Zwei Teile stoßen unter beliebigem Winkel aneinander (Ecke)
Überlappstoß		Die Teile liegen parallel aufeinander und überlappen sich.	Mehrfachstoß		Drei oder mehr Teile stoßen unter beliebigem Winkel aneinander.
T-Stoß		Die Teile stoßen rechtwinklig (T-förmig) aufeinander.	Kreuzungsstoß		Zwei Teile liegen kreuzend übereinander.
Doppel-T-Stoß		Zwei in einer Ebene liegende Teile stoßen rechtwinklig (doppel-T-förmig) auf ein dazwischenliegendes drittes.			

alle [3]

4.2.3 Naht- arten



Bei der Beurteilung der **Schweißmöglichkeit** spielt neben den verschiedenen Schweißverfahren die geometrische Ausgestaltung der Schweißung eine große Rolle. Man unterscheidet zwischen Stoßart, Nahtart und Nahtform.

„Nach DIN 1912 ist der Schweißstoß der Bereich, in dem die Teile durch Schweißen miteinander vereinigt werden. Die **Stoßart** wird durch die konstruktive Anordnung der Teile zueinander bestimmt.“

Die Schweißnaht vereinigt die Teile am Schweißstoß. Man unterscheidet folgende **Nahtarten**:

- **Stumpfnähte**: die Teile liegen in einer Ebene und bilden eine Fuge, in der die Naht gezogen wird (s. oben: a: V-Naht; b: Doppel-V-Naht oder X-Naht).
- **Kehlnähte**: die Teile liegen in zwei Ebenen rechtwinklig zueinander und bilden eine Kehlfuge, in der die Naht gezogen wird (c: Kehlnaht; d: Doppelkehlnaht).
- **Sonstige Nähte**: Nähte, die weder der Stumpfnahnt noch der Kehlnaht zugeordnet werden können oder Kombinationen aus beiden sind (e: Doppel-HY-Naht mit Doppelkehlnaht oder K-Stegnaht mit Doppelkehlnaht; f: HY-Naht mit Kehlnähten am Schrägstoß) [3].

Es ist möglich, einen Stumpfstoß mit einer Kehlnaht zu schweißen und umgekehrt einen T-Stoß mit einer Stumpfnahnt. Die Unterscheidung der Begriffe Stoß und Naht ist also sehr wichtig.

4.2.4 Nahtformen (mit Zusatz- und Ergänzungssymbolen)

Bezeichnung	Symbol	Figurform	Nahthens	Bezeichnung	Symbol	Figurform	Nahthens	Vorlauf und Art der Naht	Ergänzungssymbol
Stangennähte									
Winkelnaht				UV-Naht (U-Naht)	X			Ingenieurverbindende Naht	
U-Naht				UV-Naht (U-Naht)	K				
V-Naht	V			UV-Naht	X			Bauteilnaht	
UV-Naht	V			UV-Naht	X				
Y-Naht	Y			UV-Naht (K-Signatur)	K				
UV-Naht	Y			UV-Naht	X				
U-Naht	Y			UV-Naht	X				
UV-Naht	Y			UV-Naht (Doppel-U-Naht)	K				
Doppel-U-Naht				UV-Naht	X				
UV-Naht				UV-Naht	X				
UV-Naht				UV-Naht mit Gegenmaß					
Kantennähte									
Kantennaht				Doppel-Kantennaht					
Schrägenähte									
UV-Naht mit Kantennaht				UV-Naht mit Gegenmaß					

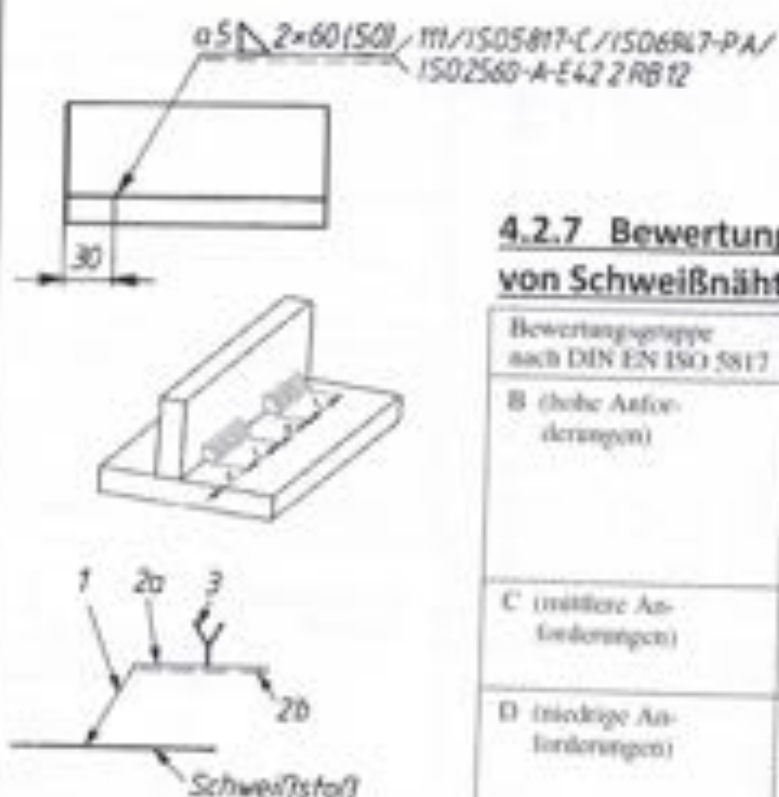
Oberflächenform und Nahtausführung	Zusatzsymbol
mit Keimern	
mit Wulst	
große Keimern	
Wulst ausgebreitet und Gegenlage angefüllt	

Anwendungsbeispiele

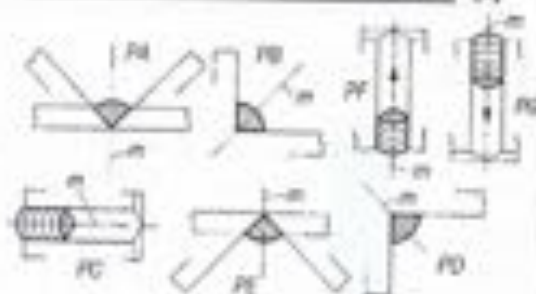
siehe [2]

„Die (auszuwählende) **Nahtform** richtet sich nach der Dicke der zu verbindenden Teile und nach der erforderlichen Festigkeit der Schweißverbindung. Die wichtigsten Nahtformen sind hier zusammengestellt und deren Symbole angegeben, mit denen die Nähte in den Zeichnungen gekennzeichnet werden. Farblich hinterlegt sind die Grundsymbole, alle anderen zusammengesetzte Symbole. Zu diesen gibt es noch Ergänzungs- und Zusatzsymbole (Bilder rechts) [3].“

4.2.5 Bemaßung von Schweißnähten [1]



4.2.6 Schweißpositionen [3]



4.2.7 Bewertung von Schweißnähten [1]

Bewertungsgruppe nach DIN EN ISO 5817	Empfehlungen für den Einsatz im ungelegten Bereich
B (hohe Anforderungen)	<ul style="list-style-type: none"> - schwingend hoch beanspruchte Schweißnähte - volle Ausnutzung der Dauerfestigkeitswerte - Leichtbaukonstruktionen - hoch beanspruchte bewegte Bauteile - z.B. Hebel, Schwingen, Rahmen, Achsen, Wellen, Läufer, Zapfstangen
C (mittlere Anforderungen)	<ul style="list-style-type: none"> - bei mittlerer Schwingbeanspruchung - z.B. Ständer, Rahmen, Gehäuse, Kästen, Maschinen-gestelle
D (niedrige Anforderungen)	<ul style="list-style-type: none"> - schwingend niedrig beanspruchte Schweißgruppen - z.B. Einsatz für Schweißteile, die auf Steifigkeit bemessen (überdimensioniert) sind, Gestelle, Ständer, Grundplatten, Repak, Vorrichtungskörper

Zu 4.2.5 Bemaßung von Schweißnähten: „Bemaßungsbeispiel unterbrochener Nahte einer Kehlnaht mit Vormaß und Fertigungsangaben;

$N=2$ Einzelnähte mit Nahtdicke $a=5$ mm, Einzelnahtlänge $l=60$ mm mit Nahtabstand $e=50$ mm und Vormaß $v=30$ mm; hergestellt durch Lichtbogenhandschweißen (Kennzahl 111), geforderte Bewertungsgruppe C nach ISO 5817; Wannenposition PA nach DIN EN ISO 6947; verwendete Stabelektrode ISO 2560-A-E42 2 RB 12 [1].

Allgemeine Bemaßung: „1=Pfeillinie; 2a=Bezugs-Volllinie; 2b=Bezugs-Strichlinie; 3=Symbol. Die Seite des Stoßes, auf die die Pfeillinie hinweist, ist die Pfeilseite. Die andere Seite des Stoßes ist die Gegenseite. Wenn das Symbol auf die Seite der Bezugs-Volllinie gesetzt wird, dann befindet sich die Schweißnaht (die Nahtoberfläche) auf der Pfeilseite des Stoßes [1].“

Zu 4.2.6 Schweißpositionen: „Die Schweißpositionen, von denen die Wahl des Schweißverfahrens und des Schweißzusatzes abhängt, enthält DIN EN ISO 6947 mit: m=Nahtmittellinie; PA=Wannenposition; PB=Horizontalposition; PF=Steigposition; PG=Fallposition; PC=Querposition; PE=Überkopposition; PD=Horizontal-Überkopposition [3].“

Zu 4.2.7 Bewertung von Schweißnähten: „Die Bewertungsgruppen dienen der einheitlichen Bewertung der Nahtqualität in allen Anwendungsbereichen, wie z.B. im Stahlbau, für Druckbehälter und geschweißte Rohrleitungen. Ohne Unterscheidung nach Stumpf- und Kehlnähten werden für die Unregelmäßigkeiten an Schweißverbindungen drei Bewertungsgruppen festgelegt und zwar niedrig (D), mittel (C) und hoch (B). Die Grenzwerte der Unregelmäßigkeiten sind also in der Gruppe D am höchsten (und somit die Anforderungen an die Schweißung am niedrigsten), in der Gruppe B am niedrigsten. Unregelmäßigkeiten können sein: Risse, Poren, Hohlräume, feste Einschlüsse, Bindefehler, ungenügende Durchschweißung, Kantenversatz, Fo...- und Maßabweichungen [1].“

4.3.1 Allgemeingültige Richtlinien zur Schweißsicherheit

> Gefahr: Verzug, Risse, etc.

