

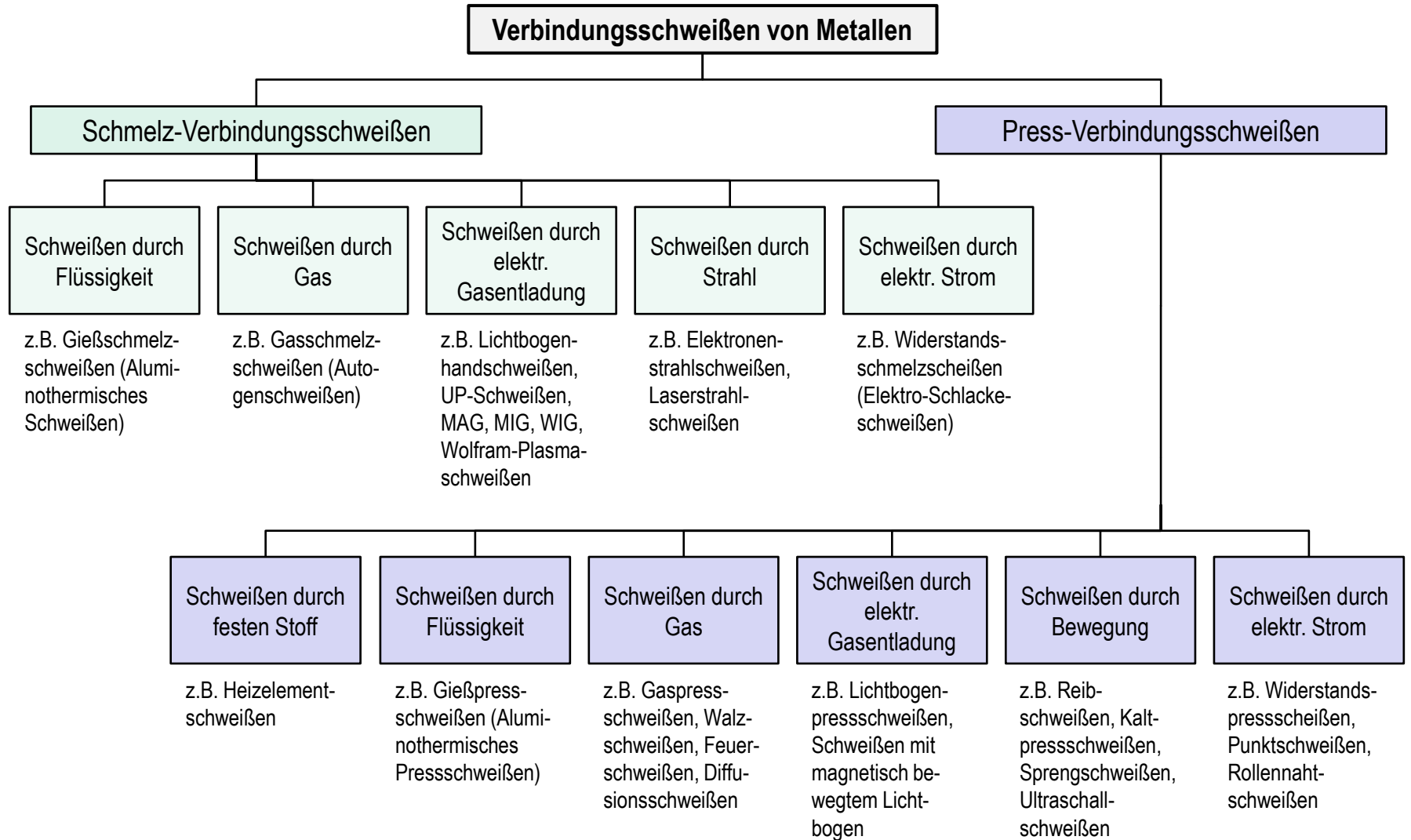
3.2.1. Einleitung

3.2.2. Vor- und Nachteile des Fügens durch Schweißen

3.2.3. Festigkeit der Schweißnaht

3.2.4. Gestaltungsgrundsätze von Schweißverbindungen

3.2.5. Auslegung von Schweißverbindungen / Berechnungsbeispiel



# Folie Für Schienenfahrzeugbau freigegebene Schweißprozesse

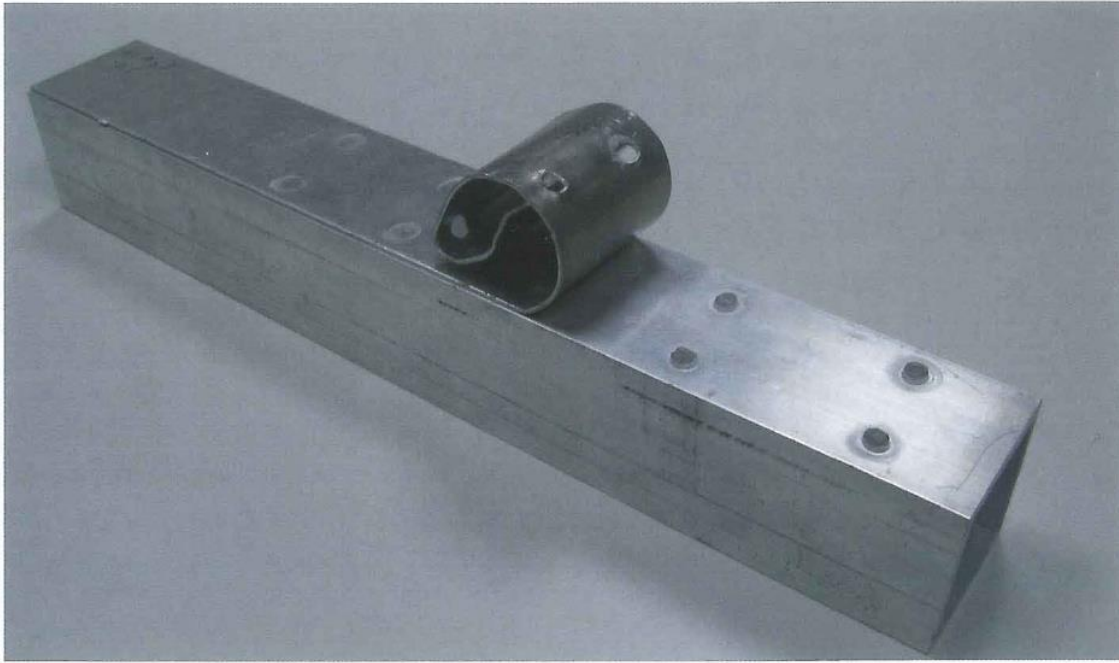
Schweißprozess	Ref.-Nr. nach EN ISO 4063:2000	Stähle	Al und Al-Legierungen
Gasschmelzschweißen	3	X	-
<b>Unterpulverschweißen</b>	12	X	-
<b>Plasmalichtbogenschweißen</b>	15	X	X
<b>Widerstandspunktschweißen</b>	21	X	X
Rollennahtschweißen	22	X	X
Buckelschweißen	23	X	X
Abbrennstumpfschweißen	24	X	X
Reibschweißen	42	X	X
Elektronenstrahlschweißen	51	X	X
<b>Laserstrahlschweißen</b>	52	X	X
Elektrogasschweißen	73	X	-
Bolzenschweißen	78	X	X
<b>Lichtbogenhandschweißen</b>	111	X	-
Schwerkraftschweißen	112	X	-
Metalllichtbogenschweißen mit Fülldrahtelektrode ohne Schutzgas	114	X	-
<b>Metall-Inertgasschweißen mit Massivdrahtelektrode</b>	131	X	X
<b>Metall-Aktivgasschweißen mit Massivdrahtelektrode</b>	135	X	-
<b>Metall-Schutzgas-Schmelzpunktschweißen</b>	131	X	X
	135	X	-
<b>Metall-Aktivgasschweißen mit Fülldrahtelektrode</b>	136	X	-
<b>Metall-Inertgasschweißen mit Fülldrahtelektrode</b>	137	X	-
<b>Wolfram-Inertgasschweißen</b>	141	X	X
Foliennahtschweißen	225	X	-
Hochfrequenzschweißen	291	X	X
Bolzenschweißen mit Ringzündung	783	X	X
Kurzzeit-Bolzenschweißen mit Hubzündung	784	X	X
Bolzenschweißen mit Hubzündung	785	X	X
<b>Rührreibschweißen (FSW)</b>		-	X
Laser-Hybrid-Schweißen		X	X

(Quelle: nach DIN EN 15085-4)



*(Quelle: Vortrag Liesenberg, 12. Tagung „Fügen und Konstruieren im Sfbau“, SLV Halle 2017)*

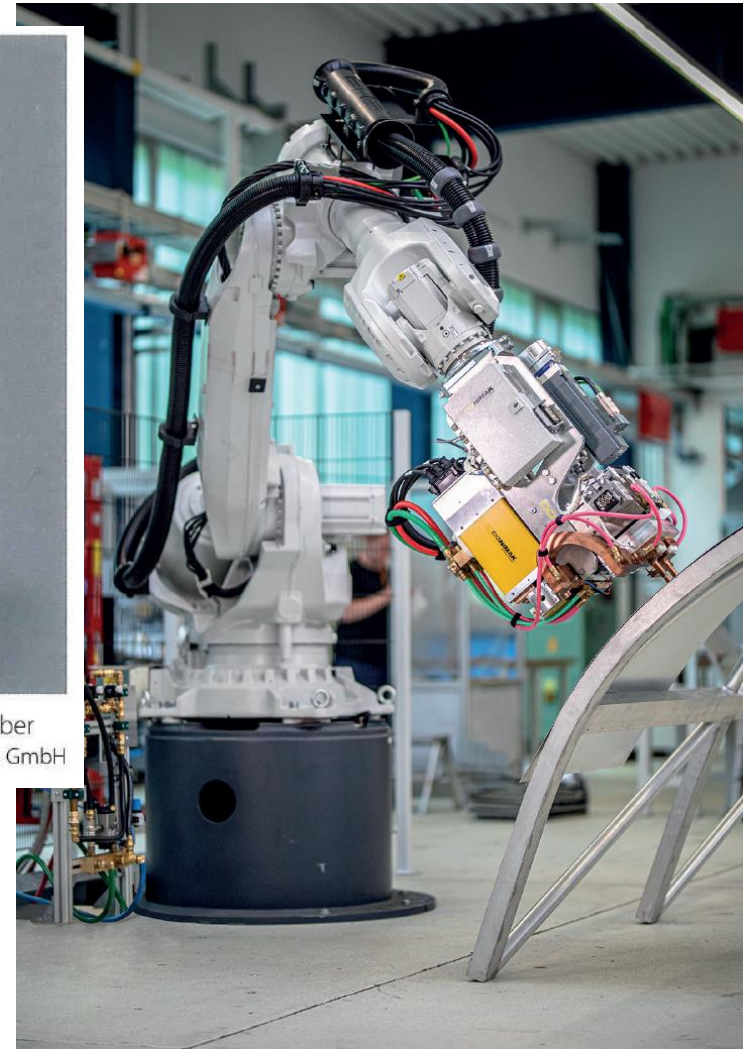
# Folie Einseitiges Widerstandspunktschweißen mit Thermoexpansionsregelung



4: Die Abschälprüfung belegt die Qualität der einseitigen Punktschweißung: Deren Festigkeit liegt über der Grundfestigkeit des Werkstoffs

Foto: SLV Halle GmbH

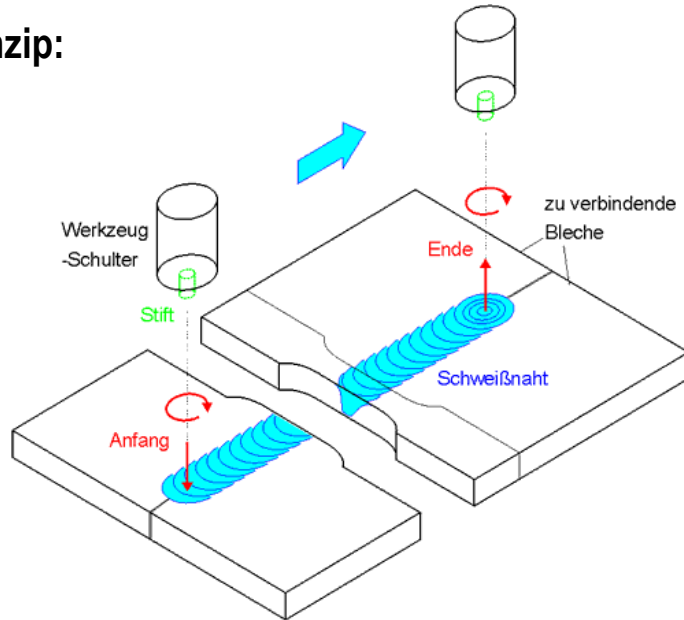
*„...Anwendungsmöglichkeiten überall dort, wo der Leichtbau eine Rolle spielt und Blech-Verbindungen wegen einer nur einseitigen Zugänglichkeit der zu verbindenden Stelle bisher mit Nieten- oder Schraubtechnik umgesetzt wurden.“*



(Quelle: Brode, Hammer, Keitel: Einseitiges Punktschweißen mit Thermoexpansionsregelung im Leichtbau, ZEVrail 145(2021)1-2;  
Mannigel: Technologischer Durchbruch beim Schweißen im Schienenfahrzeugbau, ETR (2020)6)

# Folie Reibrührschweißen (FSW – Friction Stir Welding)

## Prinzip:

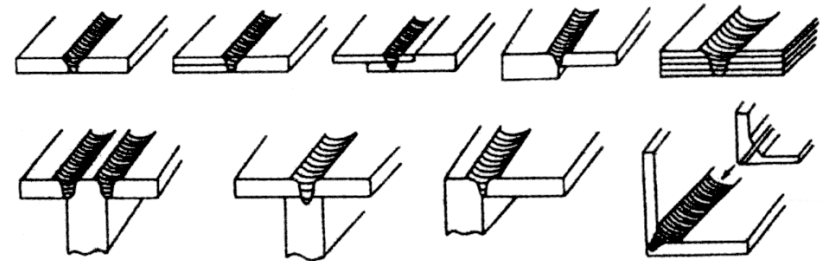


## Vorteile:

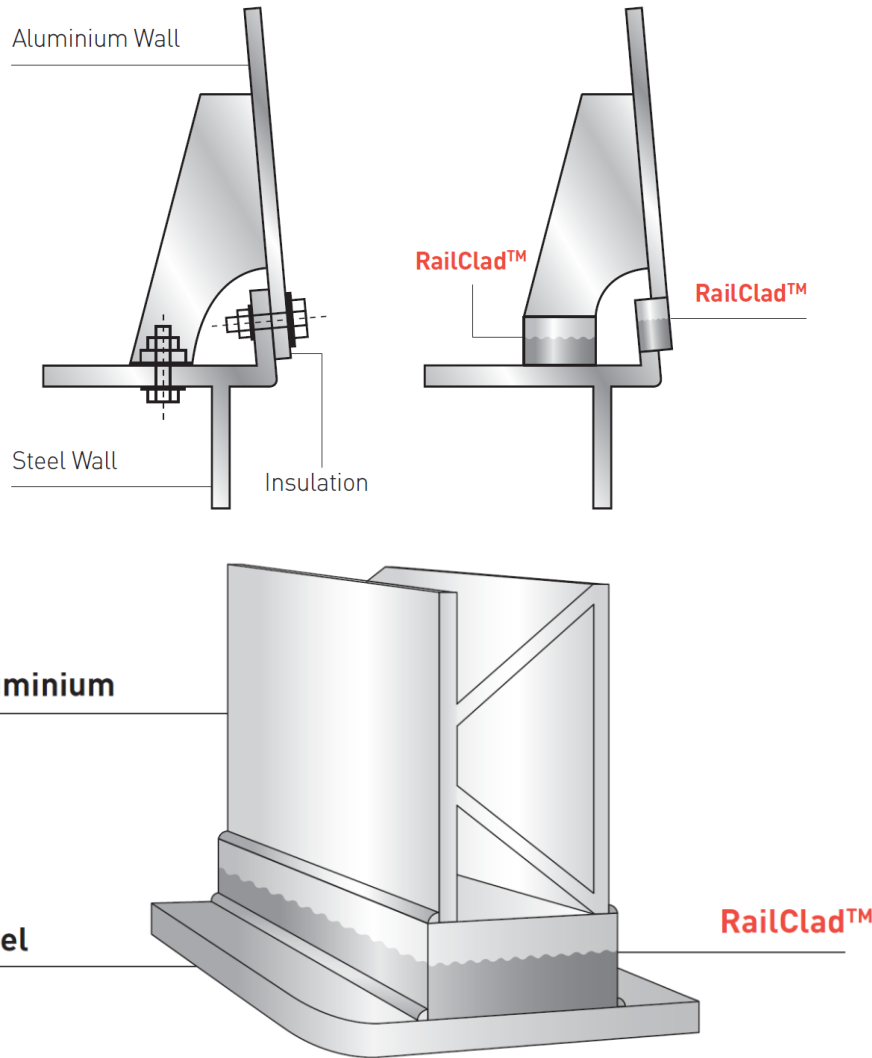
- Temperaturen unterhalb des Schmelzpunktes
- hohe statische und dynamische Nahtfestigkeiten
- keine Spritzer, kein Rauch
- geringer Energieverbrauch
- geringer Verzug
- kein Zusatzdraht
- einfache Nahtvorbereitung
- leicht automatisierbar
- keine Schweißerprüfung erforderlich

(Quelle: DLR – Institut für Werkstoff-Forschung)

## Nahtformen:



# Folie Sprengschweißen (RailClad™)

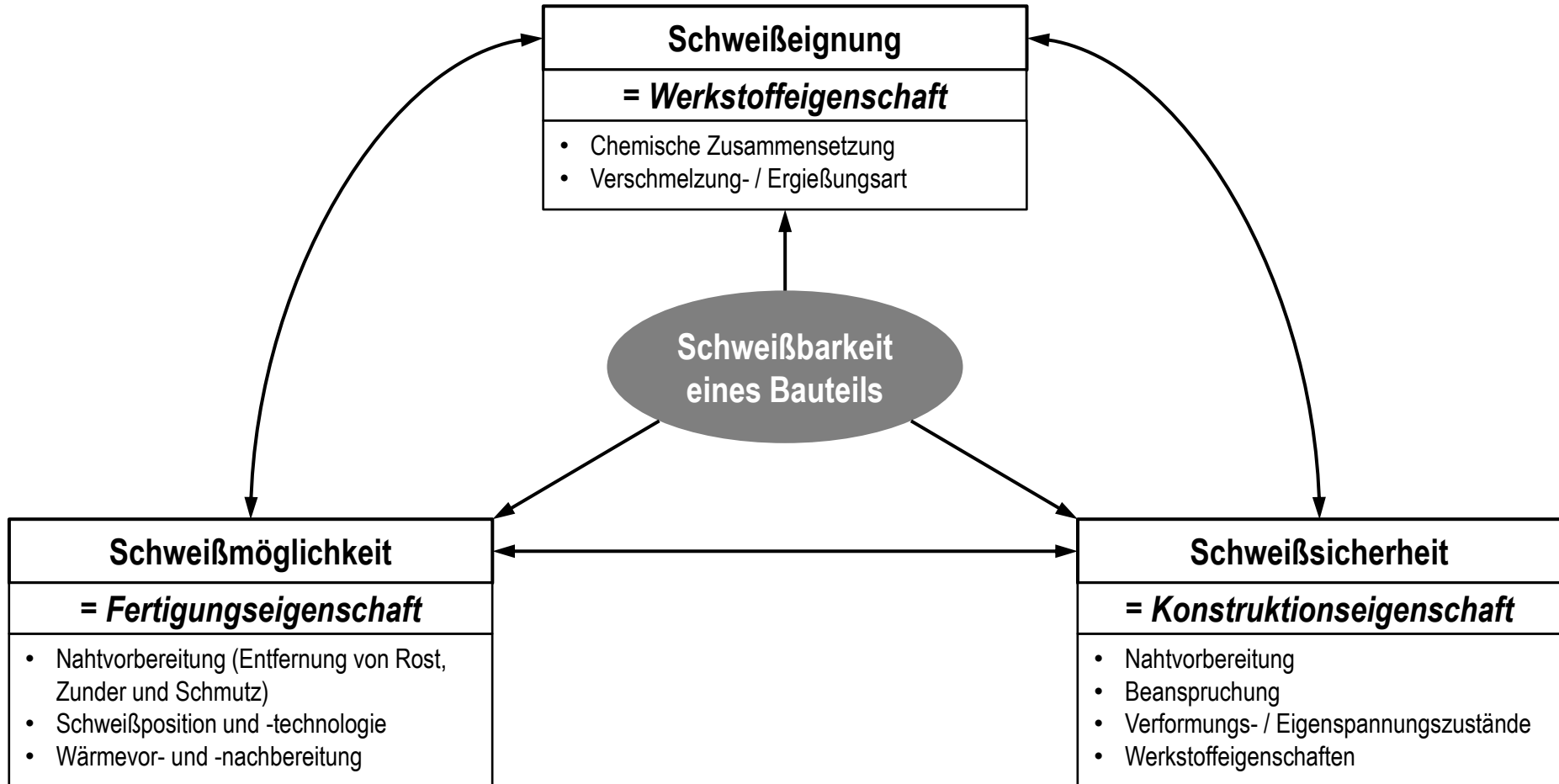


- Schweißtechnische Verbindung von Komponenten aus Aluminiumlegierung und Stahl
- Alternatives Fügeverfahren zu Schrauben und Nieten
- Hohe Festigkeit / 100% verschweißte Oberfläche
- Korrosionsschutzbarriere aus Ti, Ni, ... möglich
- Trennen mittels Sägen / Wasserstrahl möglich
- Weiterbearbeitung durch Fräsen, Drehen, Biegen



