

Statischer Festigkeitsnachweis von Schweissnähten

mit örtlichen Spannungen nach FKM

Beat Schmied, Schmied Engineering GmbH, CH-4563 Gerlafingen
www.schmied-engineering.ch

Inhaltsverzeichnis

- Einleitung / Definitionen
- Statischer Nachweis nach FKM mit Strukturspannungen
- Ansatz für Kerbspannungsmodelle
- Beispiel
- Verschiedenes

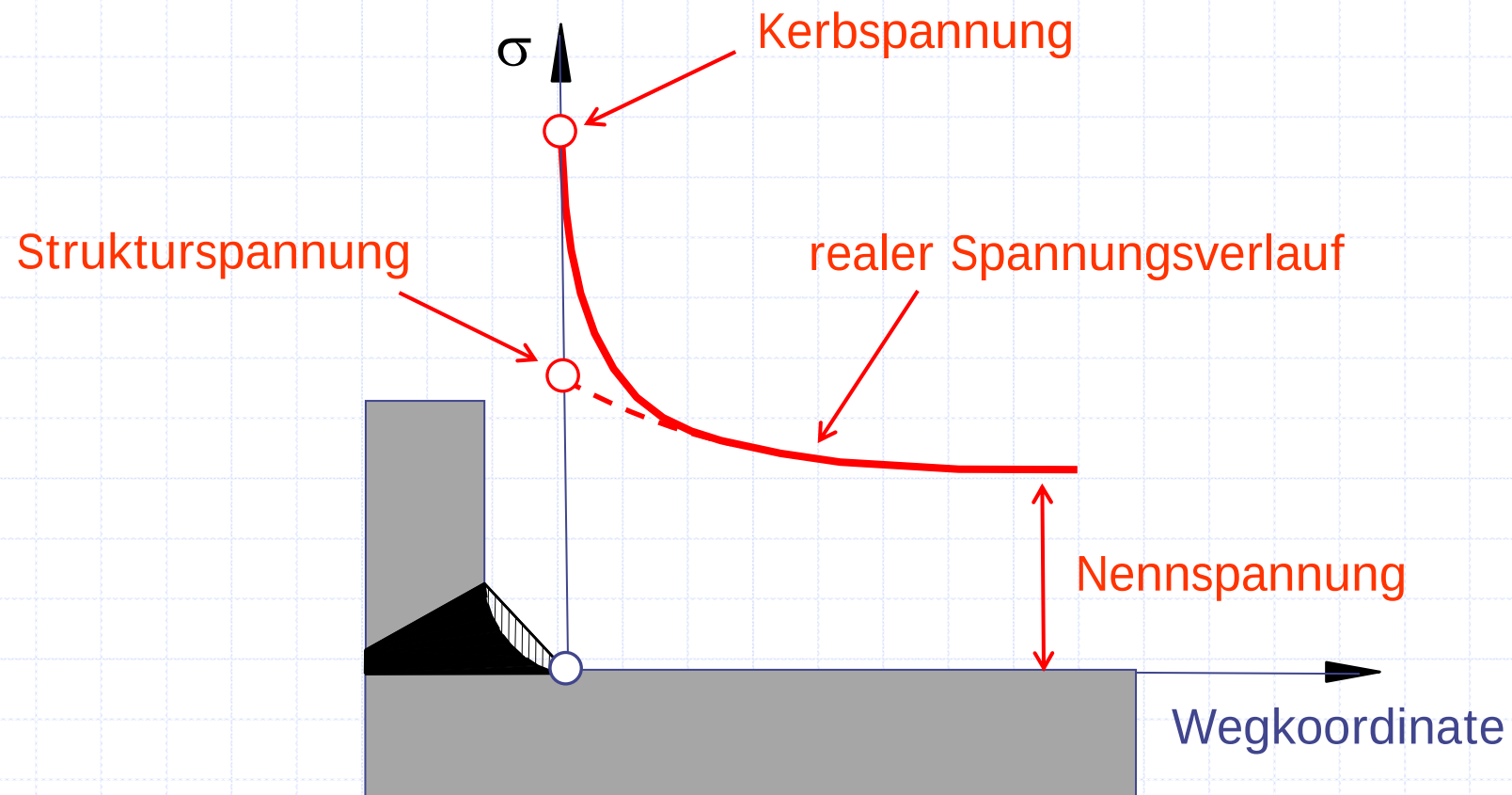
Einleitung / Definitionen

Einleitung

- Ist bei Schweissnähten vom statischen Nachweis die Rede, ist fast immer der Nachweis mit Nennspannungen gemeint (z.B. DIN 18800, EN 13445).
- Die örtlichen Spannungen haben in der Praxis erst wenig Anwendung gefunden. Die FKM-Richtlinie bietet diesbezüglich einen Ansatz.
- In Kombination mit FE-Simulationen beinhaltet der FKM-Ansatz aber Schwächen.
- Für das erweiterte CADFEM-Seminar „Schweissnahtberechnung“ erarbeiteten wir von Schmied Engineering ein angepasstes Vorgehen.
- Im soeben erschienenen Forschungsbericht der FKM (Lit. 2) ist der statische Nachweis für Schweissnähte eines der Hauptthemen. Es ist deshalb zu erwarten, dass die nächste Ausgabe der FKM-Richtlinie diesbezüglich Verbesserungen bringt.