- so wenig Wärmeenergie wie möglich einbringen
- **lange, dünne Nähte**
- tiefenwirksame Verfahren, z.B. **LS, EB**



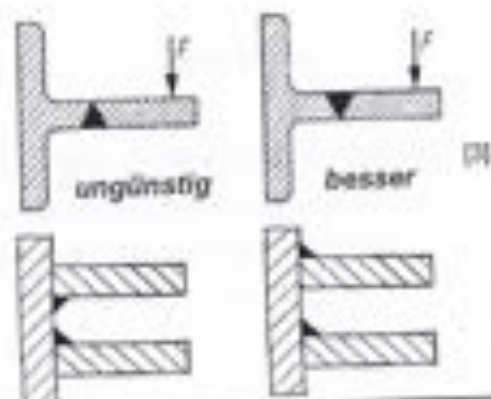
Beispiel:

- > lange (L), dünne (a) Naht: $\sigma_{\text{Nenn}} = \frac{F}{a \cdot L}$ und $V_{\text{Nenn}} = a^2 \cdot L$
- > kurze (L/2), dicke (2a) Naht: $\sigma_{\text{Nenn}} = \frac{F}{a \cdot L} = \sigma_{\text{Nenn}}$ und $V_{\text{Nenn}} = 2 \cdot a^2 \cdot L = 2 \cdot V_{\text{Nenn}}$

→ Zuzuführende Wärmemenge bei langer, dünner Naht halb so groß!

> Gefahr: Versagen/Bruch der Schweißnaht

- Schweißnaht in druckbeanspruchte Zone legen
- **Nahtwurzel nicht auf Zug** beanspruchen



> Gefahr: schlechte Durchführung der Schweißung

- **Zugänglichkeit** sicherstellen
- nur **qualifizierte Schweißer**

Schweißnähte stellen häufig Schwachstellen in technischen Konstruktionen dar und definieren die Sollbruchstelle einer Baugruppe. Jede Schweißkonstruktion muss im Einzelfall und im Detail kritisch auf Tauglichkeit untersucht werden, darüberhinaus können aber einige **allgemeingültige Richtlinien zur Schweißsicherheit** formuliert werden.

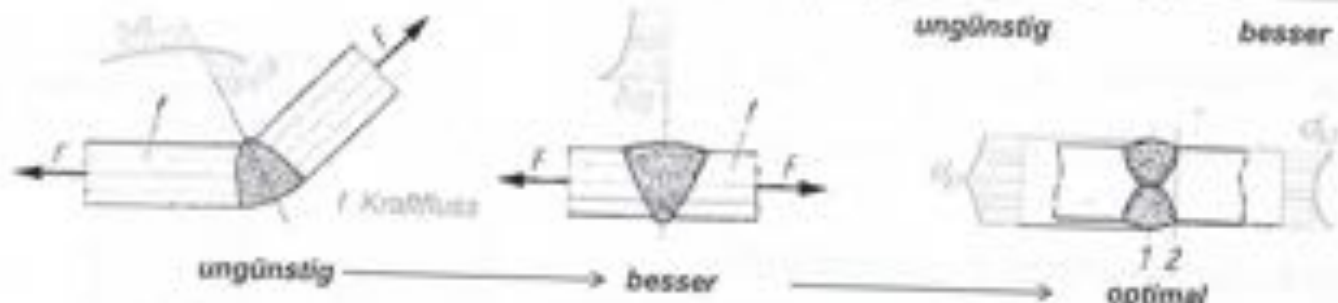
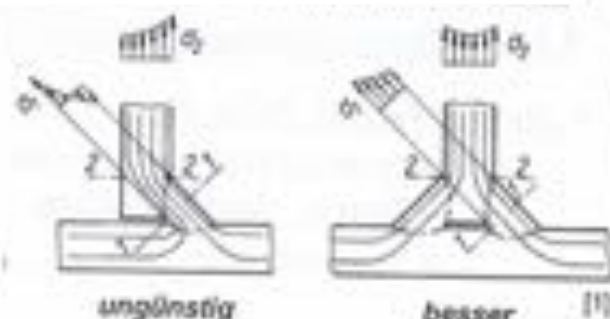
Generell gilt: je weniger Wärme beim Schweißprozess eingebracht wird, umso geringer ist die Gefahr von Bauteilverzug und Rissbildung. Daher möglichst geringes aufzuschmelzendes Nahtvolumen anstreben, d.h. lange, dünne Nähte bevorzugen.

Aufgrund häufig auftretender Mikrorisse beim Schweißprozess, insbesondere bei schwierig zu schweißenden Werkstoffen, soll vor allem die Nahtwurzel möglichst nicht in einer zugbelasteten Zone liegen.

Zugänglichkeit ist sicherzustellen unter Berücksichtigung des gewählten Schweißverfahrens. Insbesondere kritische Schweißnähte an hochbelasteten oder sicherheitskritischen Bauteilen dürfen nur von qualifizierten Schweißern durchgeführt werden.

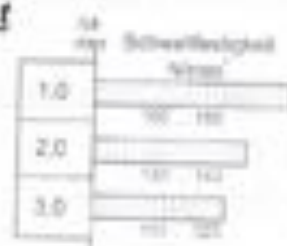
➤ Gefahr: Kraftumlenkung in der Schweißnaht

- **Stumpfnähte** bevorzugen
- wenn Kehlnähte, dann beidseitig und hohl
- Überlapp- und Laschenstöße vermeiden



➤ Gefahr: Kerbwirkung der Schweißnaht

- Nahtüberhöhung vermeiden
- Einbrandkerben vermeiden/glätten



„Von entscheidender Bedeutung für die Nahtfestigkeit ist der **Kraftfluss**. Seine Ab- oder Umlenkung ruft Spannungsspitzen hervor. Ein Stumpfnäht besitzt eine höhere Schweißfestigkeit als eine Kehlnäht, weil in ihr der Kraftfluß nicht umgelenkt wird. Von den Kehlnähten besitzt die Hohlkehlnäht die höchste Schweißfestigkeit, weil in ihr der Kraftfluß am sanftesten umgelenkt wird. Im Allgemeinen wird jedoch die billigere Flachkehlnäht bevorzugt [3].“

Wenn sich Kehlnähte nicht vermeiden lassen, sollten sie möglichst beidseitig geschweißt werden, vor allem bei dynamischer Belastung.

Überlapp- und Laschenstöße sind nach Möglichkeit beim Schweißen ganz zu vermeiden.


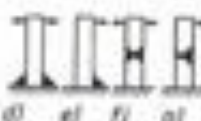



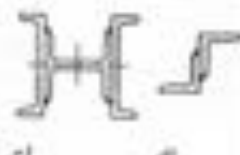





Der Stumpfstoss erzielt die besten Festigkeitswerte, wenn **gegengeschweißt** (wurzelgeschweißt) wird.

Zu große **Nahtüberhöhungen** (im Beispiel: bei Blechdicke $t=10\text{mm}$ ist eine Nahtüberhöhung von max. $\Delta a=1\text{mm}$ tolerabel) führen zum Absenken der Schweißfestigkeit [7]. **Einbrandkerben** sollten vermieden bzw. geglättet werden (s. Bild rechts unten: a) ohne Einbrandkerbe; b) mit grösserer Einbrandkerbe; c) Kerbe verlaufend ausgeschliffen)

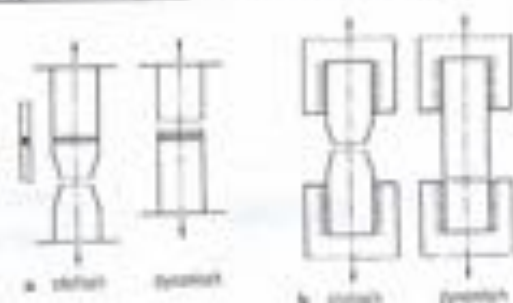
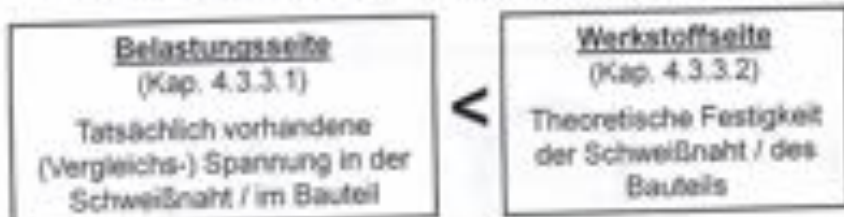
Zeile	ungünstig	besser	Hinweise
1			Stumpfnähte bevorzugen. Auf ungestörten Kraftfluss achten. Bei (a) und (b) ist Nietverbindung nachgeahmt.
2			Bei Stumpfstößen scharfen Wechsel der Blechdicke vermeiden. Günstiger Kraftfluss durch allmählichen Übergang (b und c). Bei hoher Belastung Neigung nicht steiler als 1:4. Zentrischen Stoß bevorzugen (c).
3			Zugbeanspruchung geschweißter Bleche in Dickenrichtung vermeiden. Gefahr von Terrassenbrüchen durch vermindertes Formänderungsvermögen in Dickenrichtung infolge nichtmetallischer Einschlüsse.
4			Kehlnähte möglichst doppelseitig ausführen. Hohlkehlnähte (d) sind am günstigsten, besonders bei dynamischen Belastungen (geringe Kerbwirkung).