Verbindung Untergestell Fußbodenprofil (Alu) – Außenlangträger (Stahl)  
im Alstom Coradia Polyvalent (Régionalis)

(Quelle: NobelClad Produktbroschüre RailClad™, 2018-06)



# Folie Schweißgeeignete Werkstoffe – Kohlenstoffäquivalent CE

---

Empirisch ermittelte Gleichungen:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{40} + \frac{Mo}{4} + \frac{Si}{24} \quad \text{in \%} \quad \text{DS 952.01 (DB)}$$

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad \text{in \%} \quad \text{IIW, für niedriglegierte Stähle}$$

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Mo}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{V}{5} + \frac{Cu}{15} \quad \text{in \%} \quad \text{IIW, für C-Mn-Stähle}$$

$$CE = C + \frac{Si}{25} + \frac{Mn + Cu}{16} + \frac{Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{40} + \frac{V}{15} \quad \text{in \%} \quad \text{Fa. Mannesmann}$$

$$CE = C + \frac{Si + Mn + Cu + Cr + Ni + Mo + V}{20} \quad \text{in \%} \quad \text{Fa. Hoesch}$$

**CE ≈ 0,45 %**      gut schweißgeeignet, Schweißen ohne Vorwärmung

**CE ≤ 0,60 %**      bedingt schweißgeeignet, Schweißen mit Vorwärmung auf 100 – 200 °C

**CE > 0,60 %**      nicht schweißgeeignet (ggf. mit Vorwärmung auf 200 – 300 °C)

(Quelle: nach Bretschneider, Fraunhofer IWS Dresden)

## 6 Auswahl der Grundwerkstoffe und Schweißzusätze

### 6.1 Auswahl der Grundwerkstoffe

Grundwerkstoffe müssen entsprechend der Einteilung der Werkstoffgruppen ausgewählt werden.

ANMERKUNG CEN ISO/TR 15608 (CEN ISO/TR 20172) enthält ein einheitliches System zur Gruppeneinteilung von Werkstoffen für Schweißzwecke.

Für einen Grundwerkstoff ohne eine nachgewiesene Schweißseignung muss mit einem Bericht über die Qualifizierung des Schweißverfahrens (nach der jeweils anwendbaren Norm) nachgewiesen werden, dass die Eigenschaften der Schweißverbindungen, die durch Verwendung des Grundwerkstoffs erreicht werden, mit den von der Entwicklungsabteilung oder Konstruktionsbüro festgelegten Anforderungen übereinstimmen (siehe EN 15085-4:—<sup>2</sup>).

Für Komponenten mit Schweißverbindungen mit hohem oder mittlerem Sicherheitsbedürfnis dürfen nur Grundwerkstoffe mit erprobter Ermüdungsfestigkeit verwendet werden.

Die wahrscheinliche Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften in der Wärmeeinflusszone (WEZ) muss berücksichtigt werden, insbesondere beim Schweißen von Aluminiumlegierungen (Werkstoffgruppen 21 bis 26 nach CEN ISO/TR 15608) und hochfesten Stählen (z. B. mit  $ReH > 690$  MPa).

**DIN CEN ISO/TR 15608:2020-07**  
**CEN ISO/TR 15608:2017 (D)**

## **1 Anwendungsbereich**

Dieses Dokument enthält Richtlinien für ein einheitliches System für die Gruppeneinteilung von Werkstoffen, die zum Schweißen verwendet werden. Es kann auch für andere Zwecke wie Wärmebehandlung, Umformen und zerstörungsfreie Prüfung angewendet werden.

Werkstoffen für Schweißzwecke.

Für einen Grundwerkstoff ohne eine nachgewiesene Schweißseignung muss mit einem Bericht über die Qualifizierung des Schweißverfahrens (nach der jeweils anwendbaren Norm) nachgewiesen werden, dass die Eigenschaften der Schweißverbindungen, die durch Verwendung des Grundwerkstoffs erreicht werden, mit den von der Entwicklungsabteilung oder Konstruktionsbüro festgelegten Anforderungen übereinstimmen (siehe EN 15085-4:—<sup>2</sup>).

**Für Komponenten mit Schweißverbindungen mit hohem oder mittlerem Sicherheitsbedürfnis dürfen nur Grundwerkstoffe mit erprobter Ermüdungsfestigkeit verwendet werden.**

Die wahrscheinliche Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften in der Wärmeeinflusszone (WEZ) muss berücksichtigt werden, insbesondere beim Schweißen von Aluminiumlegierungen (Werkstoffgruppen 21 bis 26 nach CEN ISO/TR 15608) und hochfesten Stählen (z. B. mit  $ReH > 690$  MPa).

**DIN CEN ISO/TR 15608:2020-07  
CEN ISO/TR 15608:2017 (D)**

**DIN CEN ISO/TR 20172:2022-12  
CEN ISO/TR 20172:2021 (D)**

**Tabelle 1 (fortgesetzt)**

Bezeichnung		Gruppe	Bezugsnorm(en)
Name	Nummer		
S235J0	1.0114	1.1	EN 10025-2
S235J0W	1.8958	1.4	EN 10025-5
S235J2G3	1.0116	1.1	EN 10250-2, EN 10025-2
S235J2G3C	1.0118	1.1	EN 10025-2
S235J2G4	1.0117	1.1	EN 10025-2
X2CrNi12	1.4003	7.1	EN 10088-1, EN 10296-2
X10CrNi18-8	1.4310	8.1	EN 10088-1

# Folie Schweißgeeignete Werkstoffe nach DIN 6700-6 (zurückgezogen)

## Anhang C (informativ)

### Werkstoffe mit nachgewiesener Schweißeignung

Tabelle C.1: Gruppeneinteilung nach DIN EN 288-3 — Stähle

Gruppeneinteilung nach DIN EN 288-3 Nr	Beschreibung	Bezeichnung nach	
		DIN-Normen	DIN-EN-Normen
1.1	C-Mn-Stähle mit $R_e \leq 355 \text{ N/mm}^2$ innerhalb der Analysengrenzen: $C \leq 0,24\%$ , $Si \leq 0,55\%$ , $Mn \leq 1,6\%$ , $Mo \leq 0,65\%$ , $P \leq 0,045\%$ , $S \leq 0,045\%$ , sonstige insges. $\leq 0,8\%$ , sonstige einzeln $\leq 0,3\%$	St37-2 bis St52-3 DIN 17100 StE 255 bis StE 355 DIN 17102 St 12 bis St 14 DIN 1623-1 St 37.4 bis St 52.4 DIN 1628 GS 38 bis GS 52 DIN 1681 GS 16Mn5, GS 20Mn5 DIN 17182 HI bis 15Mo3 DIN 17155 St 35.8 bis 19Mn5 DIN 17175 C 22 DIN 17200	S235JR bis S355J2G3 DIN EN 10025 S275N bis S355N DIN EN 10113 DC01 bis DC04 DIN EN 10130 C22 DIN EN 10083 P235GH bis 16Mo3 DIN EN 10028
1.2	C-Mn-Stähle mit $R_e \leq 355 \text{ N/mm}^2$ innerhalb der Analysengrenzen: $C > 0,24\%$ , $Si \leq 0,55\%$ , $Mn \leq 1,6\%$ , $Mo \leq 0,65\%$ , $P \leq 0,045\%$ , $S \leq 0,045\%$ , sonstige insges. $\leq 0,8\%$ , sonstige einzeln $\leq 0,3\%$	St 50 bis St 70 DIN 17100 C 25 bis C 60 DIN 17200 WTSt 37-2 bis WTSt 52-3 nach SEW 087	E 295 bis E 360 DIN EN 10025 C 25 bis C 60 DIN EN 10083 S 235JOW bis S 355J2G1W DIN EN 10155
1.3	Mn-Hartstahl/Gruppe 1	—	X 120Mn12
1.4	Gusseisen	GG 10 bis GG 35 DIN 1691 GTW-35-04 bis GTW-45-07 DIN 1692 GTS-35-10 bis GTS-70-02 DIN 1692 GGG 40 bis GGG 70 DIN 1693	GJL-100 bis GJL-500 DIN EN 1561 GJMW-350-4 bis GJMW-450-7 DIN EN 1562 GJMB-350-10 bis GJMB-800-1 DIN EN 1562 GJS-400-15U bis GJS-700-2U DIN EN 1563
2	Feinkornbaustähle mit $R_e > 355 \text{ N/mm}^2$ bis $R_e \leq 500 \text{ N/mm}^2$	StE 380 bis StE 460 DIN 17102 Fe 500 V Euronorm 113	S 420 N bis S 460 N DIN EN 10113 S 460 Q bis S 500 Q DIN EN 10137
3	Vergütete Feinkornbaustähle mit $R_e > 500 \text{ N/mm}^2$	Fe 550 V bis Fe 690 V Euronorm 113	S 550 Q bis S 690 Q DIN EN 10137
4	Stähle mit $Cr \leq 0,6\%$ , $Mo \leq 0,5\%$ , $V \leq 0,25\%$	—	—
5	Stähle mit $Cr \leq 9\%$ , $Mo \leq 1,2\%$	z. B. 13CrMo 44 DIN 17155	z. B. 14CrMo 4-5 DIN EN 10028
6	Stähle mit $Cr \leq 12\%$ , $Mo \leq 1\%$ , $V \leq 0,5\%$	X-20 CrMo V 121 DIN 17175 GS-17 CrMo 55 DIN 17245	—

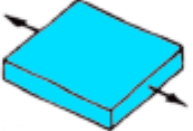
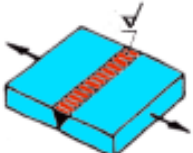
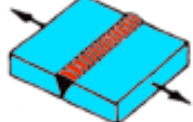
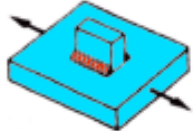
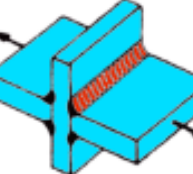
Tabelle C.1 (abgeschlossen)

Gruppeneinteilung nach DIN EN 288-3 Nr	Beschreibung	Bezeichnung nach	
		DIN-Normen	DIN-EN-Normen
7	Stähle mit $Ni \leq 9\%$	—	—
8	Ferritische oder martensitische nichtrostende Stähle mit $Cr = 12\%$ bis $Cr = 20\%$	X 6CrTi 12 (1.4512) X 2Cr 11 (1.4003) X 5CrNiMoTi 15 2 (1.4589) DIN 5512-3	X 2CrTi 12 (1.4512) X 2CrNi 2 (1.4003) DIN EN 10088
9	Austenitische nichtrostende Stähle sowie die entsprechenden Stahlgussorten	X 5CrNi 18 10 (1.4301) X 6CrNiTi 18 10 (1.4541) X 5CrNiMo 17 12 2 (1.4401) X 6CrNiMoTi 17 12 2 (1.4571) DIN 5512-3 und die entsprechenden Stahlgussorten nach DIN 17445	X 5CrNi 8-7 (1.4301) X 6CrNiTi 18-10 (1.4541) X 5CrNiMo 17-12-2 (1.4401) X 6CrNiMoTi 17-12-2 (1.4571) DIN EN 10088 und die entsprechenden Stahlgussorten

Tabelle C.2: Gruppeneinteilung nach DIN EN 288-4 — Aluminium und Aluminiumlegierungen

Gruppeneinteilung nach DIN EN 288-4 Nr	Beschreibung	Bezeichnung nach	
		DIN 1725-1 (Knetlegierungen) DIN 1725-2 (Gusslegierungen)	DIN EN 573
21	Reinaluminium mit $\leq 1\%$ Verunreinigungen oder Legierungsgehalt	Al 99,98 Al 99,8 Al 99,5 Al 99	EN AW-Al 99,98 (EN AW-1098) EN AW-Al 99,8(A) (EN AW-1080A) EN AW-Al 99,5 (EN AW-1050A) EN AW-Al 99,0 (EN AW-1200)
22.3	Nichtaushärtbare AlMg-Legierungen mit $1,5\% < Mg \leq 3,5\%$	AlMg 2,7 AlMg 2Mn 0,8 AlMg 3	EN AW-AlMg 2Mn 0,8 (EN AW-5049) EN AW-AlMg 2,5 (EN AW-5052) EN AW-AlMg 3 (EN AW-5754)
22.4	Nichtaushärtbare AlMg-Legierungen mit $Mg > 3,5\%$	AlMg 4,5Mn AlMg 5	EN AW-Mg 4,5Mn 0,7 (EN AW-5083) EN AW-AlMg 5 (EN AW-5019)
23.1	Aushärtbare AlMgSi-Legierungen	AlMgSi 0,5 AlMgSi 0,5Mn AlMgSi 0,7 AlMgSi 1	EN AW-AlMgSi (EN AW-6060) EN AW-AlSiMg(A) (EN AW-6005A) EN AW-AlSi1MgMn (EN AW-6082)
23.2	Aushärtbare AlZnMg-Legierungen	AlZn 4,5Mg 1	EN AW-AlZn 4,5Mg 1 (EN AW-7020)
24.1	Nichtaushärtbare AlSi-Gusslegierungen mit $Cu \leq 1\%$ und $5\% < Si \leq 15\%$	G-AlSi 12, GK-AlSi 12	EN AC-AlSi 12 (EN AC-44200)
24.2	Aushärtbare AlSiMg-Gusslegierungen mit $Cu \leq 1\%$ , $5\% < Si \leq 15\%$ und $0,1\% < Mg \leq 0,8\%$	G-AlSi 7Mg wa, GK-AlSi 7Mg wa G-AlSi 9Mg wa, GK-AlSi 9Mg wa G-AlSi 10Mg wa, GK-AlSi 10Mg wa	EN AC-AlSi 7Mg (EN AC-42000) EN AC-AlSi 9Mg (EN AC-43300) EN AC-AlSi 10Mg (EN AC-43400)
26	Aushärtbare AlCu-Gusslegierungen mit $2\% < Cu \leq 6\%$	G-AlCu 4Ti wa, GK-AlCu 4Ti wa	EN AC-AlCu 4Ti (EN AC-21100)

# Folie Einfluss des Werkstoffs (Stahl)

		$R_e$	$\sigma_w$ in MPa	$\sigma_{Sch}$
	S235 S355	240 360	140 160	240 290
	S235 S355	240 360	130 140	230 250
	S235 S355	240 360	95 95	160 160
	S235 S355	240 360	45 45	85 85
	GW ( $\sigma$ ): S235 S355 Naht ( $\tau$ ): S235 S355	240 360 >140 360	45 45 35 35	85 85 65 65

↺ ←  
1,50 / 1,14 / 1,21

↺ ←  
1,50 / 1,00 / 1,00

(Quelle: nach Hübner, Freiberg)

# Folie Drehgestell-Leichtbaurahmen



Probetrieb unter Versuchsfahrzeug

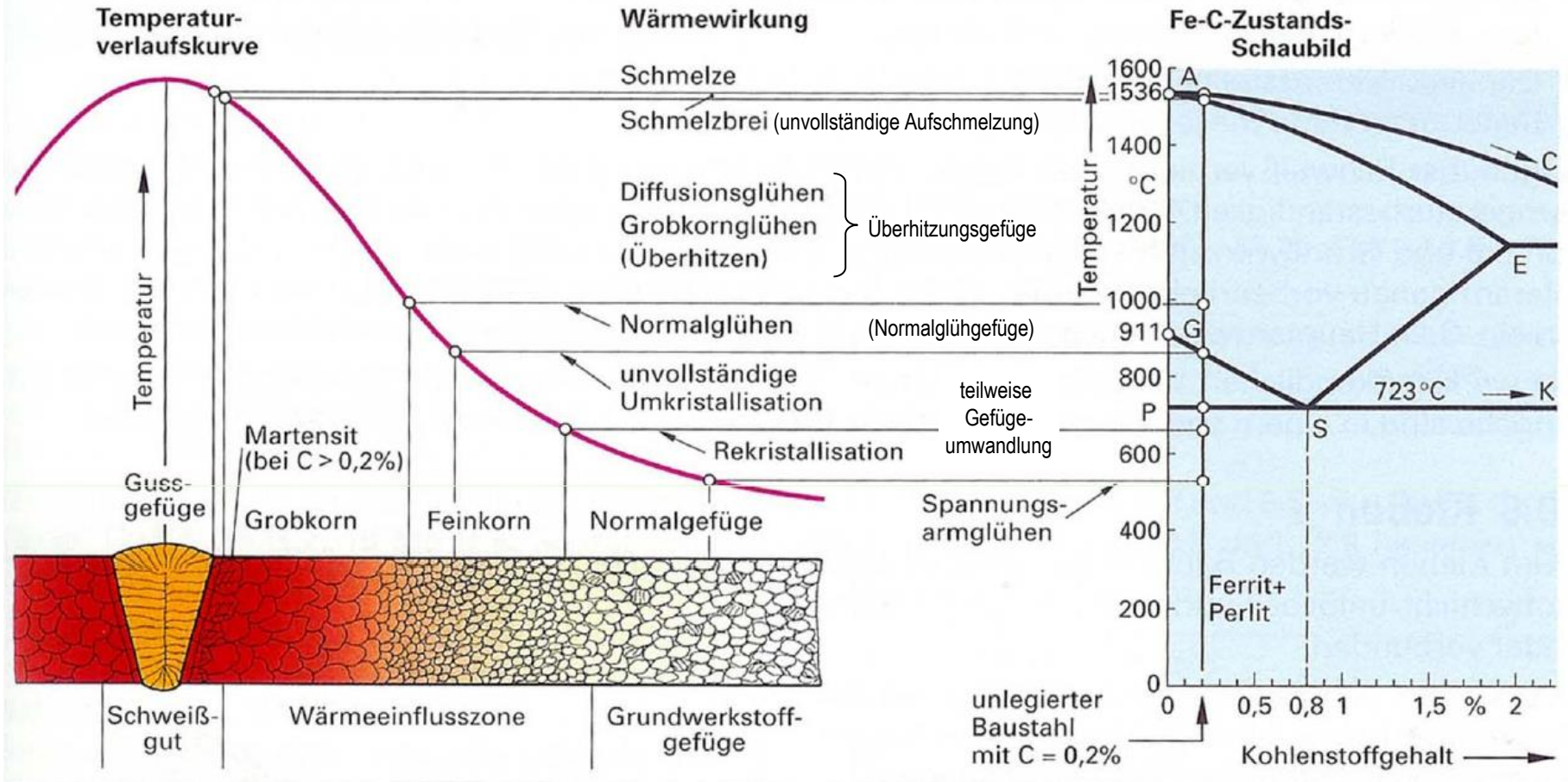
- höherfester Werkstoff **S700MC**
  - offene Querschnitte
  - reduzierte Blechdicken
- } 45 % Massereduktion