Abb. [1]

Geschweißte Bauteile setzen sich aus immer wiederkehrenden Gestaltungselementen zusammen (z.B. Rippen, Naben, Stabanschlüsse). Auf dieser und den folgenden Seiten werden unter Berücksichtigung der vorstehend aufgestellten Richtlinien einige grundlegende Gestaltungsbeispiele gezeigt [1].

5	 <p>a) b) c)</p>	 <p>d) e) f) g)</p>	Nahzwurzeln nicht in Zugzonen legen.
7	 <p>a) b)</p>	 <p>c) d) e) f)</p>	Eckstöße: Bei (a) ist die Nietverbindung nachgeahmt. Dünne Bleche abkanten und stumpf verschweißen (f).
8	 <p>a) b)</p>	 <p>c) d)</p>	Auf gute Zugänglichkeit der Nähte achten. Bei (a) sind die Nähte kaum zugänglich.
9	 <p>a)</p>	 <p>b)</p>  <p>c)</p>	Kastenprofil: Ausführung (a) nicht schweißgerecht, Nietkonstruktion war Vorbild, zu viele Nähte, zu teuer. Bei dickeren Blechen nach (b), bei dünneren nach (c) ausführen.
11	 <p>a)</p> <p><i>Einris</i> $\frac{1}{2}F$</p>	 <p>b)</p> <p>$\frac{1}{2}F$</p>	Konsole: Einrisgefahr verringern durch richtige Nahtanordnung; durch T-Querschnitt in der Zugzone geringere Spannungen (b).

„Es ist der Nachweis zu führen, dass die tatsächlichen Beanspruchungen kleiner sind als die Beanspruchbarkeit einer Schweißnaht / eines Bauteils [1]“



Qualitativer Festigkeitsnachweis:

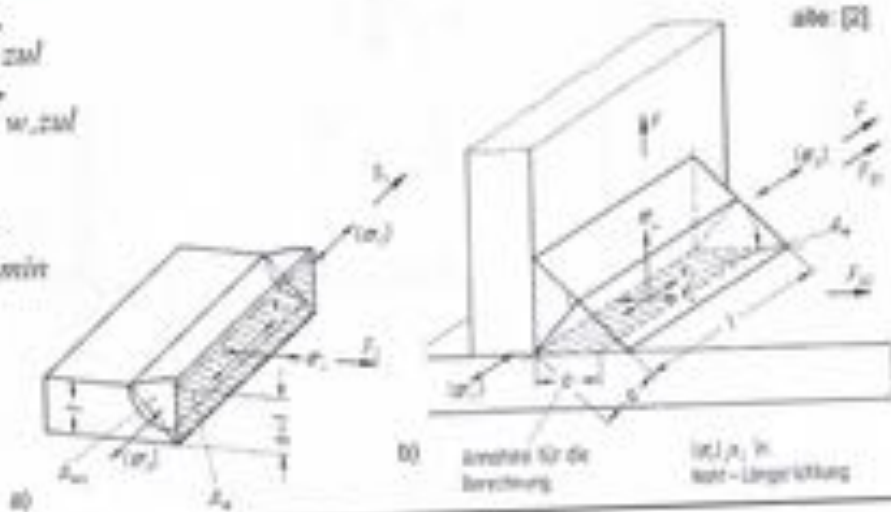
- im Grundwerkstoff $\sigma_V < \sigma_{zml}$
- in/an Schweißnaht $\sigma_{w,V} < \sigma_{w,zml}$

Quantitative Sicherheitsrechnung:

$$S_{zul} > S_{mit}$$

Schweißnahtdicke für

- a) Stumpnaht:
Schweißnahtdicke a = Blechdicke t
- b) Kehlnaht: Nahtdicke a in
Anschlussebene geklappt



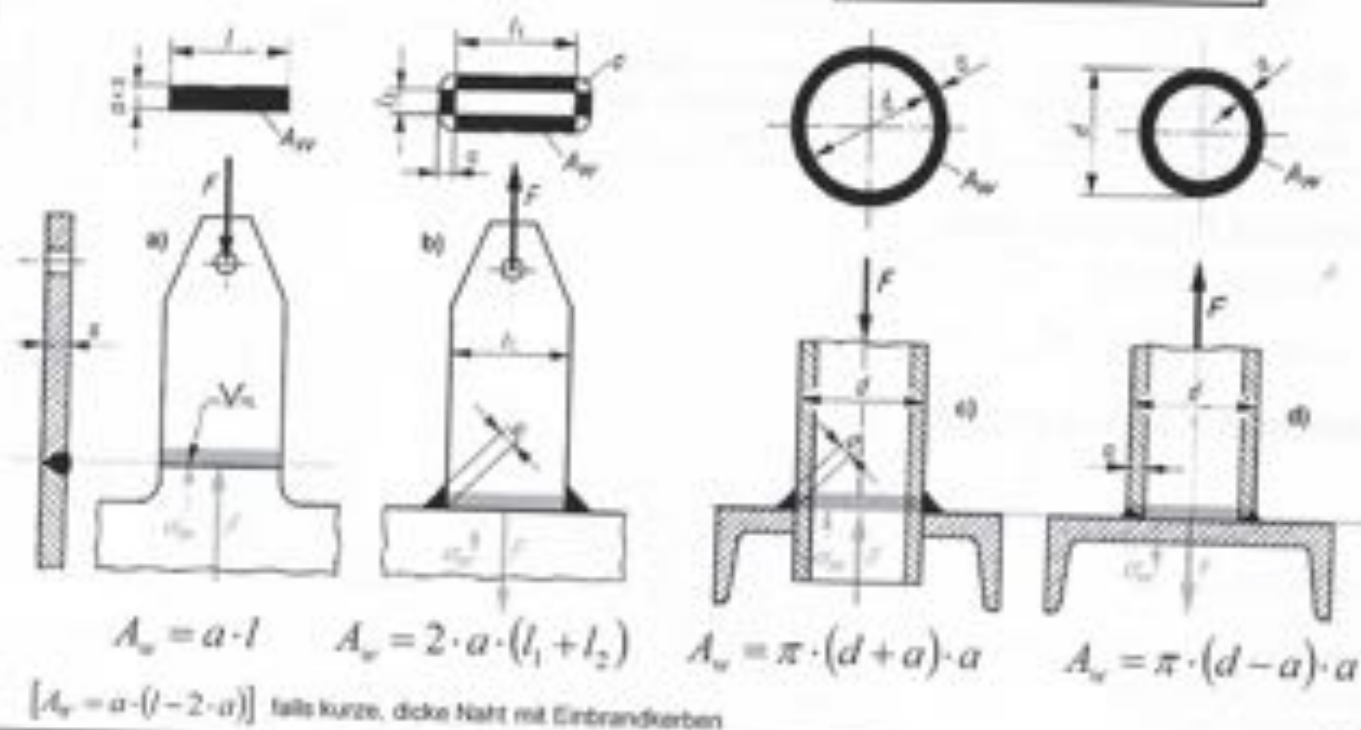
Wie bei allen Festigkeitsberechnungen werden Spannungen miteinander verglichen: die tatsächlich im Bauteil bei einem konkreten Belastungsfall wirkende (vorhandene) Spannung muss immer kleiner sein als der zugehörige theoretische Festigkeitswert des Materials. Wirkt nicht nur eine Spannung, sondern mehrere auf die Schweißnaht ein, so ist die Vergleichsspannung zu bilden.

„Bei **statischer Beanspruchung** und fachgerecht gewähltem Zusatzwerkstoff und Schweißnahtquerschnitt versagt die Schweißverbindung am Übergang von Schweißnaht und Grundwerkstoff oder außerhalb der Schweißnaht. Bei **dynamischer Beanspruchung** (insbesondere im Bereich der Dauerfestigkeit) tritt der Bruch infolge der äußeren und inneren Kerben am Nahtübergang ein. Die dadurch verursachten Spannungsspitzen können sich – im Gegensatz zur statischen Beanspruchung – nicht durch örtliches Fließen abbauen. Einbrandkerben, nicht verschweißte Wurzeln, wirken sich stark auf die dynamische Festigkeit aus, ebenso wie scharfe Kraftumlenkungen oder ungünstige Schweißnahtanordnung [2]“. Bei statischer Beanspruchung ist also immer beides nachzuprüfen: Schweißnaht und Grundwerkstoff. Bei rein dynamischer Belastung kann auf letzteres meist verzichtet werden.

Die in die Berechnung eingehende **Schweißnahtdicke a** entspricht bei Stumpnähten näherungsweise der Blechdicke t . „Bei Anschlüssen mit Kehlnähten denkt man sich die Nahtdicke a in die Anschlussebene geklappt, so dass wie bei Stumpnähten eine maßgebende, rechnerische Schweißnahtfläche $A_w = a \cdot l$ entsteht. Mit dieser verfährt man so, als handele es sich um einen reinen Anschluss mit Stumpnähten. Selbstverständlich ist das keine theoretisch einwandfreie Lösung, bringt aber eine vertretbare Vereinfachung, da die zulässigen Spannungen unter diesen Gesichtspunkten festgelegt wurden.“

A: Reine Zug-/Druckbeanspruchung

$$\sigma_{w,zul} = \frac{F}{A_w} < \sigma_{w,zul}$$



alle [2]

Bei reiner Zug- oder Druckbelastung wirkt die Kraft auf die Schweißnahtfläche und erzeugt in der Schweißnaht eine entsprechende Normalspannung.