Vorrichtung für Langträger-Herstellung

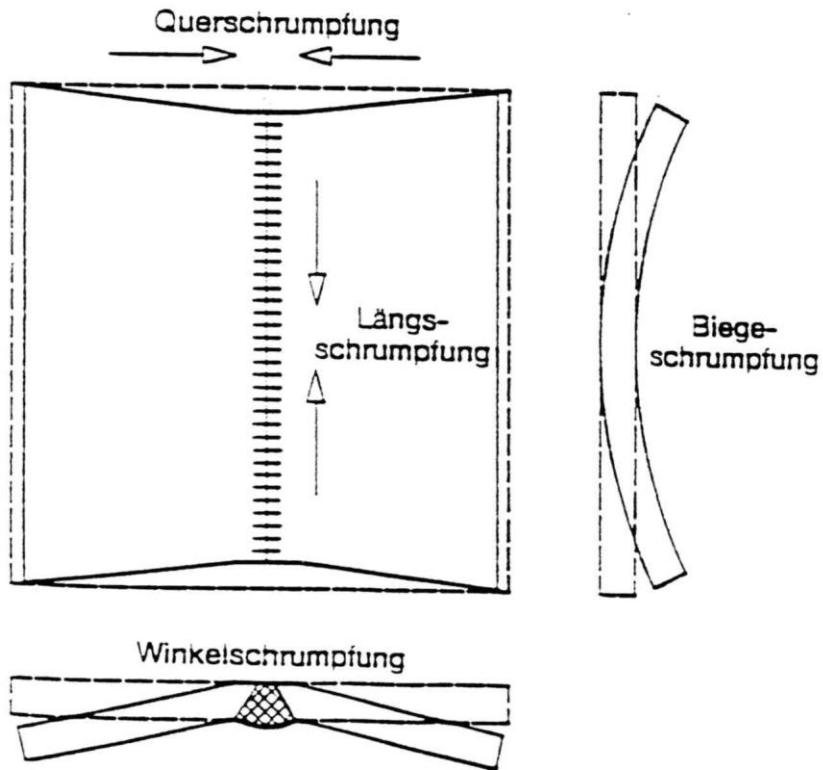
(Quelle: Moshhammer, Seifried: Innovativer Leichtbaurahmen ..., Vortrag 13. Fachtagung „Fügen und Konstruieren im Schienenfahrzeugbau“, 2019-05)

# Folie Gefügeveränderungen beim Schmelzschweißen von Baustahl



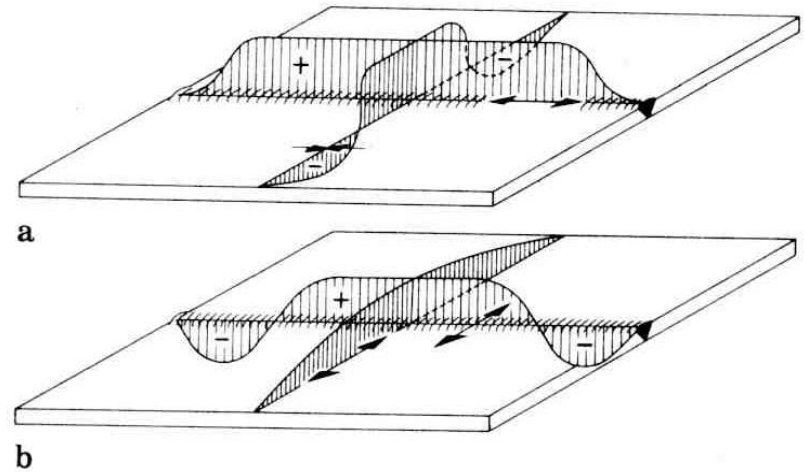
(Quelle: nach Polytechniker Bildungszentrum für Technik Frauenfeld; GSI SLV Halle )

# Folie Schrumpfung, Eigenspannungen



Schrumpfungen an Rechteckplatte mit einseitig geschweißter, ansonsten zentrischer Verbindungsnaht

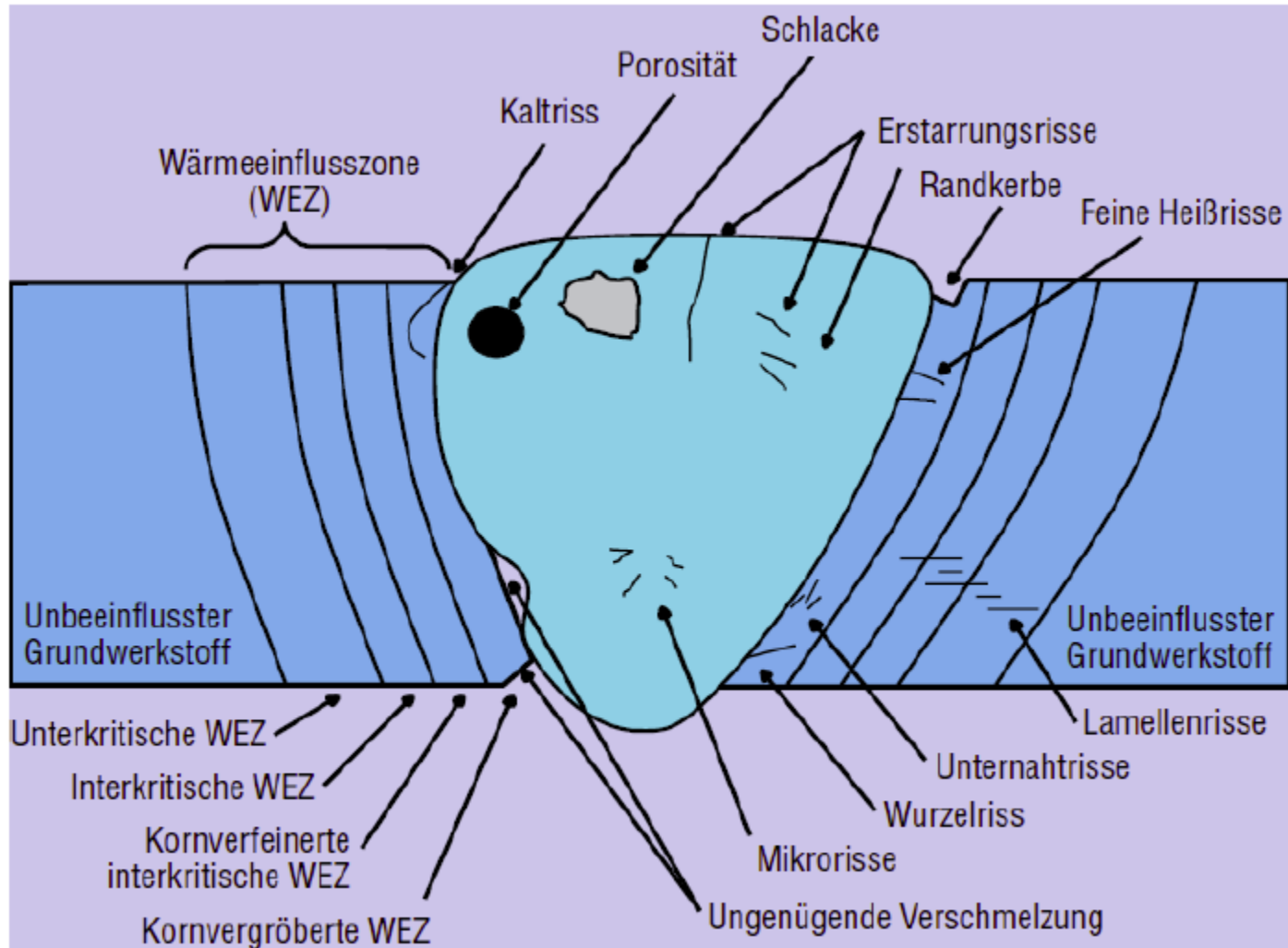
(nach Radaj)



Schweißeseigenspannungen

a in Nahrichtung (Längsspannungen)  
b quer zur Nahrichtung (Querspannungen)

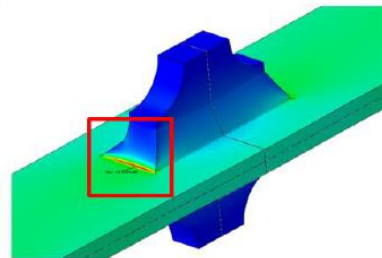
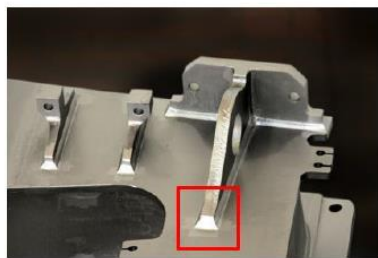
(Dubbel)



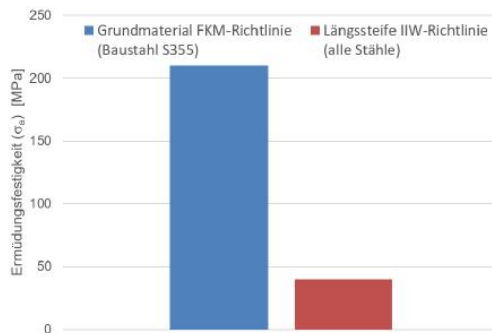
(aus Bretschneider: Vorlesung Schadensanalyse, Schweißen und Schweißnahtfehler, 2013)

## Ermüdungsfestigkeit geschweißter Verbindungen

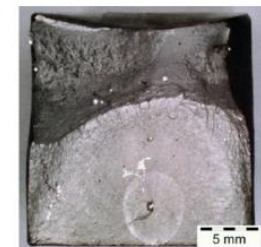
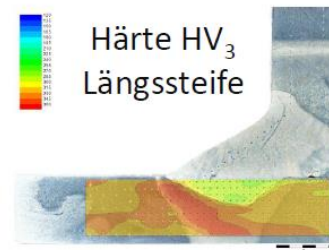
Schweißen kann zu einer wesentlichen Reduktion der Ermüdungsfestigkeit durch folgende Einflüsse führen:



- Kerbwirkung (Nahtübergang und/oder Wurzel)
- Komplexe (Zug-)Eigenspannungszustände
- Unterschiedliche Gefügestrukturen im Bereich der Wärmeeinflusszone (Ort der Rissinitiierung)
- Ungenauigkeiten/Defekte (beispielsweise Gasporen)
- Überlagerte Effekte bei der Montage durch schweißbedingte Verformungen (Verzug)

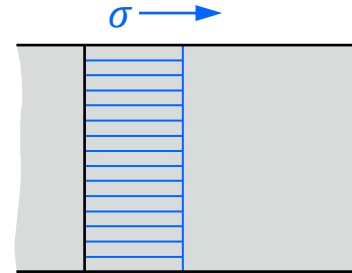
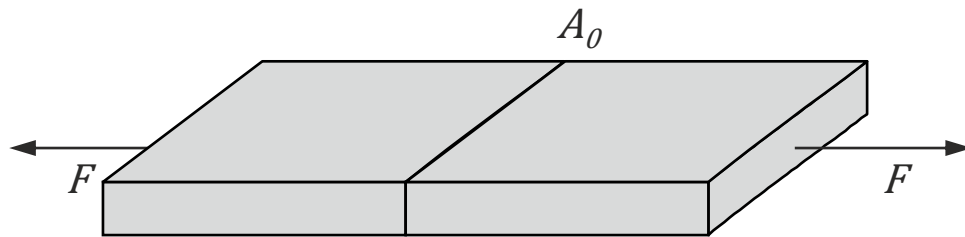


→ Reduktion der Ermüdungsfestigkeit um rund 80% für den Fall einer Längssteife (Vergleich bei  $R_{Last} = -1$  und Annahme hoher Eigenspannungen)

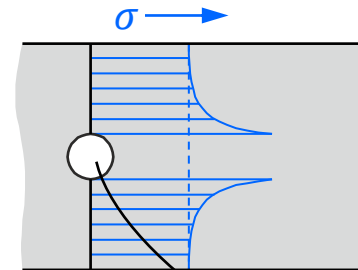
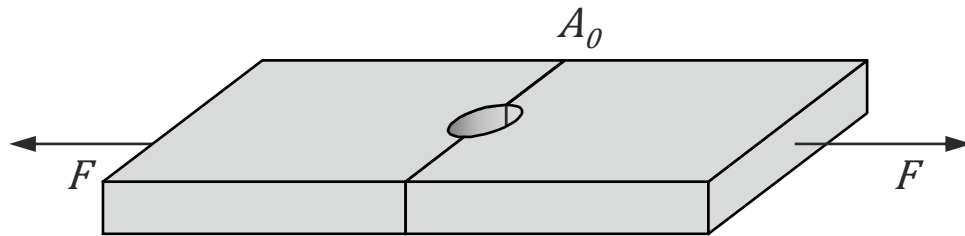


[Leitner et al., Weld World 58, 2014 / Leitner et al., Metals 8, 2018]

# Folie Einfluss von Kerben



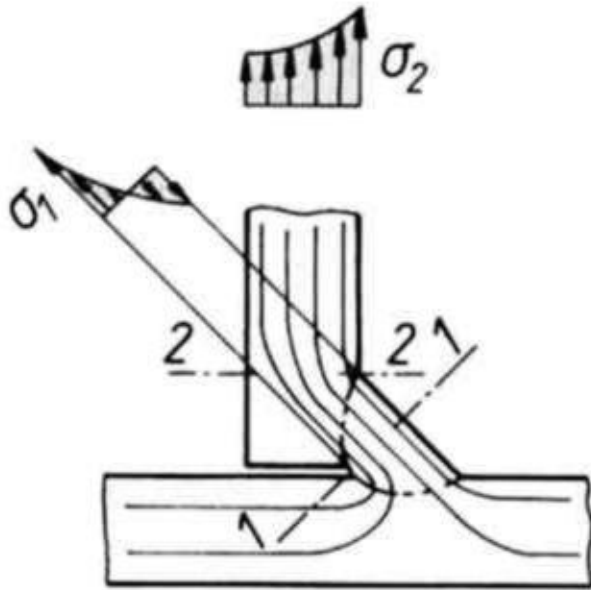
$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$



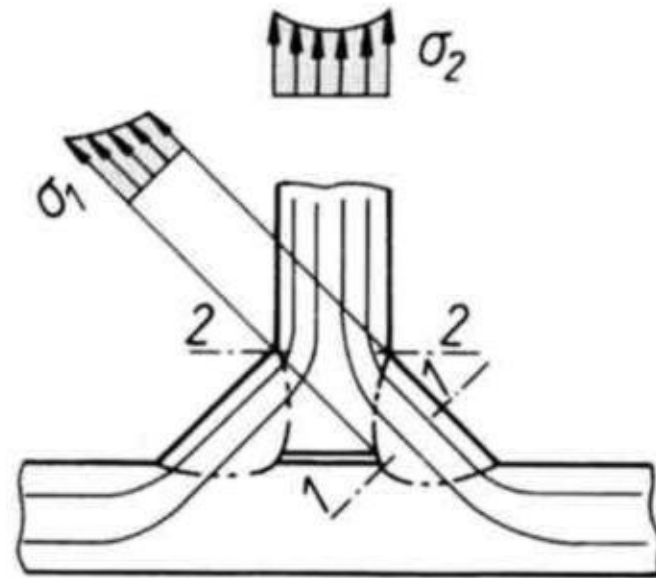
$$\sigma = K \cdot \frac{F}{A_0}$$

$$\rightarrow K = 1,8$$

(Quelle: nach Hübner, Freiberg)



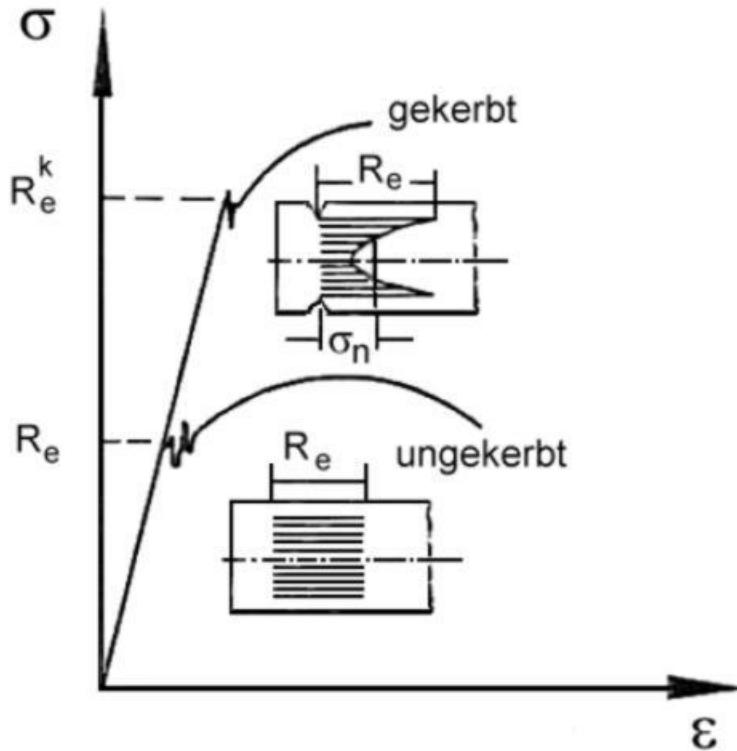
einseitige Kehlnaht



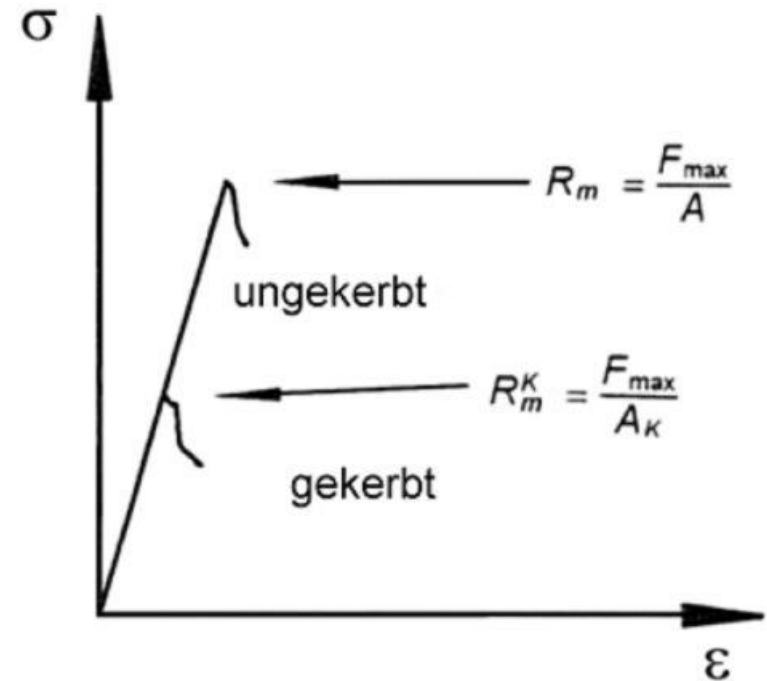
Doppelkehlnaht

(Quelle: Roloff/Matek: Maschinenelemente)

duktiler Werkstoff



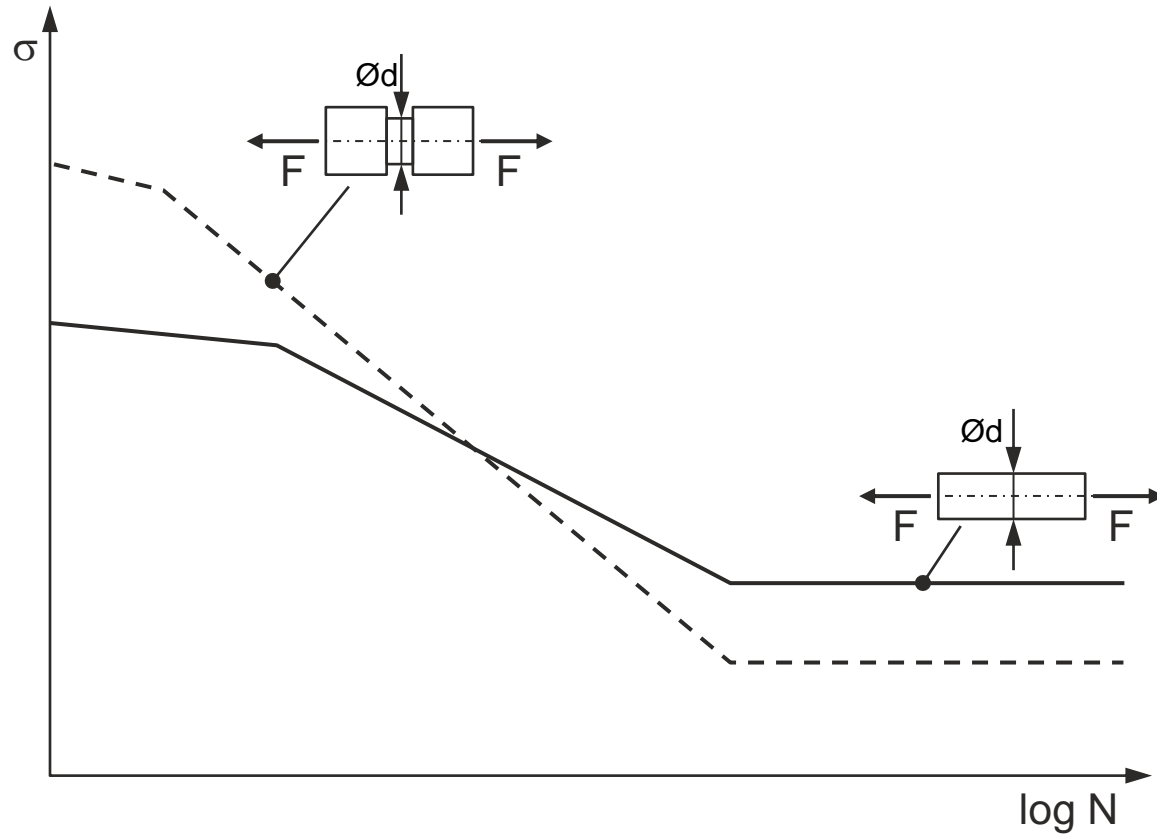
spröder Werkstoff



- **statische Belastung + duktiler Werkstoff = Kerben unproblematisch!**
- **Abbau der Spannungsüberhöhung der Kerben durch Fließen**

(Quelle: Hübner, Freiberg)

# Folie Schwingfestigkeitsverhalten von glatten und gekerbten Bauteilen



→ **dynamische Belastung** → **Kerbe verringert Dauerfestigkeit** = **Kerben problematisch!**

(Quelle: Wächter: Konstruktionslehre für Maschineningenieure)

**Tabelle 2 — Schweißnahtgüteklassen**

Beanspruchungszustand	Sicherheitsbedürfnis		
	Hoch	Mittel	Niedrig
Hoch	CP A <sup>a</sup>	CP B2 <sup>b</sup>	CP C2
Mittel	CP B1 <sup>a</sup>	CP C2	CP C3
Niedrig	CP C1 <sup>b</sup>	CP C3	CP D

<sup>a</sup> Schweißnahtgüteklassen CP A und CP B1: CP A und CP B1 ist nur für voll durchgeschweißte Nähte und für die Überprüfung voll zugänglicher Schweißnähte während der Fertigung und Instandhaltung gültig.