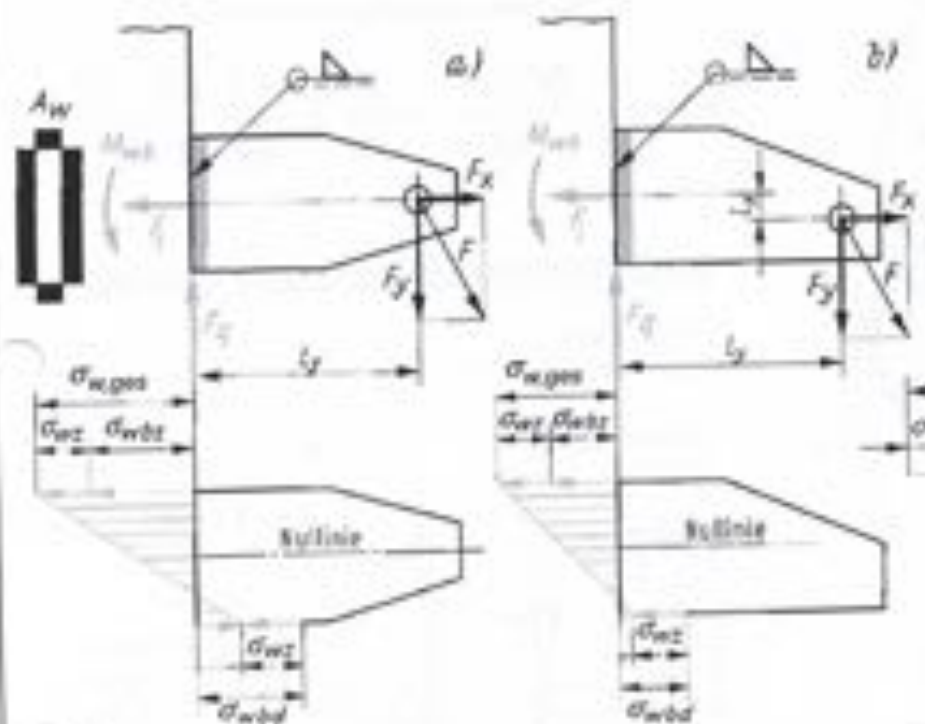
Im ersten Beispiel ist eine offene Schweißnaht gezeigt, hier kann es zu ungenügender Festigkeit am Anfang und am Ende der Schweißnaht kommen. Bei kurzen, dicken Schweißnähten sollte diese „Endkrater“ daher abgezogen werden; Kriterium hierfür: $l/a < 15$ [1].

Im zweiten Beispiel gehen die vier Ecken nicht in die Schweißnahtfläche ein, da dort keine wirkliche Anhaftung zu erwarten ist („Die durch das Herumschweißen um die Ecken noch vorhandenen Nahtstücke werden nicht in die Schweißnahtfläche einbezogen. Maßgebend sind die Längen der Nahtwurzeln! [3]“). Dieser Ansatz rechnet somit immer auf der sicheren Seite, da die Spannung etwas zu hoch angenommen wird. Gleichwohl werden in überschlägigen Rechnungen die Ecken gelegentlich mit in die Schweißnahtfläche einbezogen; da der Konstrukteur immer darauf achten wird, dass die Schweißnähte dünn und lang sind (und möglichst nicht dick und kurz, s. vorheriges Kapitel), ist der Unterschied/Fehler hierbei meist vernachlässigbar klein.

Die Schweißnaht ganz rechts zeigt ein Beispiel für einen Stumpfstoß mit Stumpfnahht (keine Kehlnahht!), daher ist mit reduzierten Durchmessern im Vergleich zur umlaufenden Kehlnahht (Beispiel: Schweißnaht zweite von rechts) zu rechnen. Dies ist beispielsweise bei reibgeschweißten Bauteilen oft der Fall.

B: Zug- /Druckbeanspruchung plus Biegung
(Querkraftschub vernachlässigt)

$$\sigma_{w,ges} = \sigma_{w,z} + \sigma_{w,b} < \sigma_{w,zul}$$



Zug $\sigma_{w,z} = \frac{F_x}{A_w}$

Biegung $\sigma_{w,b} = \frac{M_b}{W_b}$

Biegemoment

$$M_b = F_y \cdot L_y - F_x \cdot L_z$$

Biege widerstandsmomente

$$W_b = \frac{H^3 \cdot B - h^3 \cdot b}{6 \cdot H} \quad (\text{Rechteck})$$

$$W_b = \frac{\pi}{32} \frac{D^4 - d^4}{D} \quad (\text{Kreis})$$

alle [3]

Biegespannung und Zug-/Druckspannung sind beide Normalspannungen, gehen in die gleiche Richtung und dürfen daher einfach addiert werden (s. ausführliche Herleitung im Skript „Technische Mechanik“). Es besteht also keine Notwendigkeit, eine Spannungshypothese auszuwählen und damit eine Vergleichsspannung zu ermitteln, sondern das Ergebnis der Addition der beiden Spannungen kann direkt mit der zulässigen Spannung verglichen werden. Zur Ermittlung von Biegemoment und Biege widerstandsmomenten gelten die bekannten, dargestellten Formeln.

C: Reine Torsionsbeanspruchung

$$\tau_{w,l} = \frac{M_t}{W_t} < \tau_{w,zul}$$

$$W_t = \frac{\pi}{16} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D} = \frac{\pi}{16} \cdot \frac{(d + 2 \cdot a)^4 - d^4}{(d + 2 \cdot a)}$$

Torsions-Widerstandsmoment W_t , allgemein

Hohlzylinder
(Vollzylinder $d = 0$)

$$W_t = \frac{\pi}{16} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D}$$

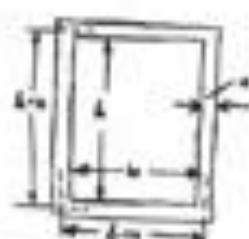
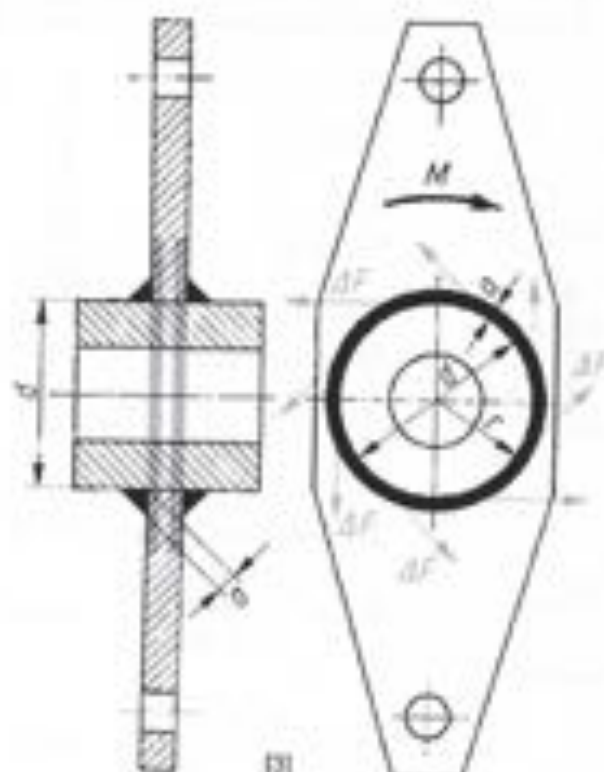
Dünnwandiges
Rechteck

$$W_t = 2 \cdot A_m \cdot s_{min}$$

$$A_m = (h + a) \cdot (b + a)$$

$$s_{min} = a$$

A_m = mittlere
umschloss.
Fläche



Torsionsspannungen sind ihrem Verlauf nach in den Randfasern maximal, ähnlich wie Biegespannungen, so dass auf Torsion beanspruchte Bauteile häufig geschweißt werden (die umlaufende Schweißnaht entspricht einem hohlwandigen Körper mit großem Durchmesser, an welchem die hohe Randfaserspannung große Torsionsmomente aufnehmen kann).

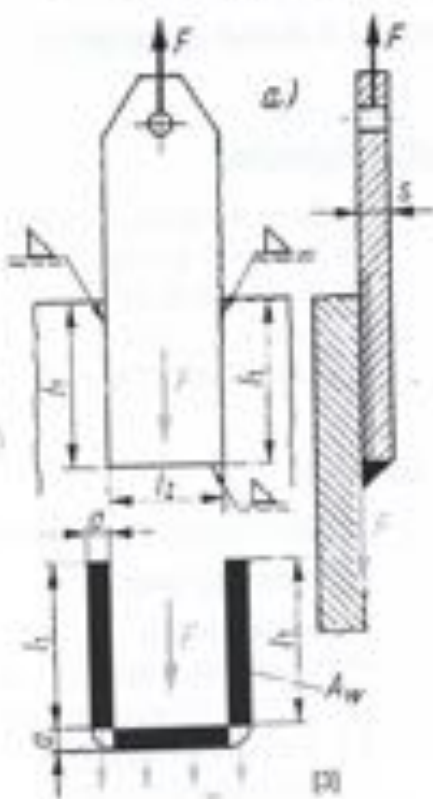
Bei der häufig realisierten Kreisform der um Wellen, Achsen, etc. umlaufenden Schweißnähte kann das benötigte Torsions-Widerstandsmoment sehr einfach aus dem Biege-Widerstandsmoment durch Verdoppelung ermittelt werden [Achtung: $W_t = 2 \cdot W_b$, gilt nur für Kreisform!].