<sup>b</sup> Schweißnahtgüteklassen CP B2 und CP C1: CP B2 und CP C1 gelten auch für Schweißverbindungen, für die volumetrische ZfP nicht möglich sind. Wenn dieser Fall vorliegt, siehe EN 15085-5:—<sup>3</sup>, Tabelle 1, Fußnote b. Dies sollte in der zugehörigen Dokumentation zur Prüfplanung mit einem Hinweis „erweiterte Oberflächenprüfung notwendig“ vermerkt werden.

Für neue Fertigungen ist die Kombination der Kategorien mit hohem Sicherheitsbedürfnis und hohem Beanspruchungszustand, die zu Schweißnahtgüteklasse CP A führt, zu vermeiden. Zur Anwendung in der Instandhaltung siehe EN 15085-6:—<sup>4</sup>.

<p style="text-align: center;"><b>Beanspruchung</b></p>	<p><b>7.2 Schweißnahtgüteklasse CP A</b></p> <p><b>7.2.1 Allgemeines</b></p> <p>Die Kombination der Kategorien mit hohem Sicherheitsbedürfnis und hohem Beanspruchungszustand, die zu Schweißnahtgüteklasse CP A führt, ist eine spezielle Schweißnahtqualität. Sie kann nur für durchgeschweißte Schweißungen und bei vollständiger Zugänglichkeit zu Prüfzwecken gelten und sollte nach Möglichkeit vermieden werden. Wo dies nicht möglich ist, müssen die erforderlichen Maßnahmen zur Kontrolle des Risikos festgelegt und die folgenden Unterabschnitte erfüllt werden.</p>	
	<p><b>7.2.2 Schweißanweisungen (WPS)</b></p> <p>Schweißanweisungen müssen in Übereinstimmung mit den Anforderungen des relevanten Teils von EN ISO 15614 oder EN ISO 15613:2004 (mit Nachweis aller anwendbaren mechanischen Eigenschaften) qualifiziert werden.</p>	<b>Niedrig</b>
	<p>Die für die Schweißverfahrensprüfung verwendeten Bewertungskriterien der Schweißnaht müssen die Anforderungen nach EN 15085-3:—<sup>2</sup> für die Schweißnahtgüteklasse CP A erfüllen.</p>	CP C2
	<p>Aluminium und seine Legierungen erfordern die Kontrolle der Wärmeeinbringung.</p> <p><b>7.2.3 Zusätzliche Prüfung</b></p> <p>Für die Schweißnahtgüteklasse CP A muss eine Arbeitsprobe nach EN 15085-4:—<sup>3</sup> durchgeführt werden. Die Bewertungskriterien der Schweißnaht müssen die Anforderungen nach EN 15085-3:—<sup>2</sup> für die Schweißnahtgüteklasse CP A erfüllen.</p>	CP C3
	<p><b>7.2.4 Inspektion und Prüfung von Schweißverbindung</b></p> <p>Im Fall einer Kombination aus hohem Sicherheitsbedürfnis und hohem Beanspruchungszustand nach EN 15085-3:—<sup>2</sup> sollten entsprechende volumetrische Prüfungen an 100 % der Schweißungen durchgeführt werden, um die Möglichkeit des Erkennens aller Arten von Unregelmäßigkeiten zu maximieren.</p> <p>Für CP A sind die Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten in EN 15085-3:—<sup>2</sup> festgelegt.</p> <p>Instandhaltungspläne müssen die Überwachung von CP A-Schweißungen beinhalten.</p> <p>(Quelle: DIN EN 15085-6 (2022-12))</p>	CP D
<p>a Schweißnahtgüte zugänglicher Schweißungen</p> <p>b Schweißnahtgüte nicht möglich sind, wenn die Dokumentation zur Prüfung nicht möglich ist</p>		<p>zur die Überprüfung voll</p> <p>die volumetrische ZfP</p> <p>der zugehörigen Dokumenten.</p>
<p>Für neue Fertigung Beanspruchungszustand Instandhaltung siehe</p>		<p>Sicherheitsbedürfnis und hohem Beanspruchungszustand Anwendung in der</p>

## 4.4 Sicherheitsbedürfnis

Das Sicherheitsbedürfnis definiert die Auswirkungen eines Versagens einer einzelnen Schweißnaht mit Hinblick auf die Folgen für Personen, Einrichtungen und die Umwelt.

Die Sicherheitsbedürfnisse sind, wie folgt, eingeteilt:

- Niedrig:** Das Versagen der Schweißnaht führt zu keiner direkten Beeinträchtigung der Gesamtfunktion. Sich daraus ergebende Ereignisse mit Personenschäden sind unwahrscheinlich.
- Mittel:** Das Versagen der Schweißnaht führt zu einer Beeinträchtigung der Gesamtfunktion oder kann zu sich daraus ergebenden Ereignissen mit Personenschäden führen.
- Hoch:** Das Versagen der Schweißnaht führt zu sich daraus ergebenden Ereignissen mit Personenschäden und zu einem Versagen der Gesamtfunktion.

Für eine detailliertere Erklärung der Sicherheitsbedürfnisse sollte auch Anhang G beachtet werden.

**Tabelle 1 — Beanspruchungszustände**

<b>Beanspruchungszustand</b>	<b>Ausnutzung der Beanspruchbarkeit (S)</b>
Hoch	$\geq 0,9$
Mittel	$0,75 \leq S < 0,9$
Niedrig	$\leq 0,75$

Der Beanspruchungszustand ergibt sich aus der Ausnutzung der Beanspruchbarkeit nach Tabelle 1 (siehe 3.1).

Der Ermüdungsfestigkeitswert kann aus den entsprechenden Normen/Richtlinien oder aus Ermüdungsprüfungen an repräsentativen Schweißnahtproben abgeleitet werden.

Die statistische Auswertung der Ermüdungsprüfungen muss nach einer geeigneten Norm erfolgen. Die Prüfung der Festigkeit sollte unter Anwendung nur eines kohärenten Berechnungssystems erfolgen.

Europäische Normen für die strukturellen Anforderungen an Schienenfahrzeuge, wie z. B. EN 12663-1:2010+A1:2014, EN 12663-2:2010, EN 13749:2021, EN 15827:2011, müssen angewendet werden.

# Folie Zusammenhänge Schweißnahtgüteklasse – Prüfaufwand

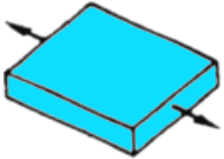
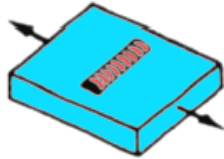
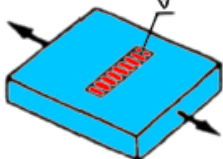
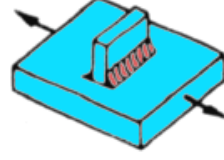
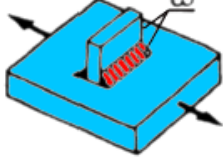
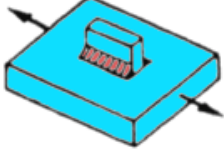
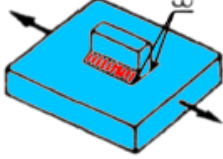
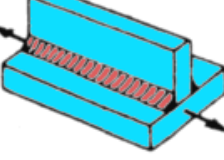
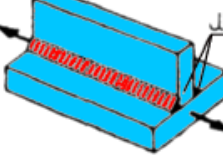
**Tabelle 3 — Zusammenhang zwischen Schweißnahtgüteklassen und Schweißnahtprüfklassen**

Beanspruchungs- zustand	Sicher- heits- bedürfnis	Schweiß- naht- güte- klasse	Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten	Schweiß- naht- prüf- klasse	Volumetrische Prüfungen	Ober- flächen- prüfungen	Sicht- prüfung
			EN ISO 5817:2014 EN ISO 10042:2018 EN ISO 13919-1:2019 EN ISO 13919-2:2021	Mindest- anforde- rungen	min.	min.	min.
Hoch	Hoch	CP A	B <sup>a</sup>	CT 1	100 %	100 %	100 %
Hoch	Mittel	CP B2	B <sup>a</sup>	CT 2	10 %	10 %	100 %
Hoch	Niedrig	CP C2	C <sup>a</sup>	CT 3	Nicht erforder- lich	Nicht erforder- lich	100 %
Mittel	Hoch	CP B1	B <sup>a</sup>	CT 2	10 %	10 %	100 %
Mittel	Mittel	CP C2	C <sup>a</sup>	CT 3	Nicht erforder- lich	Nicht erforder- lich	100 %
Mittel	Niedrig	CP C3	C <sup>a</sup>	CT 4	Nicht erforder- lich	Nicht erforder- lich	100 %
Niedrig	Hoch	CP C1	C <sup>a</sup>	CT 2	10 %	10 %	100 %
Niedrig	Mittel	CP C3	C <sup>a</sup>	CT 4	Nicht erforder- lich	Nicht erforder- lich	100 %
Niedrig	Niedrig	CP D	D <sup>a</sup>	CT 4	Nicht erforder- lich	Nicht erforder- lich	100 %

<sup>a</sup> Einzelheiten siehe Tabelle 4 bis Tabelle 6

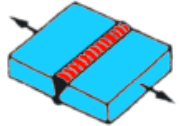
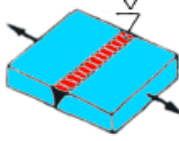
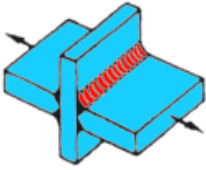
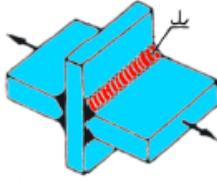
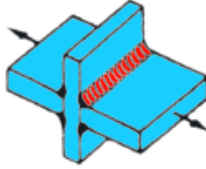
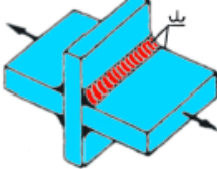
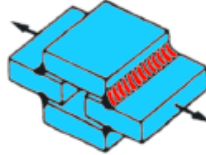
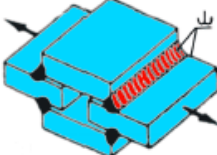
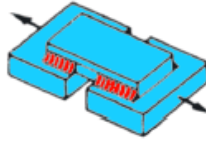
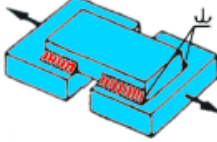
(Quelle: DIN EN 15085-3:2023-02)

# Folie Einfluss der Schweißnahtform (I)

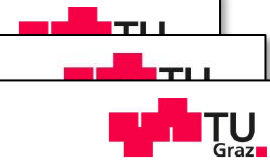
		$R_e$ $\sigma_w$ $\sigma_{Sch}$ in MPa					$R_e$ $\sigma_w$ $\sigma_{Sch}$ in MPa		
	Grundwerkstoff	240	140	240					
	Querraupe	240	95	160		Querraupe bearbeitet	240	140	230
	Querrippe	240	75	130		Stirkehlnaht bearbeitet	240	95	160
	Längsrippe	240	45	85		Flankenkehlnaht bearbeitet	240	45	85
	durchgehende Längsrippe	240	115	195		Längskehlnaht bearbeitet	240	115	195

(Quelle: Hübner, Freiberg)

# Folie Einfluss der Schweißnahtform (II)

		$R_e$	$\sigma_w$ in MPa	$\sigma_{Sch}$			$R_e$	$\sigma_w$ in MPa	$\sigma_{Sch}$
	Stumpfnah	240	95	160		Stumpfnah, bearbeitet	240	130	230
	DHV-Nah	240	80	130		DHV-Nah bearbeitet	240	115	190
	Kehlnah Kreuzstoß	240	45	85		Kehlnah bearbeitet	240	60	105
	Stirkehl nah-Laschenstoß	>140	35	65		Stirkehl nah bearbeitet	>140	35	65
	Flankenkehl nah-Laschenstoß	>140	35	65		Flankenkehl nah bearbeitet	>140	35	65

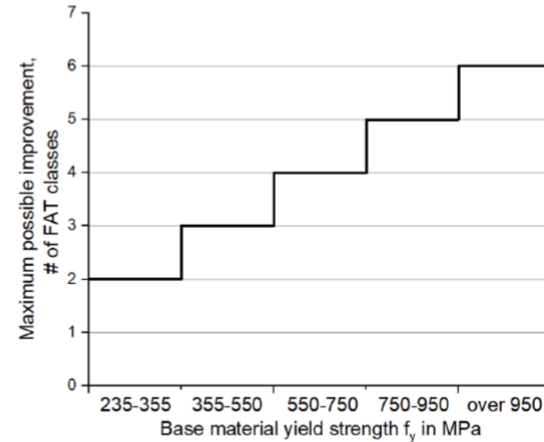
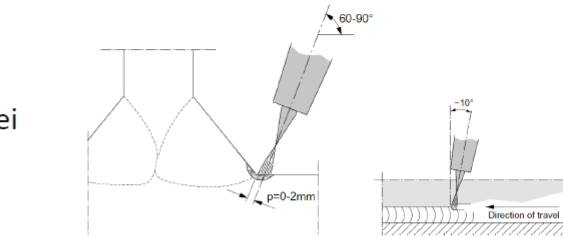
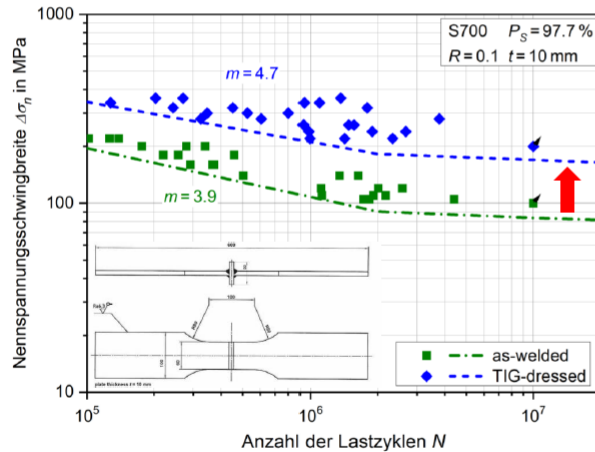
(Quelle: Hübner, Freiberg)



47. Tagung „Moderne Schienenfahrzeuge“

## Anwendung TIG-dressing

- Erhöhung der Langzeitfestigkeit um Faktor von rund zwei
- Richtlinien zur effektiven und praktikablen Anwendung
- Vorschläge für mögliche IIW-Empfehlungen vorhanden

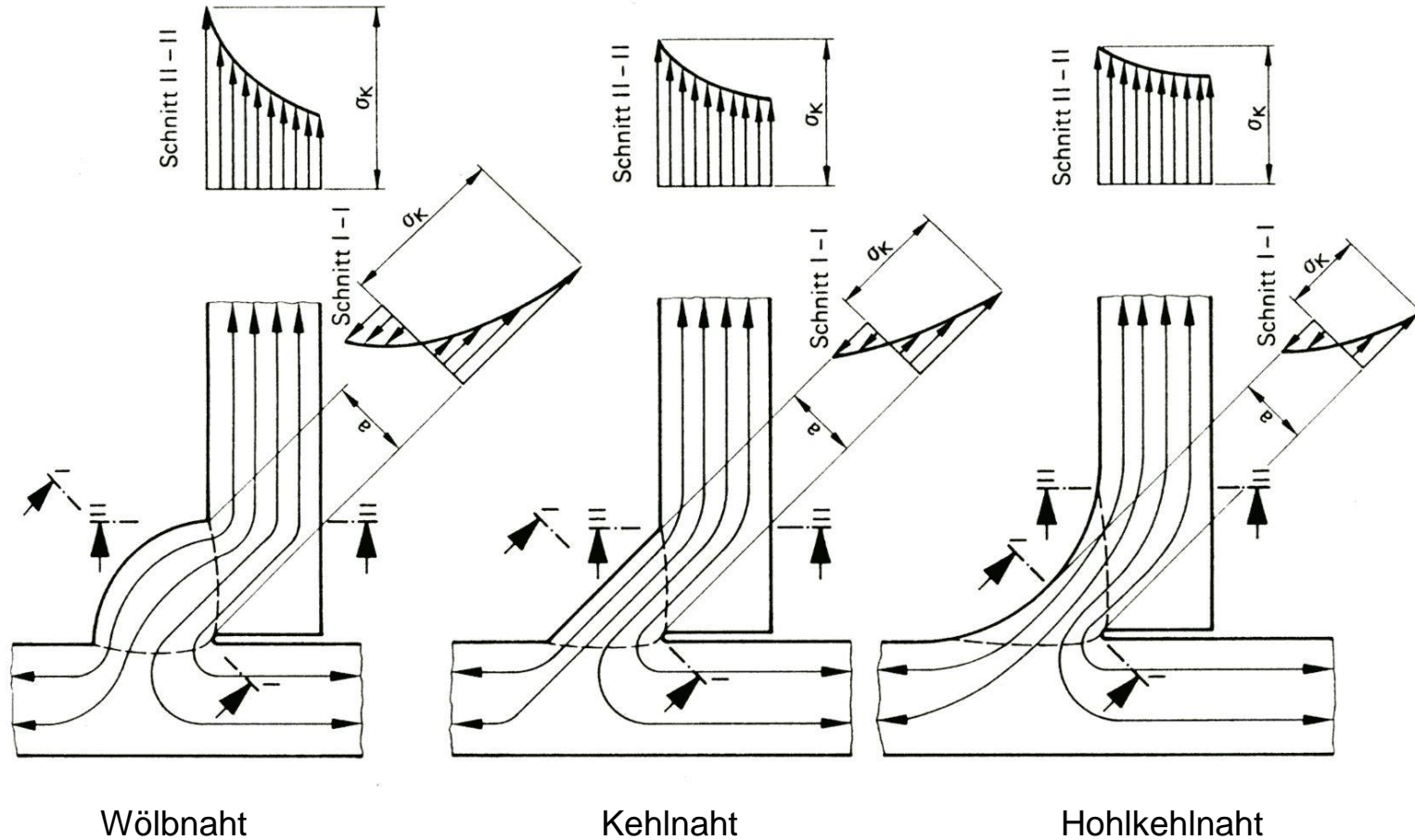


[Brunnhöfer et al., IIW-Dokument XIII-2893-2021, 2021 / Haagensen, Maddox, XIII-2200r7-07, 2007 / Yildirim et al., International Journal of Fatigue 79, 2015]