Bei Rechteck-förmigen umlaufenden Schweißnähten kann zur Ermittlung des Torsions-Widerstandsmomentes W_t die Bredt'sche Näherungsgleichung herangezogen werden, in welche die sogenannte mittlere umschlossene Fläche A_m sowie die dünnste Stelle s_{min} , i.d.R. die Schweißnahtdicke a , eingehen (s. auch Skript „Technische Mechanik“).

D: Reine Querkraft-Schubbeanspruchung

$$\tau_{w,q} = \frac{F}{A_w} < \tau_{w,zul}$$

$$A_w = a \cdot (2 \cdot l_1 + l_2)$$

Annahmen

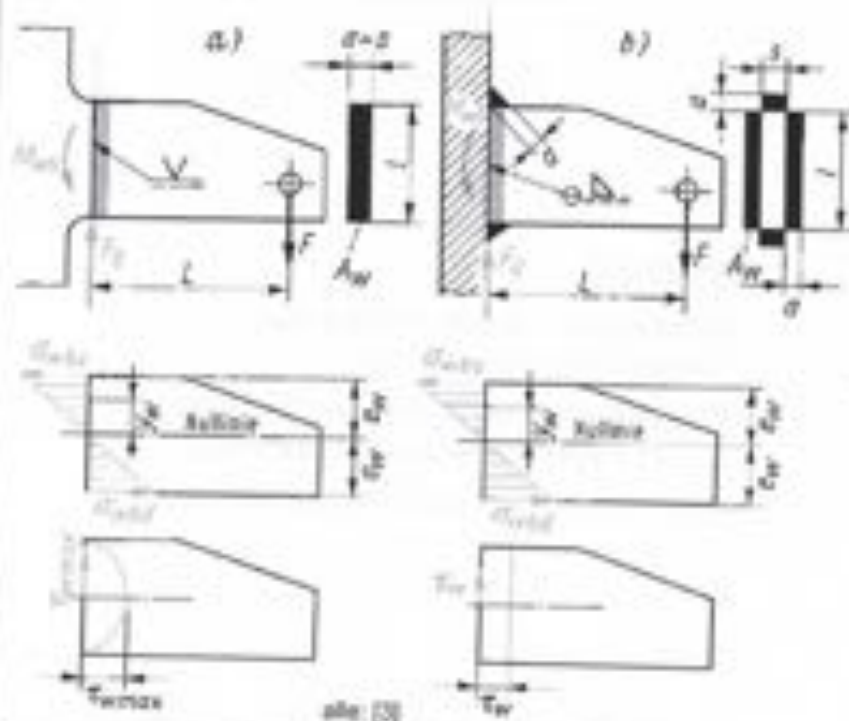
- Schubspannung gleichmäßig über Schweißnahtfläche verteilt
- Flankenkehlnähte ($l_1 \times a$) und Stirnkehlnaht ($l_2 \times a$) tragen beide anteilig gleich viel
- Kippmoment ($F \times s/2$) wird vernachlässigt

Strenggenommen tragen bei reiner Schubbeanspruchung infolge Querkraft nur die **Flankenkehlnähte**, welche parallel zur Krafrichtung liegen. Der Schubspannungsverlauf ist typischerweise parabelförmig (s. Technische Mechanik), d.h. in den Randfasern null und in der Mitte maximal. **Stirnkehlnähte** haben so gut wie keine Ausdehnung in Krafrichtung, zu der sie ja senkrecht liegen, so dass selbst ihr Maximum kaum ins Gewicht fällt.

Die häufige praktische Vorgehensweise sieht demgegenüber so aus, dass der Einfachheit halber von einer gleichmäßigen Verteilung der Schubspannung über beteiligten Nähte ausgegangen wird, d.h. Flanken- als auch Stirnkehlnähte werden gleichberechtigt herangezogen, bei beiden wird der parabelförmige Verlauf nicht berücksichtigt, sondern stattdessen mit einer mittleren Schubspannung gemäß obiger Formel gerechnet.

E: Besonderheiten bei Querkraft - Schubbeanspruchung

Zu beachten: Biegespannung σ_{wb} ist dort maximal, wo $\tau_{\text{w,q}} = 0$ und umgekehrt!



Vorgehensweise:

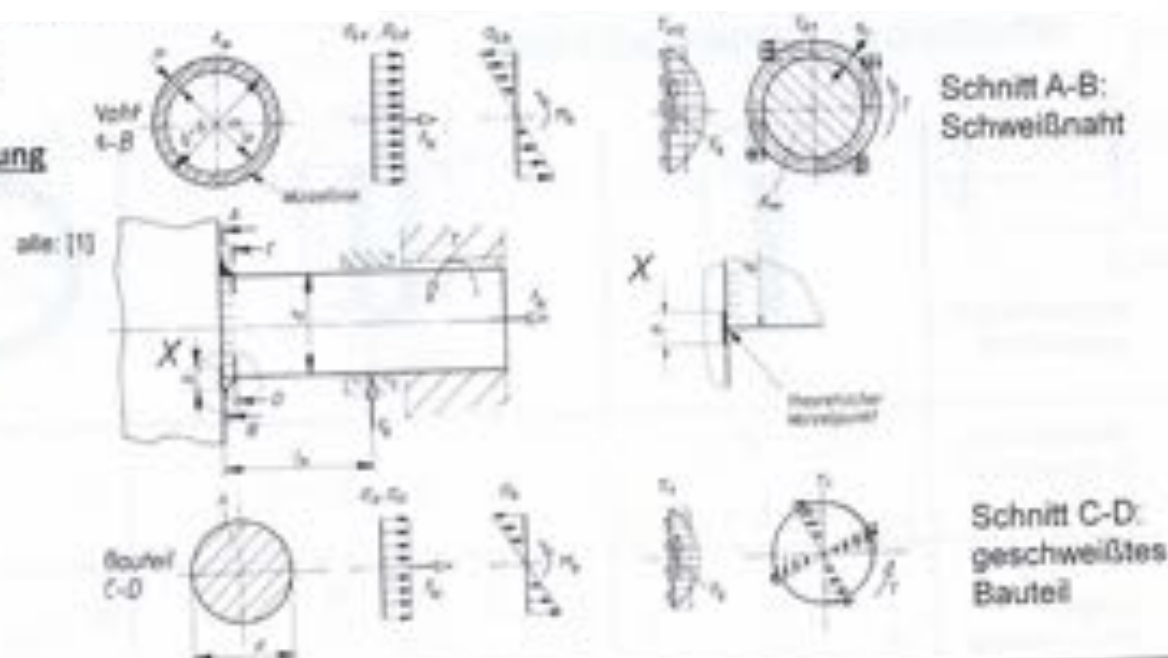
- für großen Hebelarm L , also:
 - $L > H = l + 2 \cdot a$ bzw.
 - $L > D = d + 2 \cdot a$ gilt:
 - $\sigma_{\text{wb}} \gg \tau_{\text{w,q}}$ d.h.:
 - $\tau_{\text{w,q}}$ wird vernachlässigt!
- sonst gilt:
 - Vergleichsspannung bilden
 - $\tau_{\text{w,q}}$ konstant über A_w
 - Schubsp. in den Flankenkehlnähten $2(l \times a)$ und in den Stirnkehlnähten $2(l \times s)$ werden gleichermaßen herangezogen.

„Biegespannungen und Schubspannungen aus Querkraft treten in Trägern, Hebeln, Wellen und daher auch in Schweißnähten stets gemeinsam auf. Beide Spannungen stehen senkrecht aufeinander, es ist also eine Vergleichsspannung zu bilden. Da σ_{wb} am Rande den Größtwert erreicht, dort aber $\tau_{\text{w,q}}$ Null ist, muss die Vergleichsspannung in verschiedenen Höhen ermittelt werden [1].“

Häufig ist die Größe der Schubspannung $\tau_{\text{w,q}}$ im Vergleich zur gleichzeitig auftretenden Biegespannung σ_{wb} so klein, dass $\tau_{\text{w,q}}$ mit nur geringem Fehler vernachlässigt werden kann. Dies ist immer dann die Vorgehensweise, wenn der Hebelarm L größer ist als die biegewirksame Höhe der Schweißnaht (also H bei rechteckiger bzw. βD bei kreisförmiger, umlaufender Schweißnaht).

Ist dies nicht der Fall, so ist bei Berücksichtigung der Schubspannung eine Vergleichsspannung zu bilden. In die Berechnung der Schubspannung fließen dann sowohl die Flankenkehlnähte (parallel zur Krafrichtung), als auch die Stirnkehlnähte (senkrecht zur Krafrichtung) ein, obwohl letztere keine nennenswerten Schubspannungen aufbauen können [1], [3]. Der strenggenommen parabelförmige Verlauf der Schubspannung in den Flankenähten wird nicht berücksichtigt, stattdessen wird eine gleichmäßige, über der gesamten Schweißquerschnittsfläche A_w (incl. der Stirnähte) als konstant angesehene Schubspannung angenommen.

F: Zusammen- gesetzte Beanspruchung



Vergleichsspannung
Schweißnaht

$$\sigma_{w,y} = \sqrt{(\sigma_{w,zul} + \sigma_{w,b})^2 + 2 \cdot (\tau_{w,q} + \tau_{w,l})^2} < \sigma_{w,zul}$$

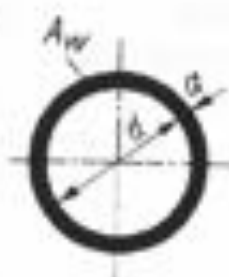
Vergleichsspannung
Bauteil (Grundwerkstoff)

$$\sigma_y = \sqrt{(\sigma_{zul} + \sigma_b)^2 + 3 \cdot (\tau_q + \tau_l)^2} < \sigma_{zul}$$

„Die komplizierten Beanspruchungsverhältnisse in Schweißnähten können nur mit einem in der Praxis oft nicht vertretbarem Aufwand rechnerisch erfasst werden. Man rechnet daher nur mit mittleren Spannungen und berücksichtigt die ungleichmäßige Spannungsverteilung durch niedrigere zulässige Spannungen. Eigenspannungen und Spannungsspitzen dürfen bei schweißgerechter Ausführung unberücksichtigt bleiben. Aus den Einzelspannungen ist eine Vergleichsspannung zu bilden. Für Schweißnähte ist grundsätzlich nachzuweisen, dass der Vergleichswert der vorhandenen Spannungen $\sigma_{w,y}$ die zulässige Schweißnahtspannung $\sigma_{w,zul}$ (Grenzschnitzspannung) nicht überschreitet [1].“

Vollständig ist die Festigkeitsberechnung erst, wenn auch für den eigentlichen Grundwerkstoff des Bauteils (also für den Bereich ausserhalb der Schweißnaht) der Nachweis ausreichender Festigkeit erbracht ist. Dies geschieht ebenfalls mit Bildung einer Vergleichsspannung, in den meisten Fällen nach der Gestaltänderungsenergiehypothese.

Hilfsgrößen zur Spannungsermittlung

Schweißnaht-
querschnittMaßgebliche
Schweißnaht-
Fläche

$$A_w = a \cdot l$$

$$[A_w = a \cdot (l - 2 \cdot a)]$$

$$A_w = 2 \cdot a \cdot (l_1 + l_2)$$

$$A_w = \pi \cdot (d + a) \cdot a$$

Biege-
Widerstands-
moment

$$W_b = \frac{B \cdot H^2}{6} = \frac{a \cdot l^2}{6}$$

$$W_b = \frac{H^2 \cdot B - h^3 \cdot b}{6 \cdot H}$$

$$= \frac{(l + 2 \cdot a)^2 \cdot (s + 2 \cdot a) - l^2 \cdot s}{6 \cdot (l + 2 \cdot a)}$$

$$W_b = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D}$$

$$= \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(d + 2 \cdot a)^4 - d^4}{(d + 2 \cdot a)}$$

Torsions-
Widerstands-
moment

$$W_t = 2 \cdot A_w \cdot s_{\text{max}}$$

$$= 2 \cdot (l + a) \cdot (s + a) \cdot a$$

$$W_t = 2 \cdot W_b$$

Auf dieser Seite sind für typische Schweißnähte die zugehörigen Flächen bzw. Widerstandsmomente gegen Biegung und Torsion nochmals zusammengefasst. Bei komplexeren Schweißnahtgeometrien sei an dieser Stelle nochmals auf die Vorlesung und das Skript „Technische Mechanik“ verwiesen, wo dies ausführlich hergeleitet und detailliert beschrieben ist.

[2] Schweißnähte						
Nahtart	Spannungsart	Bewertungsgruppe	Lastfall			
			statisch		dynamisch	
			$\sigma_{w,zst}$	$\sigma_{w,zd}$	$\sigma_{w,dst}$	$\sigma_{w,dd}$
			S235 (St 37)	S355 (St 52)	S235 (St 37)	S355 (St 52)
Stumpfnaht mit Gegenläufer	Zug, Druck, Biegung	B	160	220	55	65
		C	130	175	45	50
		D	110	155	40	45
	Schub	B	100	140	35	40
	C	80	100	30	32	
	D	70	100	25	28	
Stumpfnaht ohne Gegenläufer	Zug, Druck, Biegung	B	140	160	45	50
		C	110	145	35	40
		D	100	125	32	35
	Schub	B	90	110	30	35
	C	70	85	25	30	
	D	60	75	25	25	
Flackkehlnaht	jele	B	80	110	35	35
		C	70	85	25	30
		D	60	75	25	25
Halskehlnaht	jele	B	120	150	40	45
		C	95	120	30	35
		D	85	100	25	30
Doppel-Flackkehlnaht und umlaufende Kehlnaht	jele	B	140	190	50	55
		C	110	150	40	45
		D	100	130	35	40

Qualitativer Festigkeitsnachweis

➤ statisch

$$\sigma_{w,z} \leq \sigma_{w,zst}$$

➤ dynamisch

$$\sigma_{w,d} \leq \sigma_{w,dd}$$

Quantitative Sicherheitsrechnung

➤ statisch (z.B. Fließen)

$$S_F = \frac{R_{m0,2}}{\sigma_{w,z}} \geq S_{F,min} = 1,5$$

➤ dynamisch

$$S_D = \frac{\sigma_A}{\sigma_{w,d}} \geq S_{D,min} = 2,5$$

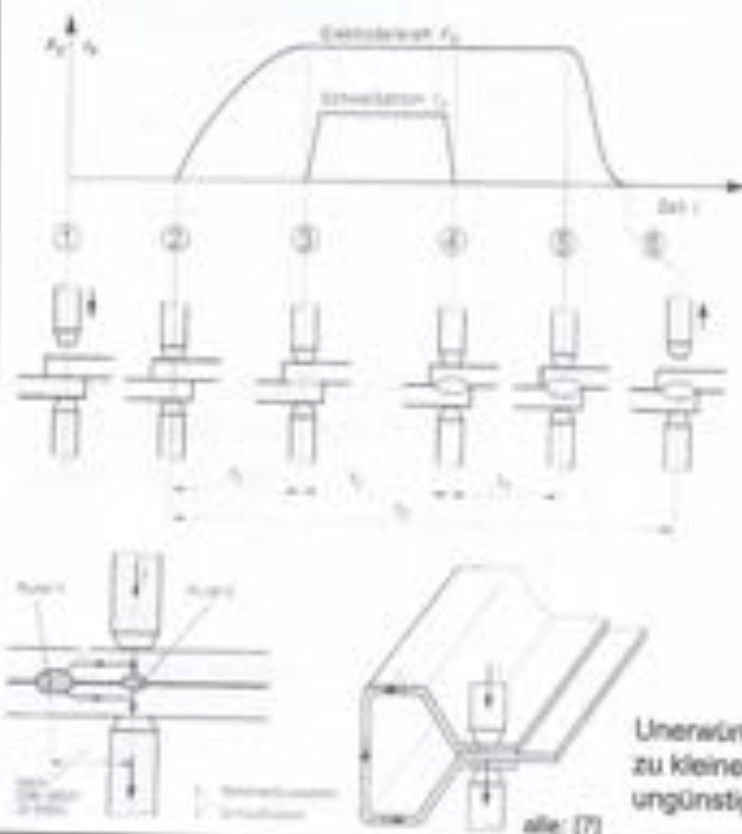
„Für dynamisch beanspruchte Schweißteile im Maschinenbau gibt es keine Berechnungsvorschrift [1]“. Sie [1] Aus diesem Grund gibt es eine Vielzahl von Richtlinien, jede Branche (Stahlbau, Kranbau, Dampfkesselbau, Schiffbau, Maschinenbau, Luftfahrtindustrie, Karosseriebau, etc.) hat ihre eigenen Ausführungsanweisungen. Auch in der Fachliteratur findet sich keine einheitliche Vorgehensweise.

Daher wird hier folgender Weg beschritten: Der Nachweis kann **qualitativ** als Festigkeitsnachweis oder **quantitativ** als Sicherheitsnachweis geführt werden, gemäß obigen Formelansätzen. Wie bei allen anderen Maschinenelementen so wird auch bei Schweißnähten ein **statischer** sowie ein **dynamischer** Nachweis geführt.

Die in der Tabelle aufgeführten **zulässigen Schweißnaht-Spannungen** enthalten bereits Sicherheiten (Faktor 1,5 (statisch) bzw. Faktor 2,5 (dynamisch); empfohlene Mindestsicherheiten nach [2] und [3]). Dabei sind der Einfluss von Nahtart, Spannungsart und Bewertungsgruppe (Schweißnahtgüte) zu beachten.

- beim dynamischen Lastfall kann die Differenzierung zwischen schwellender, wechselnder oder allgemeiner Beanspruchung näherungsweise vernachlässigt werden, da die jeweiligen zulässigen Werte $\sigma_{w,dd}$ nahezu identisch sind (wird daher auch in der Tabelle nicht gesondert aufgelistet).
- beim dynamischen Lastfall unterscheiden sich die verschiedenen Stahlwerkstoffe kaum in ihren zulässigen Spannungen, v. $\sigma_{w,dd}$ für S235 und S355. „Es gilt als gesichert, dass bei wechselnder Beanspruchung und starker Kerbwirkung die zulässigen Schweißnahtspannungen von der statischen Festigkeit weitgehend unabhängig sind. Nach IIV (Internationales Institut für Schweißtechnik) können deshalb für alle schweißgeeigneten Stahlsorten die gleichen Schwingfestigkeitswerte eingesetzt werden [1]“. D.h.: für den hier vereinfacht vorgetragenen Sicherheitsnachweis von Schweißnähten werden für alle höherfesten Stahlsorten die zulässigen Schweißnaht-Spannungen $\sigma_{w,dd}$ von S355 aus der Tabelle entnommen.