Betriebsfestigkeit und Leichtbau am Beispiel Drehgestell  
Leitner et al., 04.04.2022

(Quelle: Vortrag Leitner: Betriebsfestigkeit und Leichtbau ..., Graz 2022)

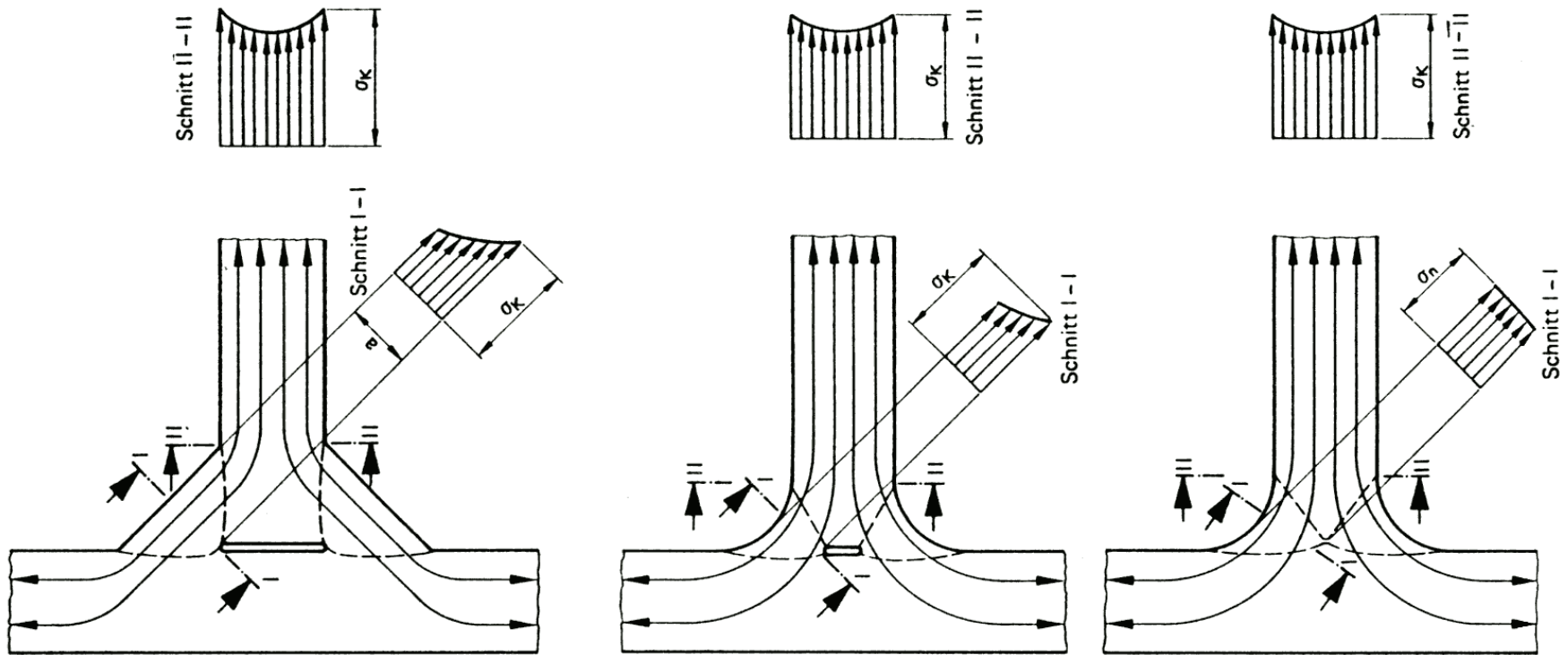
# Folie Kraftlinienfluss und Spannungsverteilung einseitig geschweißter Kehlnähte



**günstigere Bedingungen**

(Quelle: Scheermann: Leitfaden für den Schweißkonstrukteur)

# Folie Kraftlinienfluss und Spannungsverteilung am T-Stoß



Doppelkehlnaht

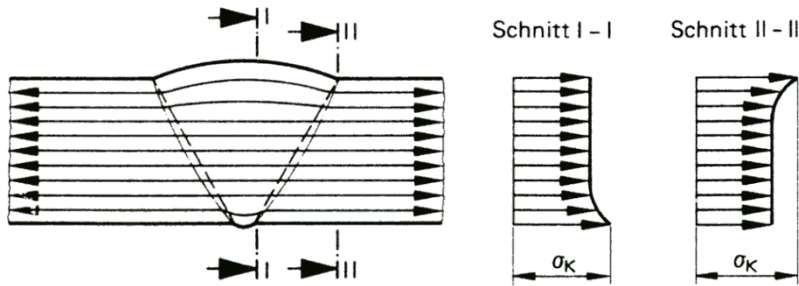
Doppel-HY-Naht  
mit Hohlkehlnaht

Doppel-HV-Naht  
mit Hohlkehlnaht

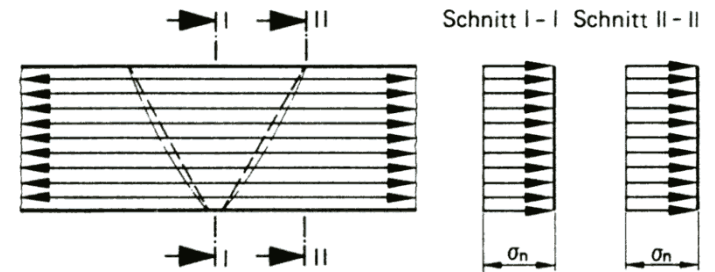


(Quelle: Scheermann: Leitfaden für den Schweißkonstrukteur)

# Folie Kraftlinienfluss und Spannungsverteilung in einer Stumpfnah



fachgerecht geschweißte Stumpfnah



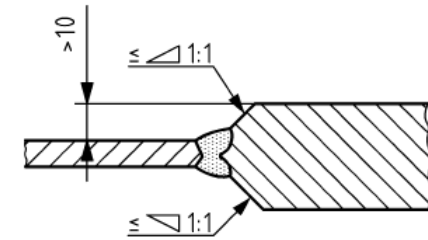
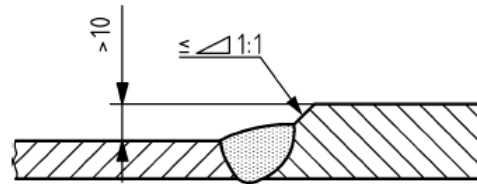
blecheben bearbeitete Stumpfnah



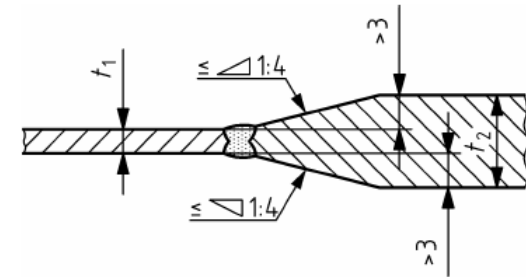
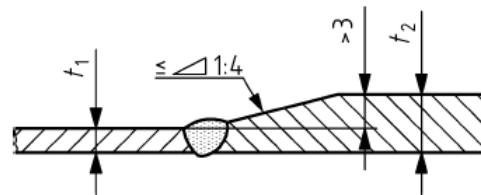
(Quelle: Scheermann: Leitfaden für den Schweißkonstrukteur)

# Folie Stumpfnähte an Bauteilen mit unterschiedlicher Dicke

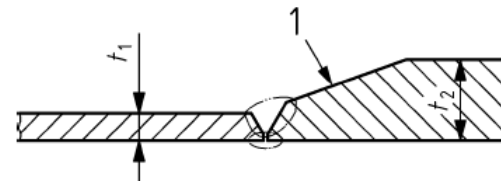
Maße in Millimeter



1 : 1 für CP C3 und CP D



ANMERKUNG 1 : 4 für CP A, CP B, CP C1 und CP C2 Schweißverbindung. Die Nahtvorbereitung ist in der Zeichnung darzustellen. Neigung  $< 1 : 1$  ist ein Winkel von  $< 45^\circ$ , Neigung  $< 1 : 4$  ist ein Winkel von  $< 14^\circ$ .



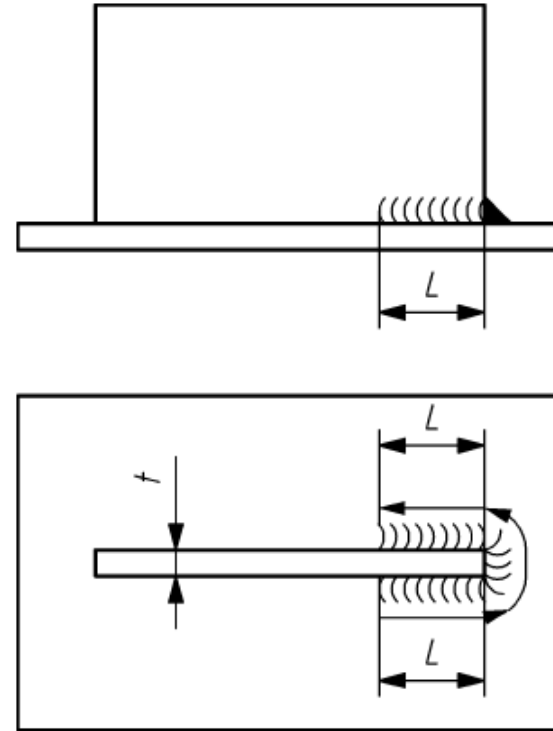
## Legende

1 Neigung

Ergänzende Genauigkeit der Fasenposition. Die äußere Form der Schweißnaht muss mit der Neigung zusammenpassen.

(Quelle: DIN EN 15085-3)

**Bild 2 — Stumpfnähte an Bauteilen mit unterschiedlicher Blechdicke**



$l \geq 2 t$ , wobei  $l_{\min} = 10 \text{ mm}$

## Legende

$t$  Blechdicke

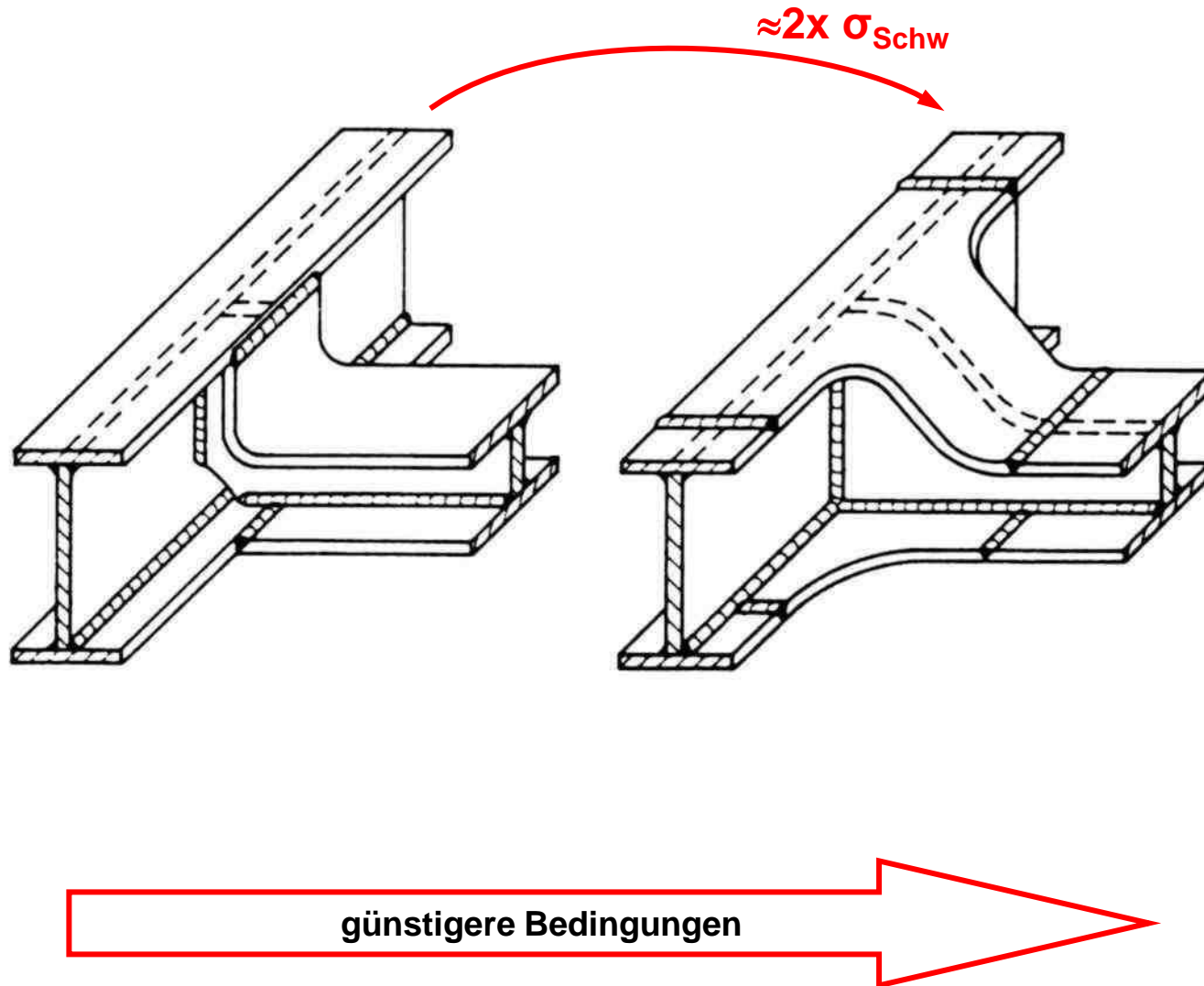
$l$  Länge der ununterbrochenen Schweißnaht

Das Umschweißen muss möglichst ohne Unterbrechung durchgeführt werden.

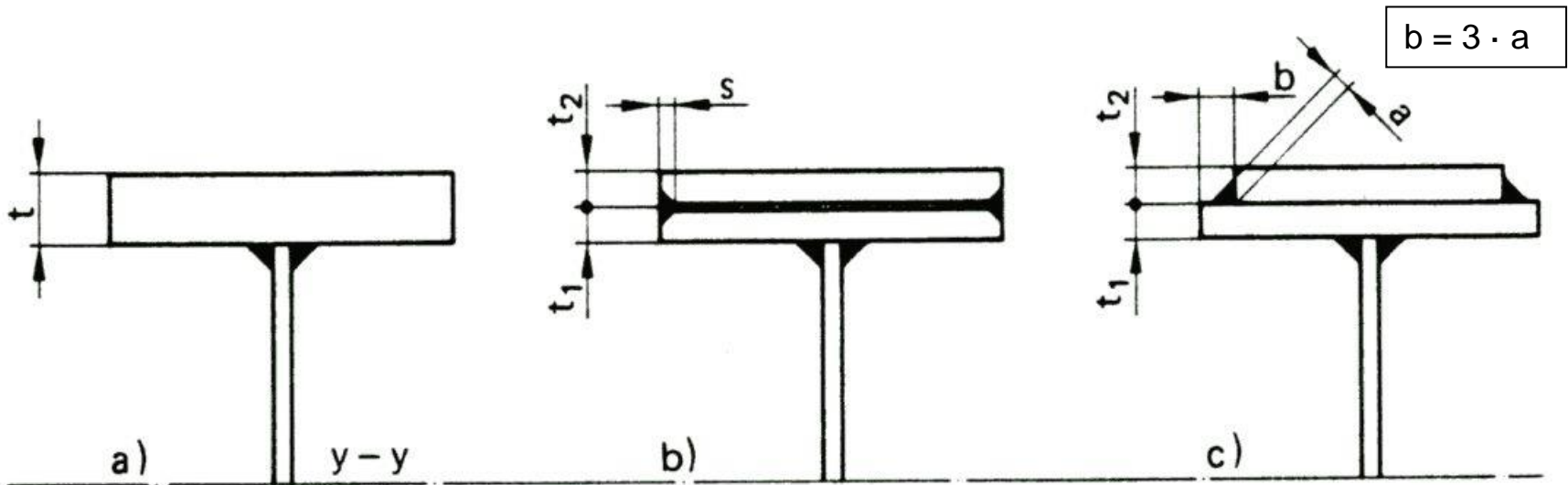
(Quelle: DIN EN 15085-3)

**Bild 10 — Umschweißen**

# Folie Bsp. beanspruchungsgerechte Trägerverbindung ungleicher Höhe



(Quelle: Neumann: Schweißtechnisches Handbuch für Konstrukteure Teil 3)



dickwandiger Gurt

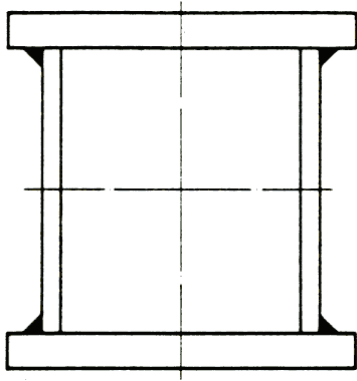
ungünstige Lamellenbauweise  
mit gleichen Querschnittswerten

fertigungstechnisch günstige  
Lamellenbauweise



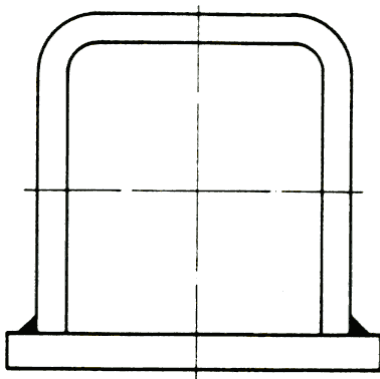
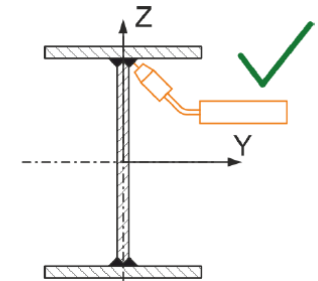
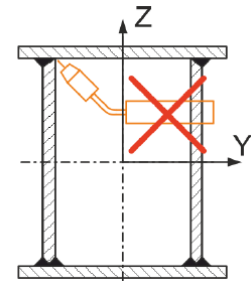
(Quelle: Scheermann: Leitfaden für den Schweißkonstrukteur)

# Folie Nutzung kaltgeformter Bauteile

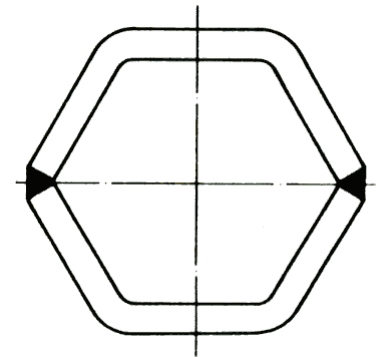
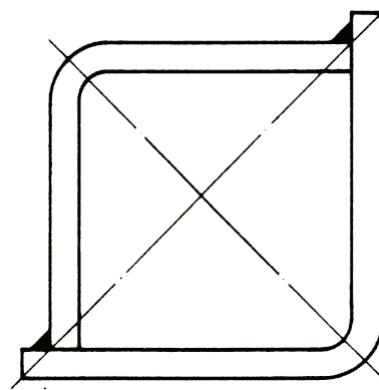


Kastenträger mit 4 Kehlnähten

besser: offene Profile!