4.3.4.1 Besonderheiten beim Widerstandspunktschweißen



Charakteristika des WPS

- Überlappstoß erforderlich
- Einschränkung bzgl. Zugänglichkeit
- Größe der Schweißlinse hängt ab von Kraft, Kraftdauer, Stromstärke, Stromflussdauer

Schweißbare Werkstoffe

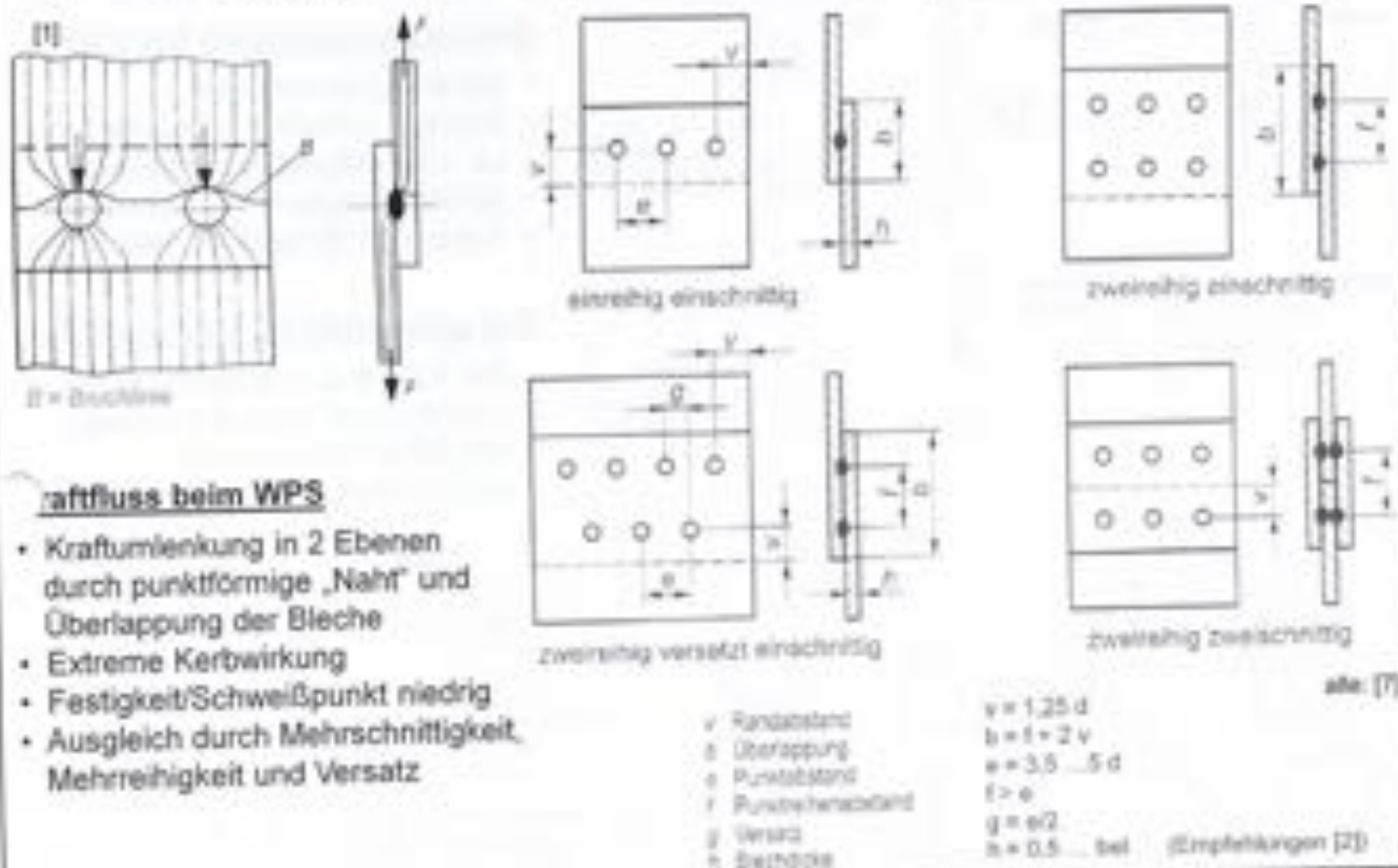
- Stähle mit C-Gehalt < 0,1%
- Leichtmetalle (Al- und Mg-Leg.)
- Cu- und Ni-Legierungen,
- Messing
- Werkstoffe mit Überzügen und Beschichtungen (verzinkte Bleche!)
- Werkstoffkombinationen möglich

„Die Werkstücke werden an den Stoßstellen erwärmt und unter Anwendung von Kraft punktförmig (genauer **linienförmig**) geschweißt. Strom und Kraft werden durch Punktschweißelektroden übertragen. Durch richtiges Abstimmen der Prozessparameter Schweißstrom, Schweißzeit und Schweißkraft wird die notwendige Schweißwärme zwischen den zu verbindenden Werkstücken erzeugt. Eine optimale Energieauslastung liegt vor, wenn der Schweißstrom groß und die Schweißkraft klein gewählt wird, um die Verlustwärme gering zu halten. Der Schweißstrom wird mit stabförmigen, meist wassergekühlten Elektroden aus legiertem Kupfer beidseitig auf die überlappt angeordneten Blechfügeteile übertragen [7].“

Viele Metalle sind punktschweißbar, auch Werkstoffkombinationen sind möglich. Ein wesentlicher Vorteil ist durch die Möglichkeit gegeben, auch Oberflächen mit Überzügen oder Beschichtungen ohne Nahtvorbereitung punktschweißen. Hauptanwendungsgebiet hierbei ist der Karosseriebau, wo überwiegend verzinkte Bleche verbaut werden. Hier sind allerdings zwingend Ausgasungsmöglichkeiten für z.B. Zink als Überzug mit niedriger Verdampfungstemperatur vorzusehen, da ansonsten die Gefahr der Perforierung des Bleches durch explosionsartige Druckentweichung besteht.

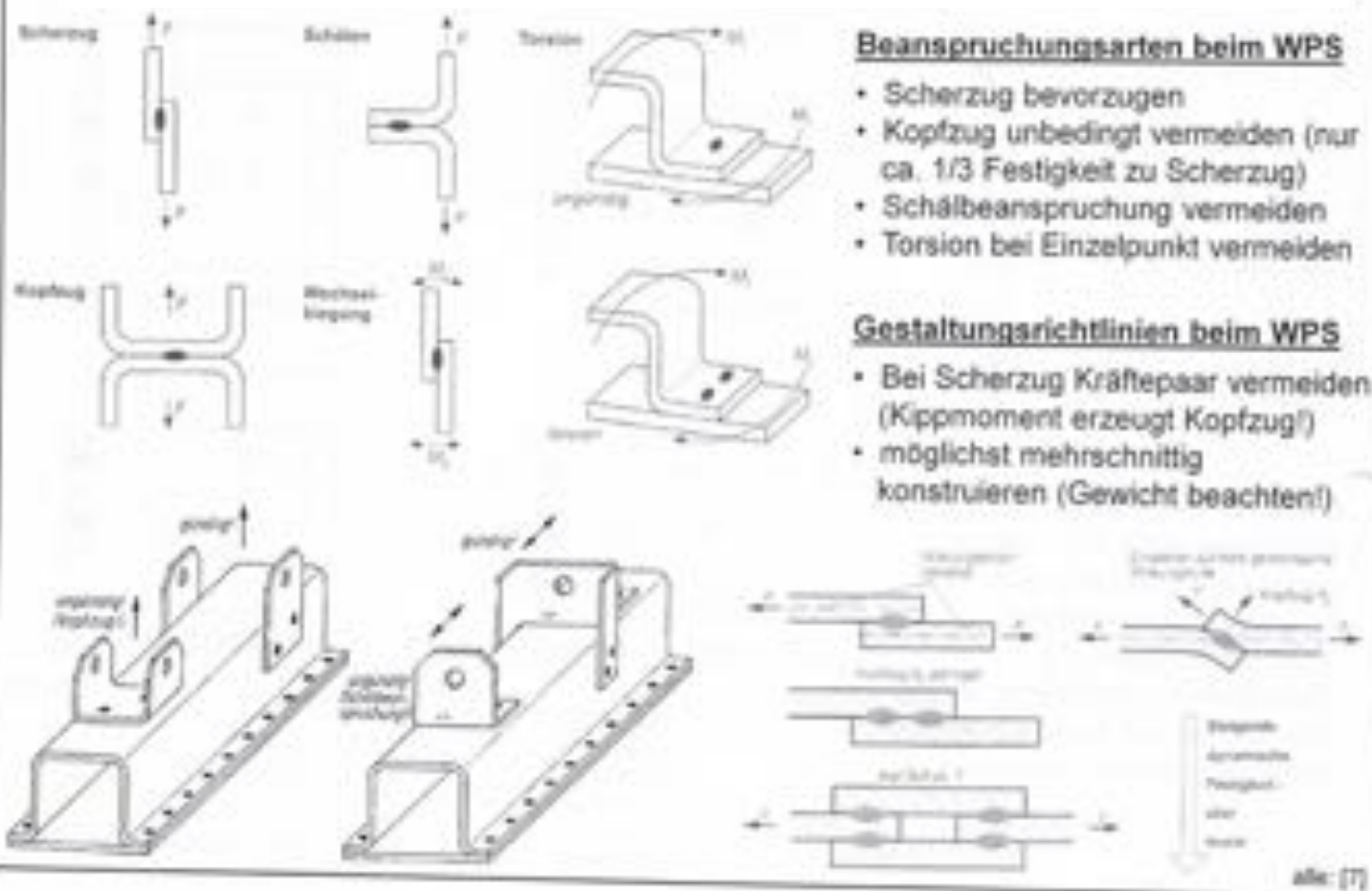
Als Nachteil ist die kaum nachprüfbare **Qualität** des einzelnen Schweißpunktes zu nennen, da dieser „versteckt“ zwischen zwei Blechen im Überlapp lokalisiert ist. Insbesondere dem gefürchteten **Nebenschluss** (also dem externen Stromabfluss durch Nebenkanal außerhalb des eigentlichen Schweißpunktes) ist nur schwer auf die Spur zu kommen, dies ist mehr oder weniger nur durch konstruktive Maßnahmen im Vorfeld zu entschärfen (z.B. über großen Punktabstand).

Das Widerstandspunktschweißen ist nicht zuletzt aufgrund des hohen Automatisierungspotenzials (i.d.R. Schweißzange am Roboter) eines der wirtschaftlichsten Schweißverfahren überhaupt.



„Am Schweißpunkt und in dessen Umgebung treten wegen der schroffen **Kraftlinienumlenkung** große Spannungsspitzen auf. Durch den unverschweißten Spalt ist die **Kerbwirkung** sehr hoch. Während dadurch die statische Tragfähigkeit kaum beeinträchtigt wird, liegt die Dauerfestigkeit sehr niedrig und kann bei Wechselbeanspruchung bis auf 10% der statischen Bauteilfestigkeit abfallen [1]“. Der einzelne Schweißpunkt weist also sehr geringe Festigkeit auf, dies wird kompensiert durch die Anzahl n der Schweißpunkte, der Schnittigkeit (mehrere Bleche im Überlapp übereinander) und die Anordnung der Schweißreihen. Empfehlungen zu Abständen und Dimensionen finden sich in der einschlägigen Literatur.

Der in der Praxis gängige **Blechedickenbereich** liegt zwischen 0,5mm und 2mm. Es ist allerdings möglich auch sehr dünne (0,1mm auf 0,1mm) sowie sehr dicke Blechpakete (20mm auf 20mm auf 20mm) mittels WPS zu verschweißen [1], [2].

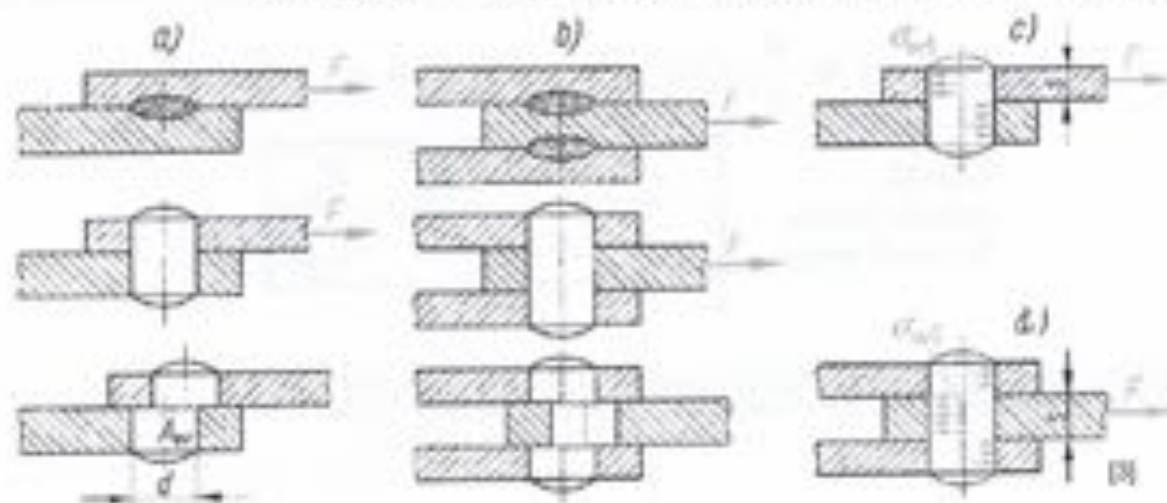


„Je nach Gestaltung der Schweißverbindung kann diese beansprucht werden durch **Scherzug, Kopfzug, Schalen und Torsion**. Punktschweißverbindungen sollen möglichst auf **Scherzug** beansprucht werden, weil bei dieser Beanspruchungsart die höchsten Kräfte je Schweißpunkt übertragen werden können. Reine Kopfzug-, Schäl- oder Torsionsbeanspruchungen sind durch konstruktive Maßnahmen zu vermeiden.

Werden einschnittige Einzelpunktverbindungen auf Zug beansprucht, so tritt in den meisten Fällen eine Verformung ein, ehe der Bruch in Form eines Ausknöpfbruchs erfolgt. Durch die plastische Verformung tritt am Schweißpunkt außer der Scher- zusätzlich eine Zugbeanspruchung auf. Es folgt eine Zerlegung der angreifenden Kraft in eine Normal- und eine Radialkomponente, die Normalkomponente führt als Kopfzug dann zum Bruch [7]. Möglichkeit der Verbesserung: mehrere Schweißpunkte hintereinander setzen oder (am besten) zweiseitig gestalten und damit das **Kippmoment** eliminieren.

Häufig läßt sich eine für die Verbindung ungünstige Beanspruchungsart durch relativ einfache konstruktive Modifikationen in eine günstigere überführen.

Berechnungsansatz: WP-Schweißpunkt entspricht Niet- oder Stiftverbindung
 → Nachzurechnen sind **Abscherung** (a, b) und **Lochleibung** (c, d)



Abscher-
spannung

$$\tau_w = \frac{F}{n \cdot m \cdot A_w} < \tau_{w,zul}$$

$$A_w = \frac{\pi}{4} \cdot d^2$$

$$d \approx 5 \text{ mm} \cdot \sqrt{s_{\min}}$$

$$\sigma_{wl} = \frac{F}{n \cdot d \cdot s_{\min}} < \sigma_{wl,zul}$$

Loch-
leibung

A_w : Schweißpunktquerschnitt;
 d : Schweißpunktdurchmesser;
 s_{\min} : kleinste Blechdicke;

n : Anzahl Schweißpunkte;
 m : Schnittigkeit;
 l : Blechbreite;

$\tau_{w,zul}$: zulässige Abscherspannung;
 $\sigma_{wl,zul}$: zulässiger Lochleibungsdruck;
 R_{wz} : Zugfestigkeit Blechwerkstoff

„Die Berechnung erfolgt im Prinzip wie bei Niet- oder Stiftverbindungen. Zur Vereinfachung stellt man sich den Schweißpunkt als einen auf Abscheren und Lochleibungsdruck beanspruchten Stift mit dem rechnerischen Durchmesser d vor. Der Schweißpunktdurchmesser richtet sich nach der kleinsten Blechdicke s_{\min} , der zu verbindenden Teile und kann nach DIN 18801 mit der oben genannten Formel überschlägig berechnet werden (den tatsächlichen Durchmesser d könnte man nur durch Zerstörung des Schweißpunktes ausmessen.) [1].“

„Wegen der Vorstellung der Schweißpunkte als Stifte wird auch eine Berechnung auf Lochleibung vorgenommen. Unter Leibung versteht man die Pressung der Lochwandung. Ihr Betrag ergibt sich, indem man den auf eine Lochleibung entfallenen Kraftanteil durch die projizierte Fläche d mal s_{\min} dividiert (s. Kap. Stifte und Bolzen). Bei verschiedenen dicken Blechen können daher unterschiedliche Leibungen auftreten und die größte darf die zulässige nicht überschreiten [3].“

Gesamtdimensionierung einer WP-geschweißten Blechverbindung
 von den Schweißpunkten übertragbare Kraft = vom Blechquerschnitt übertragbare Kraft

$$F_{\text{Schweißpunkte}} = n \cdot m \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \tau_{w,zul} = b \cdot s_{\text{min}} \cdot R_m = F_{\text{Blech}}$$

Anzahl
erforderlicher
Schweißlinien

$$n \cdot m = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{b \cdot s_{\text{min}}}{d^2} \cdot \frac{R_m}{\tau_{w,zul}}$$

Zulässige Spannungen für Punktschweißverbindungen [3]

		Maschine- und Gerüstbau (Auslieferung)								
Werkstoff-Zugfestigkeit	R_m -	294	355	440	475	475	550	550	600	
	$\tau_{w,zul}$	rotweil	60	74	90	100	100	115	115	120
		schweißend	40	50	60	65	70	80	80	85
		rotweil	20	25	30	35	35	40	40	45
einschichtig	$\sigma_{w,zul}$	rotweil	144	174	216	240	240	276	276	288
		schweißend	100	125	150	165	175	200	200	210
		rotweil	50	62	75	80	85	100	100	105
zweischichtig	$\sigma_{w,zul}$	rotweil	270	330	400	440	440	500	500	520
		schweißend	180	225	280	310	320	360	360	375
		rotweil	90	112	140	155	160	180	180	190

Zur Gesamtdimensionierung einer widerstandspunktgeschweißten Blechverbindung genügt es nicht nur die Schweißpunkte zu betrachten. Durch die hohe Kerbwirkung könnte auch eines der verschweißten Bleche im Grundwerkstoff selbst versagen. Der hier zu wählende Ansatz ist daher ein **Kräftegleichgewicht** zwischen der von den Schweißpunkten übertragbaren Kraft einerseits und der vom unverschweißten Blechquerschnitt übertragbaren Kraft andererseits. Daraus lässt sich die **Anzahl der erforderlichen Schweißlinien (n mal m)** ermitteln, welche je nach zu verschweißende Blechanzahl (Schnittigkeit) aufzuteilen ist.

„Abmessungen und Anzahl der Schweißpunkte können so gewählt werden, dass die statische Festigkeit der Verbindungsstelle ebenso hoch ist wie die der verschweißten Bauteile. Die dynamische (Dauer-) Festigkeit ist gering [2].“

In die Tabelle für **zulässige Spannungen** für Punktschweißverbindungen sind bereits mehrere Reduzierungsfaktoren, welche u.a. die Verfahrensvarianten, Parameterüberwachung, Betriebsbedingungen berücksichtigen sowie und Sicherheitsklassen für Punktschweißverbindungen eingeflossen, so erklären sich die relativ niedrigen Zahlenwerte.