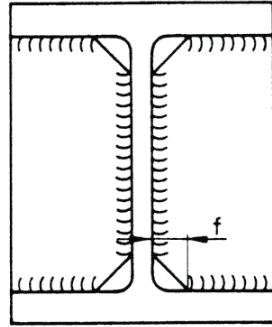
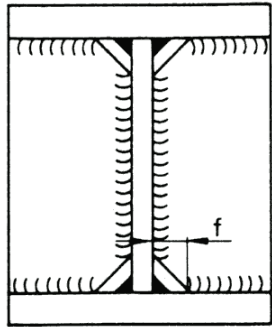


Kastenträger mit 2 Kehlnähten



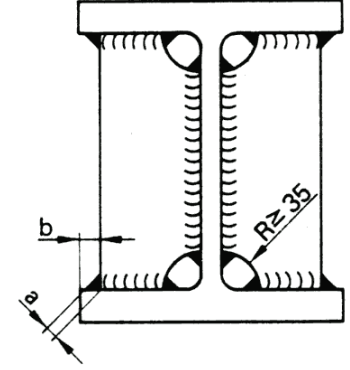
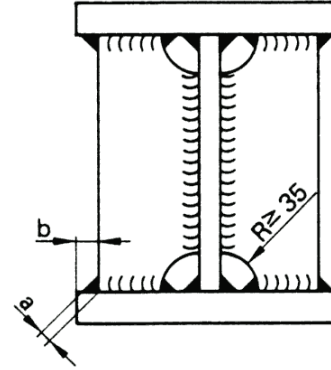
(Quelle: Scheermann: Leitfaden für den Schweißkonstrukteur; Vortrag Leitner: Betriebsfestigkeit und Leichtbau ..., Graz 2022)

# Folie Aussteifungen (I)



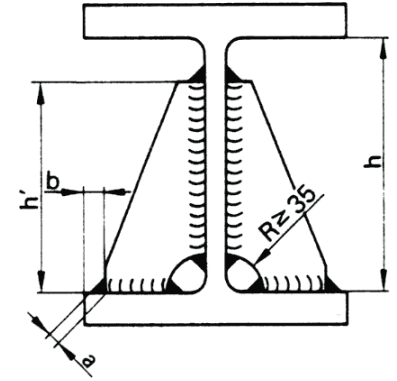
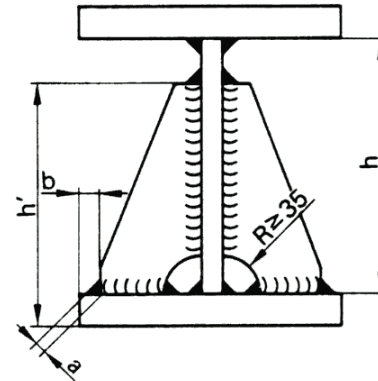
## ungünstige Ausführung

- unverschweißte Spalten an den Stirnflächen
- bei zu geringem „f“ → unsauber ausgeführte Ecken



## gute Ausführung

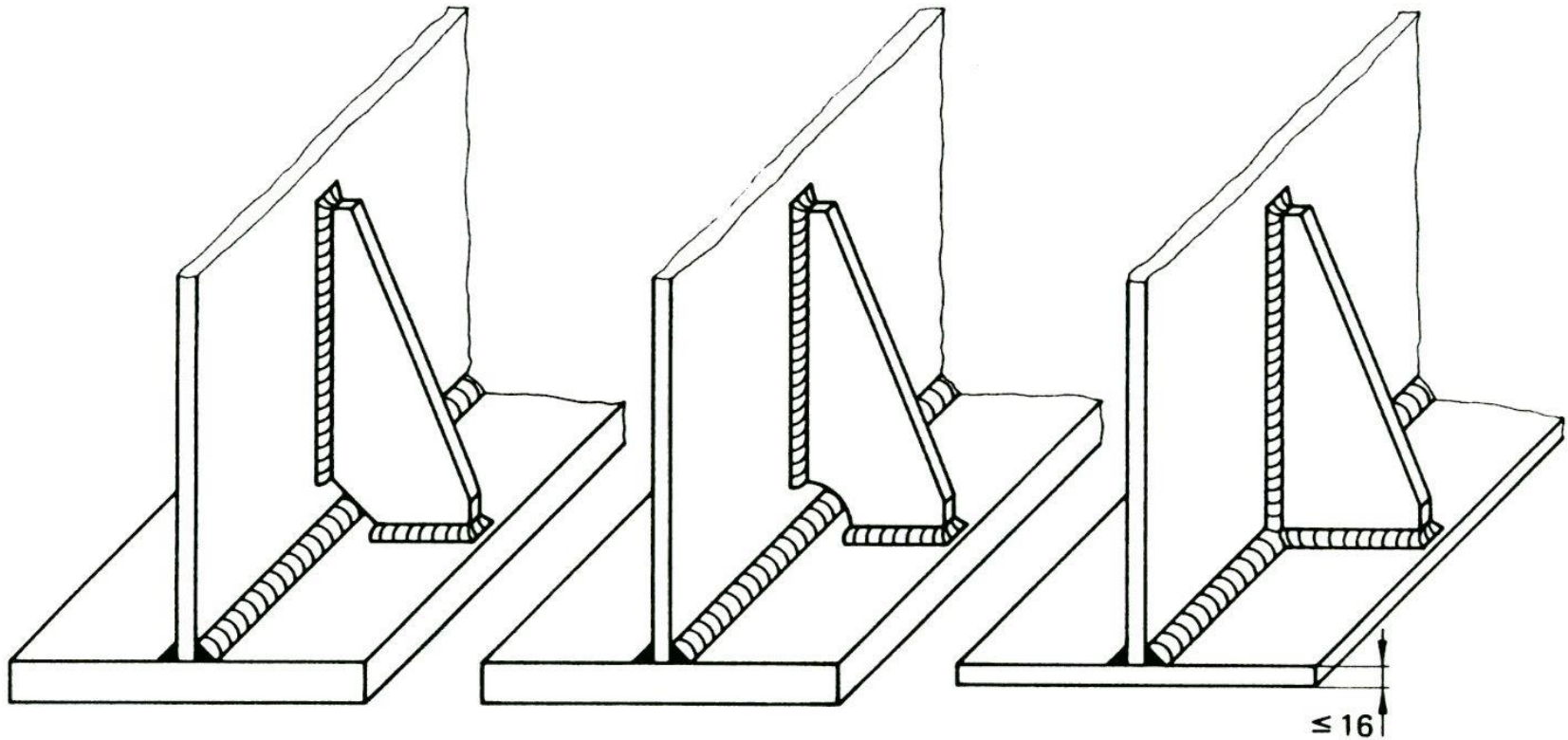
- Freischnitte in den Ecken müssen groß genug sein



## günstigste Ausführung

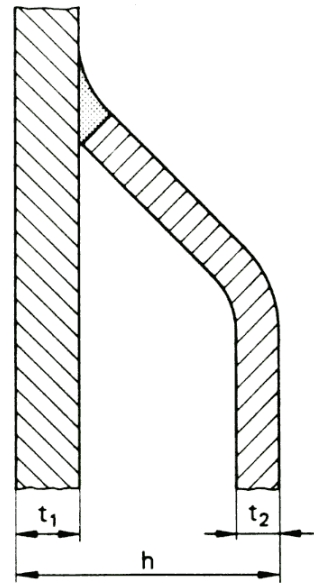
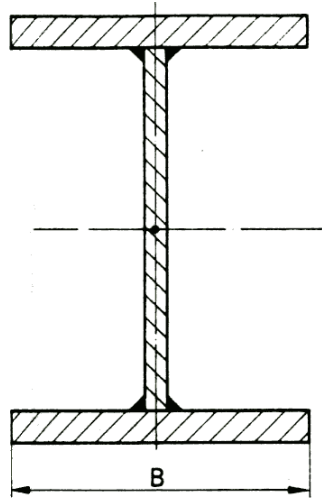
- fachgerechtes Umschweißen aller Ecken möglich
- auch einfacher Schrägschnitt möglich

(Quelle: Scheermann: Leitfaden für den Schweißkonstrukteur)

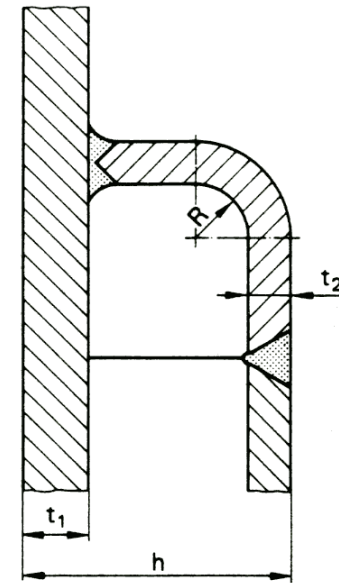
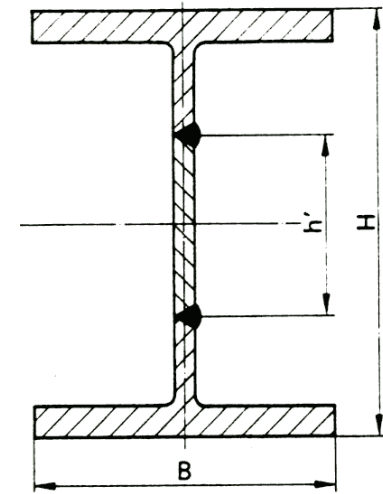


**günstigeres dynamisches Verhalten**

(Quelle: Scheermann: Leitfaden für den Schweißkonstrukteur)

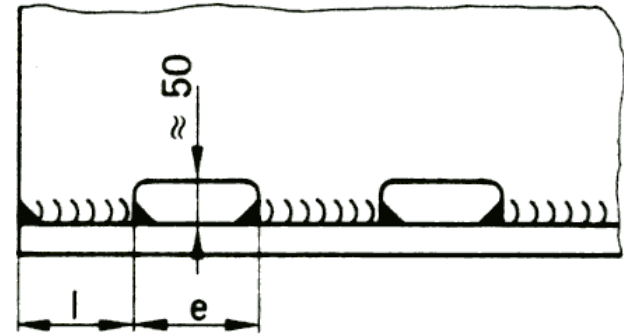
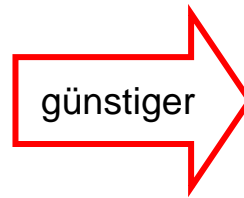
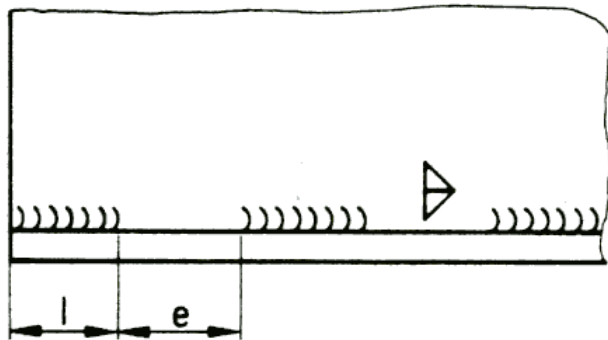
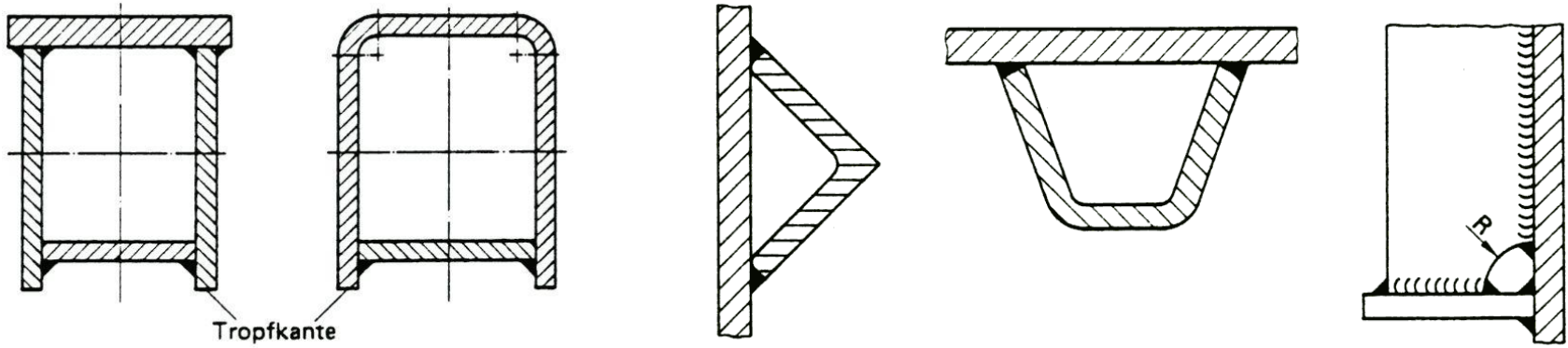


**prüffähig angeordnete  
Schweißnähte**



(Quelle: Scheermann: Leitfaden für den Schweißkonstrukteur)

# Folie Korrosionsschutzgerechte Gestaltung



(Quelle: Scheermann: Leitfaden für den Schweißkonstrukteur)

- *Büttemeier, H.; Kaßner, Dr. M.; Strothmann. M.:* Schweißtechnisches Handbuch Schienenfahrzeugbau, Fachbuchreihe Schweißtechnik Bd. 148, Düsseldorf, DVS Media 2010
- *Neumann, A.:* Schweißtechnisches Handbuch für Konstrukteure, Teile 1 ... 4 Fachbuchreihe Schweißtechnik, Bd.80, DVS-Verlag Düsseldorf., 5. überarbeit. Auflage 1997, Teil 3: Maschinen- und Fahrzeugbau.
- *Radaj, D.:* Gestaltung und Berechnung von Schweißkonstruktionen, Ermüdungsfestigkeit Fachbuchreihe Schweißtechnik, Bd. 82, DVS-Verlag Düsseldorf, 1985
- *Scheermann, H.:* Leitfaden für den Schweißkonstrukteur – Grundlagen der schweißtechnischen Gestaltung Fachbuchreihe Die schweißtechnische Praxis, Bd. 17, DVS-Verlag Düsseldorf 1997
- Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen (FKM-Richtlinie), 6. Ausgabe 2012
- „*IW-Empfehlungen*“: A. Hobbacher: Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components - Empfehlungen zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile (IIW-Document IIW-xxxx-13/XIII-2460-13/XV-1440-13, Mai 2014)

1. Konstruieren mit Schweißstößen und Schweißnähten geringer Kerbwirkung
2. Beanspruchungen zusammenstellen (Lastannahmen)
3. Ermittlung vorhandene Spannung (FEM, Technische Mechanik, ...)
4. Ermittlung zulässige Spannung:
  - a) Festlegung des *Sicherheitsbedürfnisses der Naht* nach DIN EN 15085-3 (Anforderungen hinsichtlich Schutz von Personen, Anlagen und Umwelt)
  - b) Zuordnung der *Schweißnahtgüteklasse CP* nach DIN EN 15085-3  
→ Berücksichtigung Anforderungen Fertigung und Prüfung (DIN EN 15085-4 bzw. -5)
  - c) Ermittlung Bauteilklasse bzw. Kerbfall (z.B. nach DVS 1608, 1612, FKM, IIW)  
→ Zuordnung tatsächlicher Schweißstoß zu Bauteilkatalog (= Kerbfall)
  - d) Bestimmung der *zulässigen Spannung* anhand des Kerbfalles  
→ (Kerbfall-)Linien der zulässigen Spannung (DVS 1608, 1612, FKM, IIW)  
→ Abminderung für gewählte CP
5. Sicherheitsnachweis
6. Ggf. gewählte Verbindung überdenken → Änderung Schweißstoß / CP

# Folie Formeln Spannungen in Schweißnaht

- Zug, Druck, Schub:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{\perp} \\ \tau_{\perp} \\ \tau_{II} \end{array} \right\} = \frac{F}{\sum (a \cdot l)}$$

- Biegung:

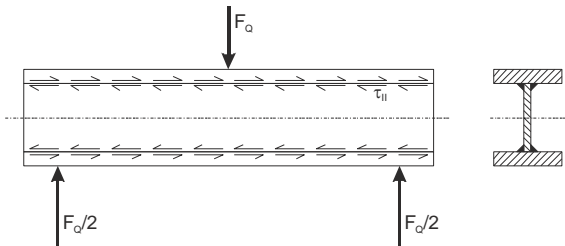
$$\sigma_{\perp} = \frac{M_b}{W_b}$$

- Torsion:

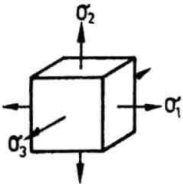
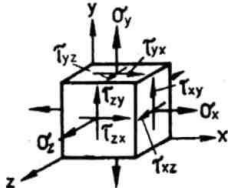
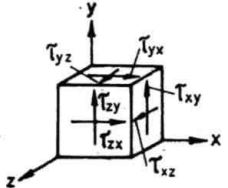
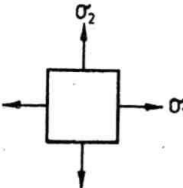
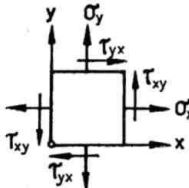
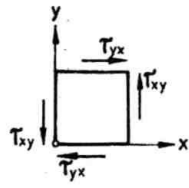
$$\tau_{II,t} = \frac{M_t}{W_t}$$

- Kehlnaht mit Querkraftbiegung:

$$\tau_{II} = \frac{F_Q \cdot S}{I \cdot \sum a}$$



# Folie Vergleichsspannung nach der Gestaltänderungshypothese

	Hauptspannungen	Normal- und Schubspannungen	Reine Schubspannungen
räumliche Beanspruchung	 $\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_2 \cdot \sigma_3 - \sigma_3 \cdot \sigma_1}$	 $\sigma_v = 1/\sqrt{2} \times \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$	 <p>Voraussetzung: <math>\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 0</math></p> $\sigma_v = \sqrt{3} \cdot \sqrt{\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2}$
ebene Beanspruchung	 <p>Voraussetzung: <math>\sigma_3 = 0</math></p> $\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2}$	 <p>Voraussetzung: <math>\sigma_z = 0</math></p> $\tau_{zy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = \tau_{xz} = 0$ $\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3\tau^2}$ $\tau_{xy} = \tau_{yx} = \tau$ <p>Voraussetzung: <math>\sigma_y = \sigma_z = 0</math></p> $\tau_{zy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = \tau_{xz} = 0$ $\sigma_v = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad \sigma_x = \sigma$ $\tau_{xy} = \tau_{yx} = \tau$	 <p>Voraussetzung: <math>\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 0</math></p> $\tau_{zy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = \tau_{xz} = 0$ $= \tau_{xy} = \tau_{yx} = 0$ $\sigma_v = \sqrt{3} \cdot \tau$

(Quelle: Wächter: Konstruktionslehre für Maschineningenieure)

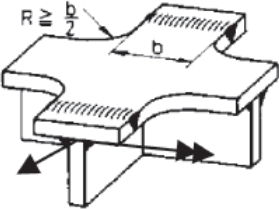
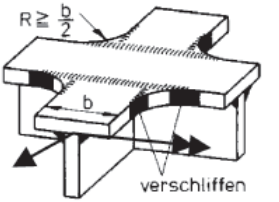
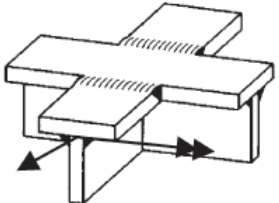
*„Bei mehreren Spannungskomponenten ist zusätzlich der Dauerfestigkeitsnachweis für mehrachsige bzw. zusammengesetzte Spannungen durchzuführen:*

$$\left(\frac{\sigma_{\parallel}}{\sigma_{\parallel, \text{zul}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\perp}}{\sigma_{\perp, \text{zul}}}\right)^2 - \frac{\sigma_{\parallel}}{|\sigma_{\parallel, \text{zul}}|} \cdot \frac{\sigma_{\perp}}{|\sigma_{\perp, \text{zul}}|} + \left(\frac{\tau}{\tau_{\text{zul}}}\right)^2 \leq 1,1 \quad (3) \text{ “}$$

*(Quelle: DVS 1612 (August 2014))*

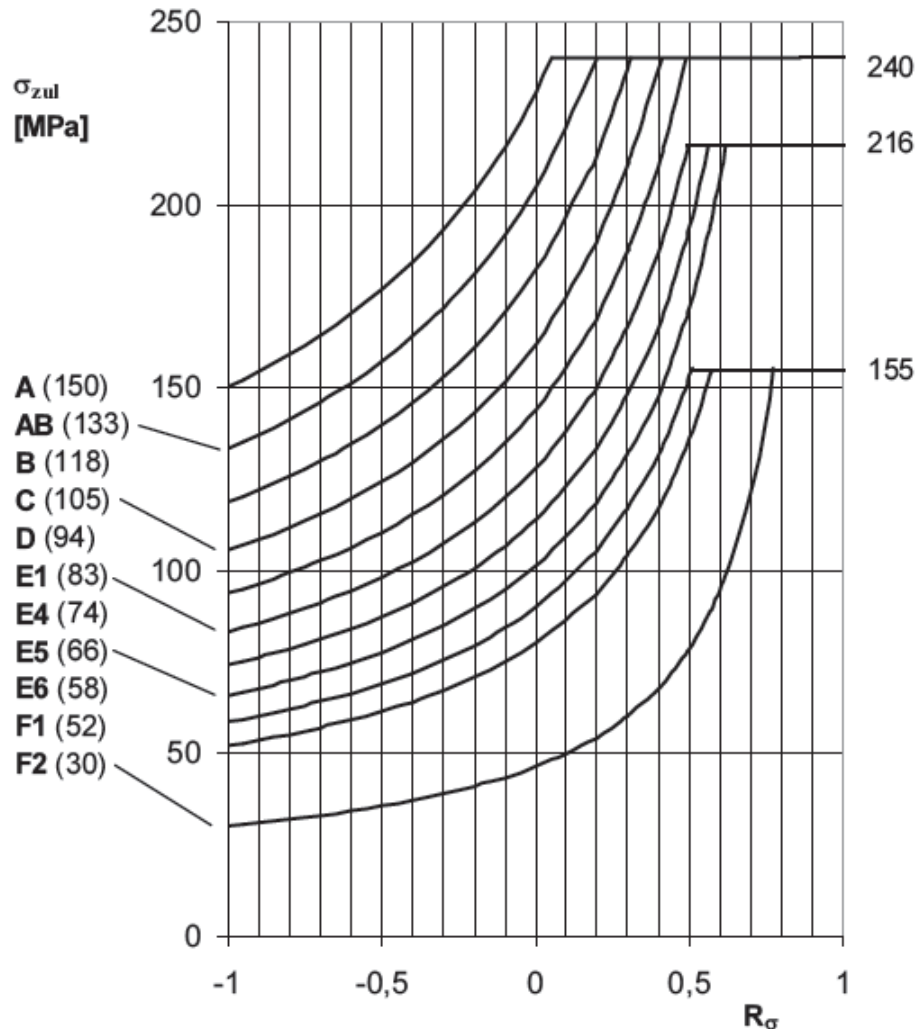
# Folie Auszug Bauteilkatalog DVS 1612 (August 2009)

Tabelle B-6. Geschweißte Rahmenecken.

Nr.	Stoß- und Nahtausbildung				Prüfart und -umfang	Schweißnahtgüteklasse nach DIN EN 15085-3	Kerbfalllinie	Bemerkungen			
	Darstellung	Beschreibung	Nahtart	Naht-Nr. nach DIN EN 15085-3					Nahtoberfläche bearbeitet		
6.1	 <p>quer zur Krafrichtung eingeschweißtes Knotenblech.</p>	V-Naht, Wurzelschweißung mit WIG V-Naht mit Gegenlage HV-Naht mit Gegenlage DV-Naht DHV-Naht	2a mit WIG-Wurzel 2c 3c 6 7	ja <sup>1)</sup>	100%ZfP-V	CP A	B	Gegenlage unter dem Steg, Gurt zuerst geschweißt			
6.2				nein	10%ZfP-V	CP B CP C1	D				
6.3				Sichtprüfung	CP C2	D-					
6.4				gleiche Blechdicken			ja <sup>1)</sup>	100%ZfP-V	CP A	D	mit WIG im Stegbereich, im Bauteil geschweißt
6.5							nein	10%ZfP-V	CP B CP C1	E1+	
6.6							Sichtprüfung	CP C2	E1		
6.7							V-Naht	2a	Sichtprüfung	CP C2	F2
6.8	 <p>Naht quer zur Krafrichtung, an Kreuzungsstellen von Gurtblechen mit angeschweißten Blecken. Nahtenden kerbfrei bearbeitet.</p>	V-Naht, Wurzelschweißung mit WIG Naht mit Gegenlage HV-Naht mit Gegenlage DV-Naht DHV-Naht	2a mit WIG-Wurzel 2c 3c 6 7	ja <sup>1)</sup>	100%ZfP-V	CP A	D	mit WIG im Stegbereich, im Bauteil geschweißt			
6.9				nein	10%ZfP-V	CP B CP C1	E1+				
6.10				Sichtprüfung	CP C2	E1					
6.11				gleiche Blechdicken	Bauteilstoß	V-Naht	2a	Sichtprüfung	CP C2	F2	Nahtyp vermeiden, Wurzelanriss
6.12	 <p>Naht quer zur Krafrichtung, an Kreuzungsstellen von Gurtblechen ohne angeschweißte Blecken.</p>	V-Naht, Wurzelschweißung mit WIG V-Naht mit Gegenlage HV-Naht mit Gegenlage DV-Naht DHV-Naht	2a mit WIG-Wurzel 2c 3c 6 7	nein	Sichtprüfung	CP C2	E5	im Bauteil geschweißt			
6.13					gleiche Blechdicken	V-Naht Y-Naht	2a 4a	Sichtprüfung	CP C2	F2	Nahtypen vermeiden, Wurzelanriss

<sup>1)</sup> blecheben bearbeitet

## MKJ-Diagramm S355 Normalspannung



**Bild 1.** Zulässige Zug-Normalspannungen für S355.

$\sigma_{zul}(R_\sigma)$ ,  $R_\sigma \geq -1$ .

Streckgrenze  $R_e = 355$  MPa.

Grundwerkstoff:

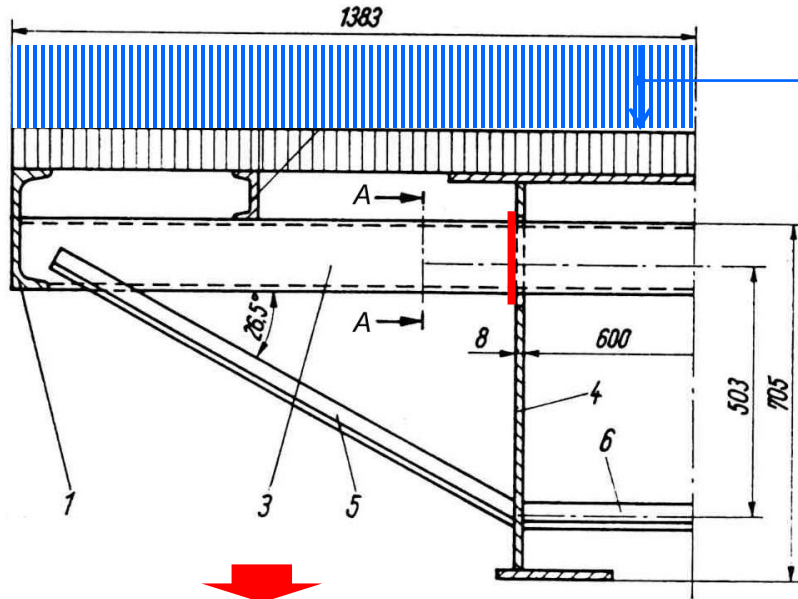
- Linie A+: reinigungsgestrahlt, ansonsten unbeeinflusst.
- Linie A: mit Walzhaut, nicht reinigungsgestrahlt, ansonsten unbeeinflusst.
- Linie AB: wärmebeeinflusst (thermisch getrennt, alle Qualitäten)

Schweißverbindungen:

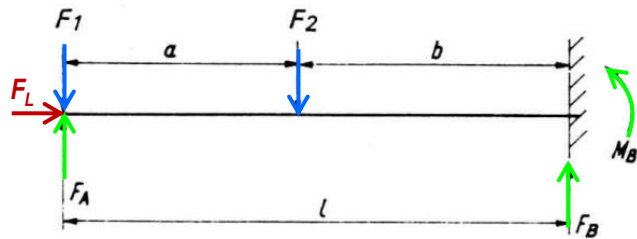
- Linien B bis F2: siehe Tabellen im Anhang B



# Folie Berechnungsbeispiel – Ersatzmodell



$$q = \frac{165 \text{ kN}}{1383 \text{ mm} \cdot 2} = 0,0597 \text{ kN/mm}$$



$$\begin{aligned} a &= 500 \text{ mm} \\ b &= 580 \text{ mm} \\ l &= 1080 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$F_1 \approx 250 \text{ mm} \cdot q = 14,91 \text{ kN}$$

$$F_2 \approx 500 \text{ mm} \cdot q = 29,82 \text{ kN}$$

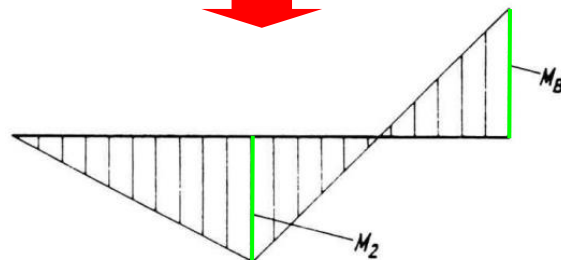
$$F_A = F_1 + F_2 \cdot \frac{b^2}{l^2} \cdot \left(1 - \frac{a}{2 \cdot l}\right) = 25,50 \text{ kN}$$

$$F_B = F_1 + F_2 - F_A = 19,23 \text{ kN}$$

$$F_L = F_A \cdot \cot 26,5^\circ = 51,14 \text{ kN}$$

$$M_2 = (F_A - F_1) \cdot a = 5295 \text{ kNmm}$$

$$M_B = (F_A - F_1) \cdot l - F_2 \cdot b = 5858 \text{ kNmm}$$



# Folie Berechnungsbeispiel – Nennspannungen Einspannstelle B

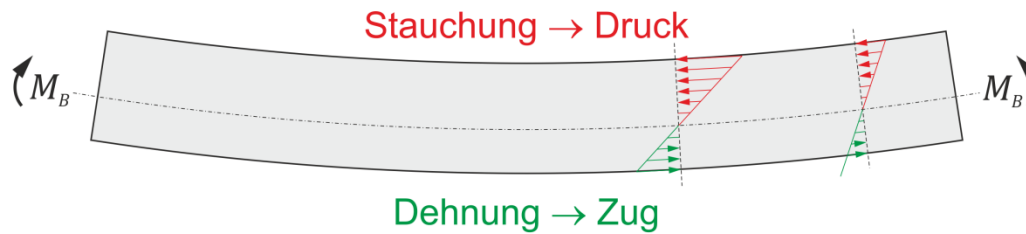
Längskraft



Zugspannung:

$$\sigma_Z = \frac{F_L}{A_{U140}} = 25,1 \text{ N/mm}^2$$

Biegung



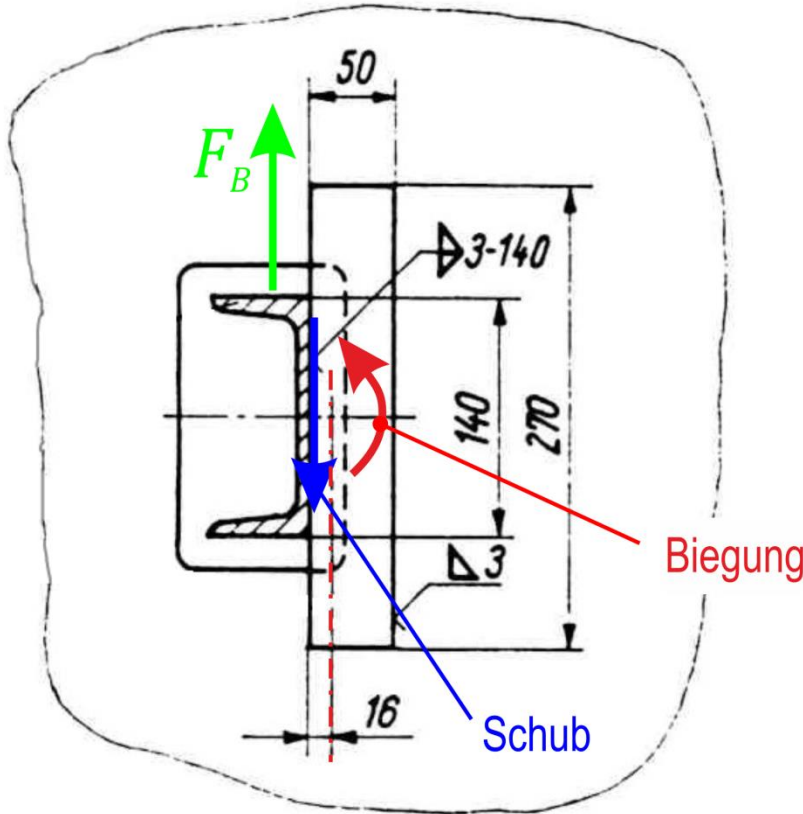
Biegespannung:

$$\sigma_B = \frac{M_B}{W_{x,U140}} = 67,8 \text{ N/mm}^2$$



Gesamtspannung:

$$\sigma_{ges} = \sigma_Z + \sigma_B = 92,9 \text{ N/mm}^2$$



Schweißnahtfläche:

$$A_{Schw} = 2 \cdot a \cdot h$$

$$A_{Schw} = 2 \cdot 3 \text{ mm} \cdot (140 \text{ mm} - 2 \cdot 3 \text{ mm}) = \mathbf{804 \text{ mm}^2}$$

Widerstandsmoment gegen Biegung:

$$w_{Schw} = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$w_{Schw} = \frac{2 \cdot 3 \text{ mm} \cdot (140 \text{ mm} - 2 \cdot 3 \text{ mm})^2}{6} = \mathbf{17.956 \text{ mm}^3}$$

Biegespannung in Schweißnaht:

$$\sigma_B = \frac{F_B \cdot e}{w_{Schw}} = \mathbf{17,1 \text{ N/mm}^2}$$

Schubspannung in Schweißnaht:

$$\tau = \frac{F_B}{A_{Schw}} = \mathbf{23,9 \text{ N/mm}^2}$$

Vergleichsspannung in Schweißnaht:

→ ebener Spannungszustand Gestaltänderungshypothese

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} = \mathbf{44,8 \text{ N/mm}^2}$$

# Folie Berechnungsbeispiel – Schweißnahtgüteklasse ↔ Prüfaufwand

Tabelle 3 — Zusammenhang zwischen Schweißnahtgüteklassen und Schweißnahtprüfklassen

Beanspruchungs- zustand	Sicher- heits- bedürfnis	Schweiß- naht- güte- klasse	Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten	Schweiß- naht- prüf- klasse	Volumetrische Prüfungen	Ober- flächen- prüfungen	Sicht- prüfung
			EN ISO 5817:2014 EN ISO 10042:2018 EN ISO 13919-1:2019 EN ISO 13919-2:2021	Mindest- anforde- rungen	min.	min.	min.
Hoch	Hoch	CP A	B <sup>a</sup>	CT 1	100 %	100 %	100 %
Hoch	Mittel	CP B2	B <sup>a</sup>	CT 2	10 %	10 %	100 %
Hoch	Niedrig	CP C2	C <sup>a</sup>	CT 3	Nicht erforder- lich	Nicht erforder- lich	100 %
Mittel	Hoch	CP B1	B <sup>a</sup>	CT 2	10 %	10 %	100 %
Mittel	Mittel	CP C2	C <sup>a</sup>	CT 3	Nicht erforder- lich	Nicht erforder- lich	100 %
Mittel	Niedrig	CP C3	C <sup>a</sup>	CT 4	Nicht erforder- lich	Nicht erforder- lich	100 %
Niedrig	Hoch	CP C1	C <sup>a</sup>	CT 2	10 %	10 %	100 %
Niedrig	Mittel	CP C3	C <sup>a</sup>	CT 4	Nicht erforder- lich	Nicht erforder- lich	100 %
Niedrig	Niedrig	CP D	D <sup>a</sup>	CT 4	Nicht erforder- lich	Nicht erforder- lich	100 %

<sup>a</sup> Einzelheiten siehe Tabelle 4 bis Tabelle 6

(Quelle: DIN EN 15085-3:2023-02)

# Folie Berechnungsbeispiel – Zulässige Spannungen nach DVS 1612 (I)

Tabelle B-1.3. Längsbeanspruchte T-Stoßverbindungen.

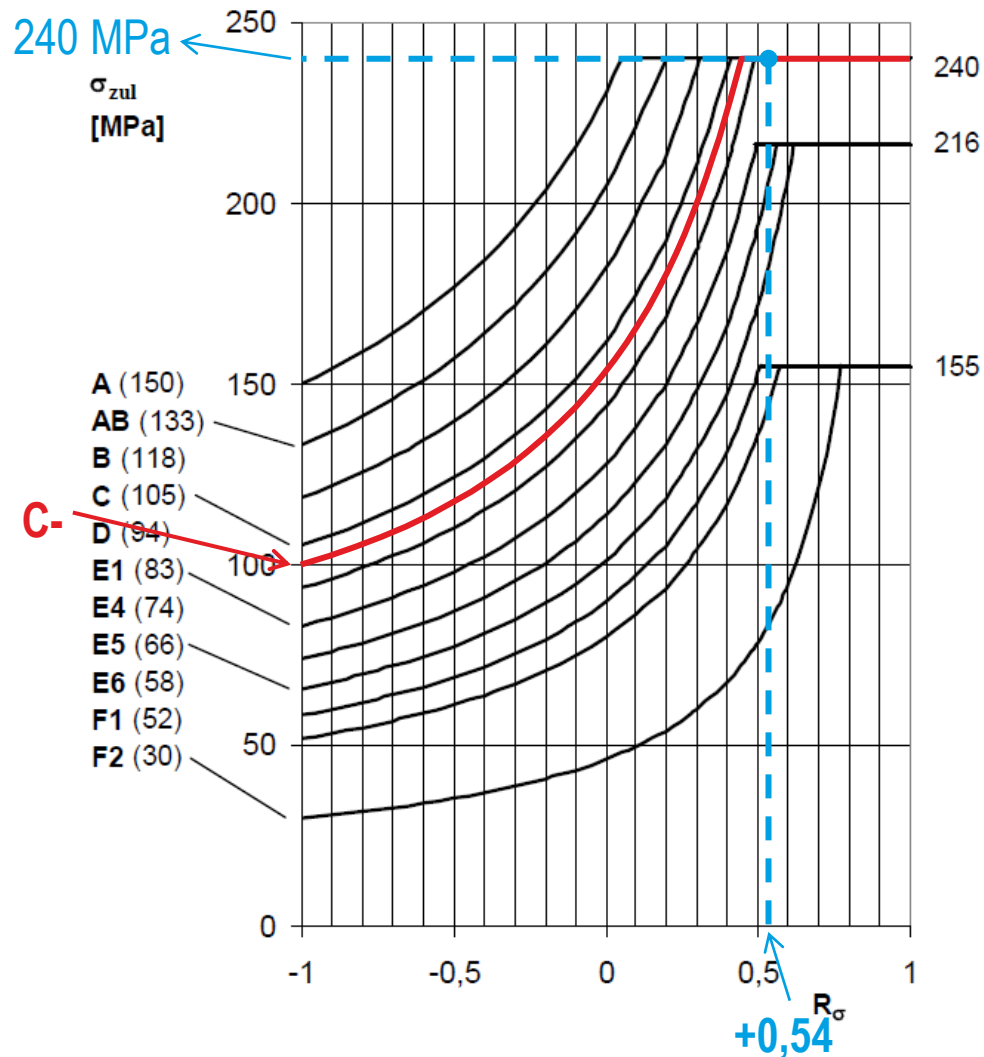
Nr.	Stoß- und Nahtausbildung				Prüfart und -umfang	Schweißnahtgüteklasse nach DIN EN 15085-3	Kerfalllinie	Bemerkungen	
	Darstellung	Beschreibung	Nahtart	Naht-Nr. nach DIN EN 15085-3					Nahtoberfläche bearbeitet
1.3.1		beidseitig durchgeschweißt mit Gegenlage	DHV-Naht HV-Naht mit Kehlnaht als Gegenlage HV-Naht mit Gegenlage	7 10b	ja	100% ZfP-V	CP A	B+	
1.3.2						10% ZfP-V	CP B u. CP C1	B	
1.3.3						Sichtprüfung	CP C2	B-	
1.3.4					nein	100% ZfP-V	CP A	C+	
1.3.5						10% ZfP-V	CP B u. CP C1	C	
1.3.6						Sichtprüfung	CP C2	C-	
1.3.7		einseitig durchgeschweißt	HV-Naht HV-Naht mit aufgesetzter Kehlnaht HV-Naht mit Badsicherung	10a <sup>1)</sup> 10c <sup>1)</sup>  10e <sup>1)</sup>	ja	100% ZfP-V	CP A	B+	
1.3.8						10% ZfP-V	CP B u. CP C1	B	
1.3.9						Sichtprüfung	CP C2	B-	
1.3.10					nein	100% ZfP-V	CP A	C+	
1.3.11						10% ZfP-V	CP B u. CP C1	C	
1.3.12						Sichtprüfung	CP C2	C-	
1.3.13		beidseitig nicht durchgeschweißt	DHY-Naht HY-Naht mit Kehlnaht als Gegenlage Doppelkehlnaht	9 11b  13b	ja	10% ZfP-O	CP B u. CP C1	B	
1.3.14						Sichtprüfung	CP C2	B-	
1.3.15					nein	10% ZfP-O	CP B u. CP C1	C	
1.3.16	Sichtprüfung	CP C2	C-						

<sup>1)</sup> HV-Naht ohne Gegenlage mit sicherer Wurzeleinfassung durch konstruktive, fertigungs- u. prüftechnische Maßnahmen (Nachweis über Arbeitsproben, vgl. DIN EN 15085-3)



# Folie Berechnungsbeispiel – Zulässige Spannungen nach DVS 1612 (II)

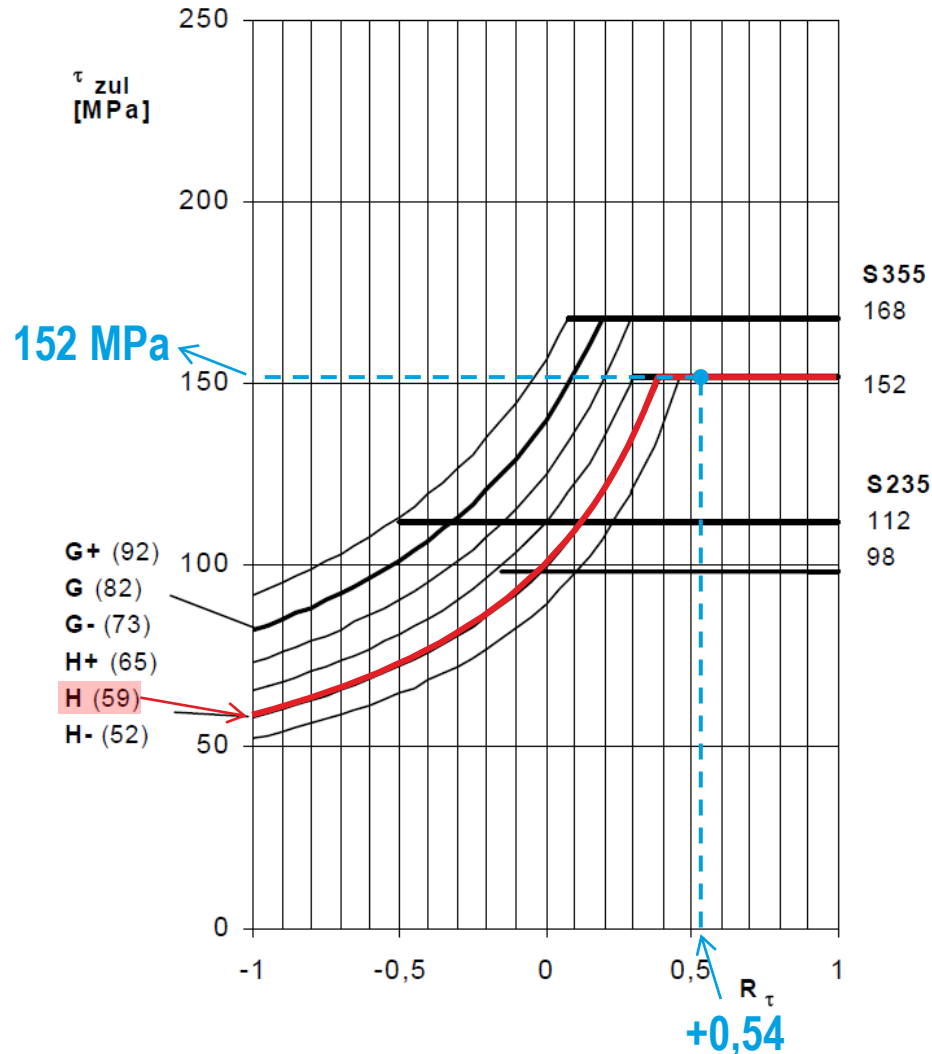
MKJ-Diagramm S355 Normalspannung



**Bild 1.** Zulässige Zug-Normalspannungen für S355.  
 $\sigma_{zul}(R_\sigma)$ ,  $R_\sigma \geq -1$ .  
 Streckgrenze  $R_e = 355$  MPa.  
 Grundwerkstoff:  
 – Linie A+: reinigungsgestrahlt, ansonsten unbeeinflusst.  
 – Linie A: mit Walzhaut, nicht reinigungsgestrahlt, ansonsten unbeeinflusst.  
 – Linie AB: wärmebeeinflusst (thermisch getrennt, alle Qualitäten)  
 Schweißverbindungen:  
 – Linien B bis F2: siehe Tabellen im Anhang B

# Folie Berechnungsbeispiel – Zulässige Spannungen nach DVS 1612 (III)

MKJ-Diagramm S355 / S235 Schubspannung



**Bild 3.** Zulässige Schubspannungen für S355 und S235.  
 $\tau_{zul}(R_\tau)$ ,  $R_\tau \geq -1$ .  
 Das Diagramm ist symmetrisch zu  $R_\tau = -1$ .  
 Linie G+: Grundwerkstoff:  
 – reinigungsgestrahlt, ansonsten unbeeinflusst,  
 – mit Walzhaut, nicht reinigungsgestrahlt, ansonsten unbeeinflusst,  
 – wärmebeeinflusst (thermisches Trennen, alle Qualitäten).  
 Linie G: durchgeschweißte Stumpfstoßverbindungen  
 Linie G-: nicht durchgeschweißte Stumpfstoßverbindungen  
 Linie H+: durchgeschweißte T-Stoßverbindungen  
 Linie H: beidseitig nicht durchgeschweißte T-Stoßverbindungen  
 Linie H-: einseitig nicht durchgeschweißte T-Stoßverbindungen

**Tabelle 1 — Beanspruchungszustände**

Beanspruchungszustand	Ausnutzung der Beanspruchbarkeit (S)
Hoch	$\geq 0,9$
Mittel	$0,75 \leq S < 0,9$
Niedrig	$\leq 0,75$

**sichere Seite**



- Einspannstelle B des Querträgers:

- $\sigma_{max} = (1 + 0,3) \cdot \sigma_{ges} = 1,3 \cdot 92,9 = \mathbf{120,8 \text{ N/mm}^2} = \sigma_{vorh}$

- **Nachweis:**

$$\sigma_{vorh} = 120,8 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{zul} = 180 \text{ N/mm}^2$$

- Schweißnaht Querträger – Lasche:

- $\sigma_{max} = (1 + 0,3) \cdot \sigma_B = 1,3 \cdot 17,1 = \mathbf{22,2 \text{ N/mm}^2} = \sigma_{vorh}$

$$\tau_{max} = (1 + 0,3) \cdot \tau = 1,3 \cdot 23,9 = \mathbf{31,1 \text{ N/mm}^2} = \tau_{vorh}$$

$$\sigma_{V,max} = (1 + 0,3) \cdot \sigma_V = 1,3 \cdot 44,8 = \mathbf{58,2 \text{ N/mm}^2} = \sigma_{V,vorh}$$

- **Nachweise:**

$$\sigma_{vorh} = 22,2 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{zul} = 180 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{vorh} = 31,2 \text{ N/mm}^2 < \tau_{zul} = 114 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{V,vorh} = 58,2 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{zul} = 180 \text{ N/mm}^2$$

→ **Auslastung ≈ 67 %**

→ **Auslastung: ≈ 12 %**

→ **Auslastung: ≈ 27 %**

→ **Auslastung: ≈ 32 %**

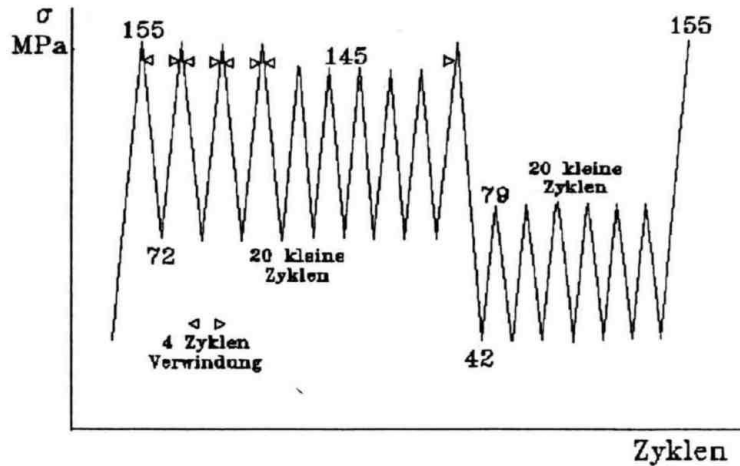
- **Einschätzung:** ←

- Querschnitt / Schweißnaht hinreichend ausgelegt

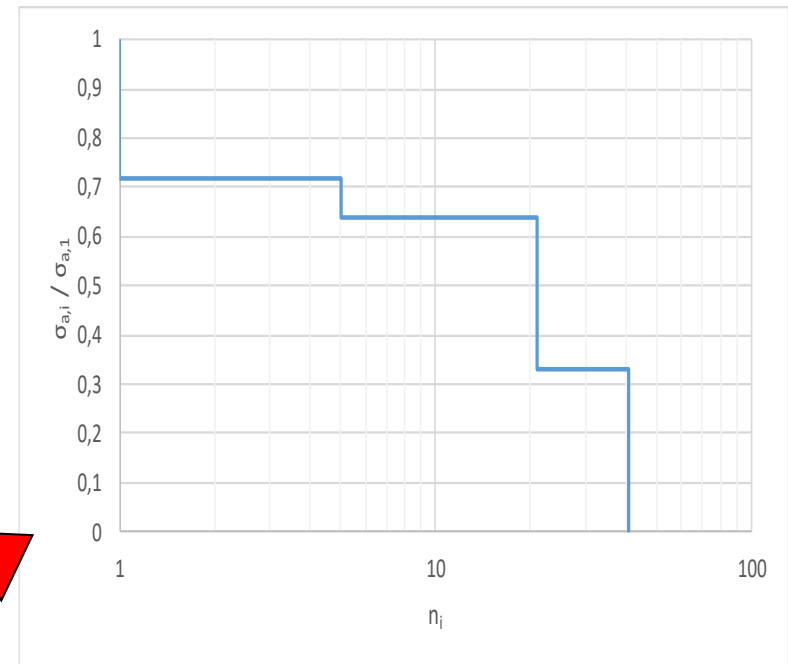
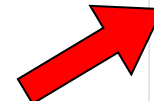
- keine Überarbeitung/Umkonstruktion notwendig

# Folie Belastungskollektiv

Spannungen bei Belastungsversuch (UIC 510-3, nur Druckspannungen) an Drehgestellrahmen  
 → Umwandlung in 4-stufiges Spannungskollektiv

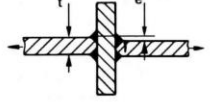
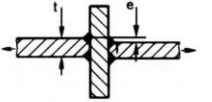
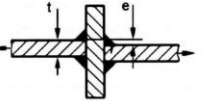

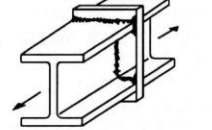


$i$	$\sigma_{\min,i}$	$\sigma_{\max,i}$	$\Delta\sigma_i$	$\sigma_{a,i}$	$\sigma_{a,i} / \sigma_{a,1}$	$n_i$
1	42	155	113	58	1,00	1
2	72	155	83	42	0,72	4
3	72	145	73	37	0,64	16
4	42	79	37	19	0,33	20
$\Sigma$						41



(Quelle: Hänel: Vortrag 4.Fachtagung „Fügen und Konstruieren im Schienenfahrzeugbau“ SLV Halle)

# Folie Bauteilkatalog + Wöhlerliniensystem IIW (Stahl)

Nr.	Konstruktives Detail (Stahl)	Beschreibung	FAT
400	<b>Kreuzstöße und/oder T-Stöße</b>		
411		Kreuzstoß oder T-Stoß, K-Naht voll durchgeschweißt, kein Lamellenriß, Kantenversatz $e < 0.15 \cdot t$ , Nahtübergang beschliffen, Blechriß	80
412		Kreuzstoß oder T-Stoß, K-Naht voll durchgeschweißt, kein Lamellenriß, Kantenversatz $e < 0.15 \cdot t$ , Blechriß	71
413		Kreuzstoß oder T-Stoß, Kehlnaht oder teilweise durchgeschweißte K-Naht, kein Lamellenriß, Kantenversatz $e < 0.15 \cdot t$ , Blechriß	63
414		Kreuzstoß oder T-Stoß, Kehlnaht oder K-Naht, auch beschliffene Nähte, Wurzelriß in der Naht. Spannung in der Schweißnaht.	45
421		Stoß eines Walzprofils mit Zwischenplatte, Kehlnaht, Wurzelriß in der Naht. Spannung in der Schweißnaht.	45

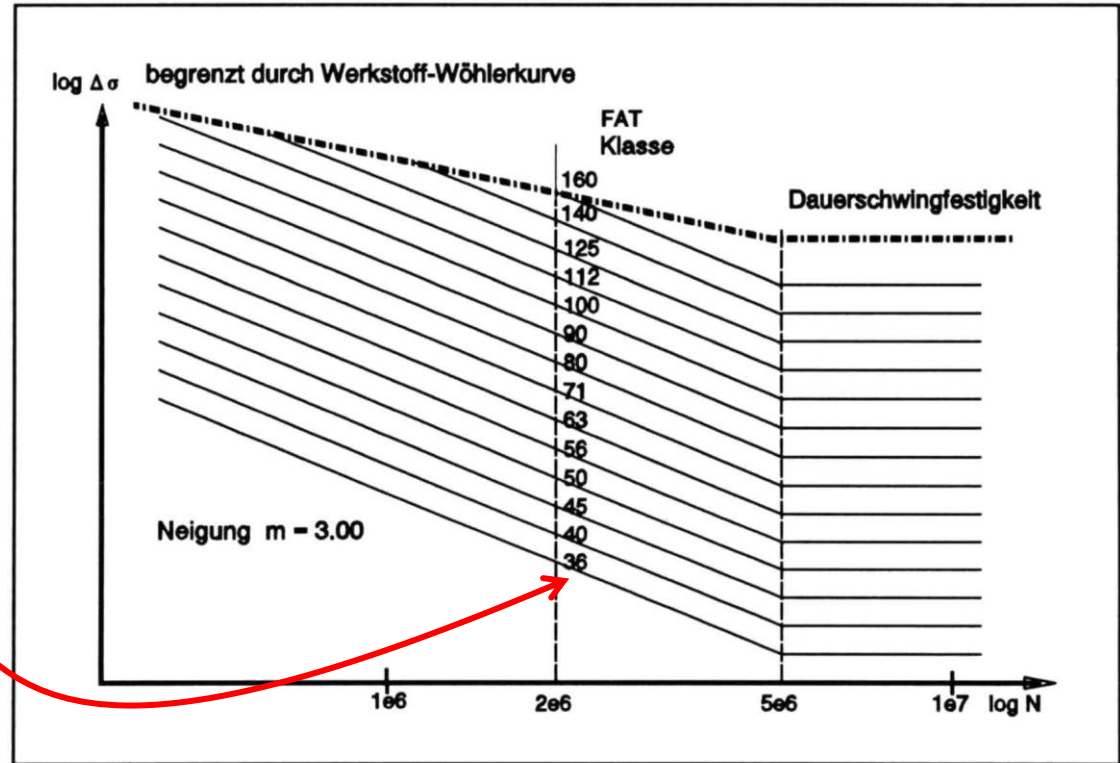


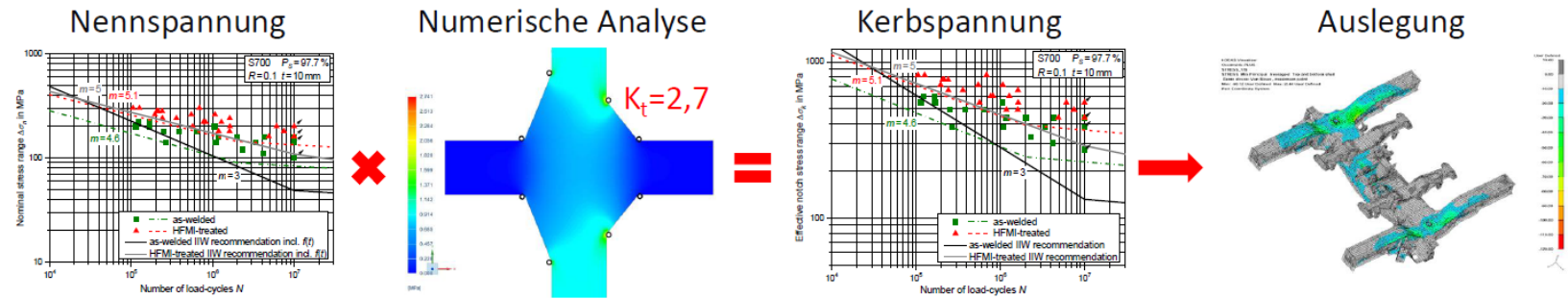
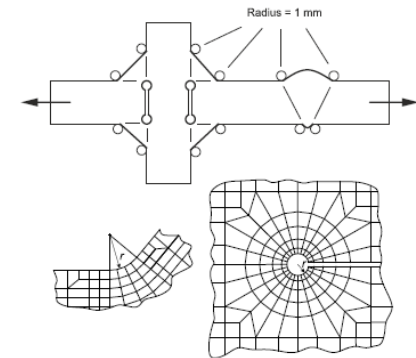
Bild (3.2)-1: Wöhlerkurven für Normalspannungen (Stahl)

(Quelle: Hobbacher: Empfehlungen zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile)

- Miner elementar (lineare Schadensakkumulations-Hypothese nach Palmgren und Miner):
  - Annahmen:
    - alle Kollektivstufen erbringen „gleichberechtigten“ Schädigungsanteil
    - alle auftretenden Schwingungsamplituden übersteigen Dauerfestigkeit bzw. keine Dauerfestigkeitsgrenze
  - oft zu pessimistisch → ermittelter Spannungswert zur sicheren Seite tendierend
- Miner original:
  - Beanspruchung unterhalb der Dauerfestigkeit kann beliebig oft ohne Bruch ertragen werden  
↳ Kollektivstufen unterhalb der Dauerfestigkeit erbringen keinen Schädigungsanteil
- Miner erweitert:
  - nur Kollektivstufen, deren Summe der Schwingspielzahlen  $\leq$  Schwingspielzahl der Dauerfestigkeit ND tragen zur Schädigung bei  
↳ über ND hinausgehende Kollektivstufe werden bei ND abgeschnitten
- Miner konsequent:
  - Dauerfestigkeitsabfall infolge fortschreitender Schädigung
  - Schrittweise Berechnung nach Regel → Schädigung nur durch Kollektivstufen, die oberhalb der aktuellen, abgeminderten Dauerfestigkeit liegen
- ...

## Lokale Auslegungsmethodik

- Modellierung von Nahtübergang und Wurzeln mit fiktivem Kerbradius von  $r=1mm$  nach dem effektiven Kerbspannungskonzept (Mikrostützwirkung)
- Richtlinien zur einheitlichen FE-Modellierung (Vernetzung, Elementtyp)
- Anwendung von Spannungskonzentrationsfaktor  $K_t$  auf Versuchsergebnisse in Nennspannungen ergibt entsprechende Kerbspannungswöhlerlinien
- Auslegung komplexer Schweißstrukturen anhand globaler Modelle unter Anwendung von Submodellen zur lokalen Bewertung einzelner Details



[Brunnhöfer et al., Procedia Structural Integrity 38, 2022 / Siemens Mobility / Hobbacher, Springer, 2016]

Betriebsfestigkeit und Leichtbau am Beispiel Drehgestell  
Leitner et al., 04.04.2022

(Quelle: Vortrag Leitner: Betriebsfestigkeit und Leichtbau ..., Graz 2022)