Einleitung

Spannungsdefinitionen

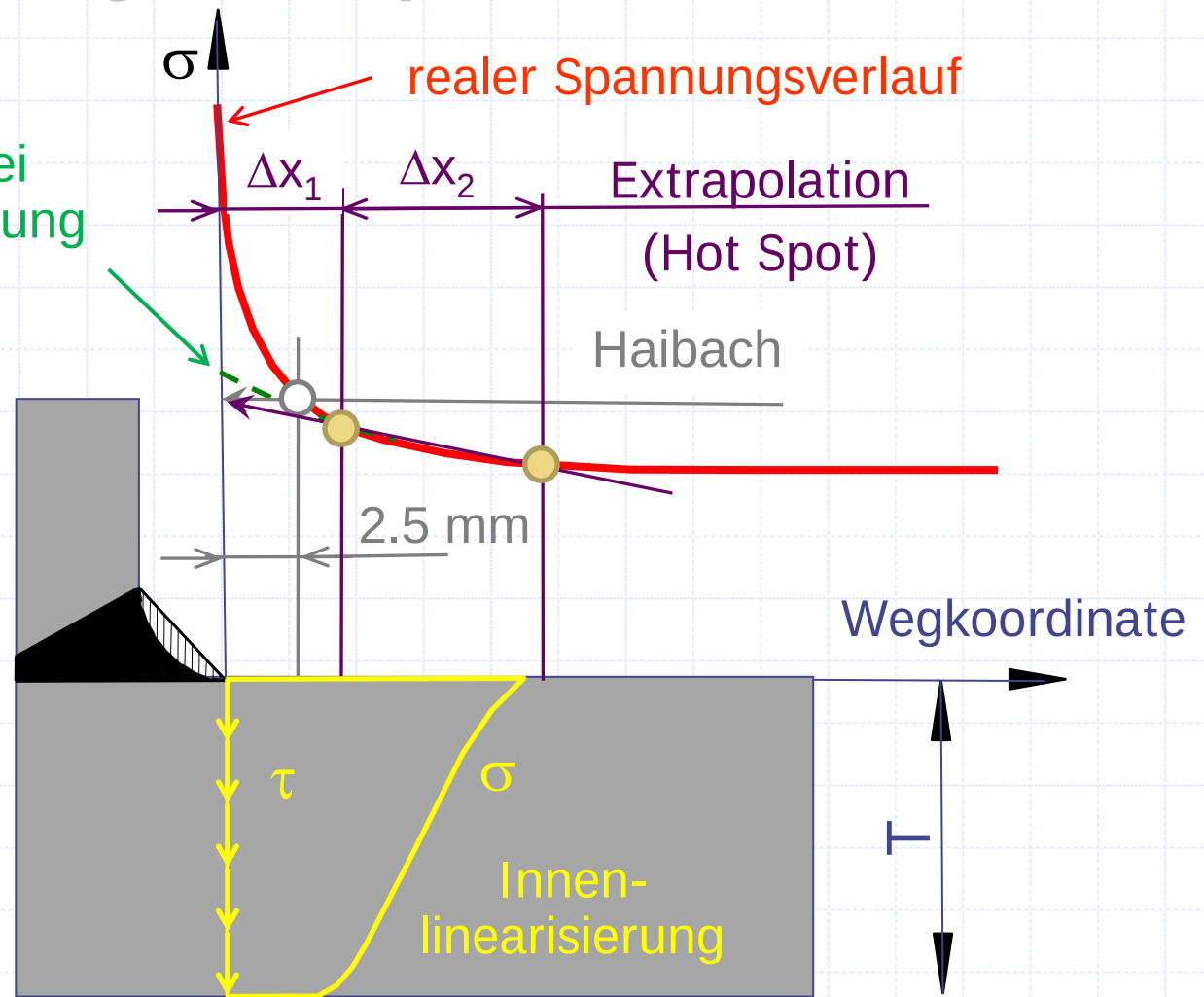


Einleitung

Strukturspannungskonzept - Methoden

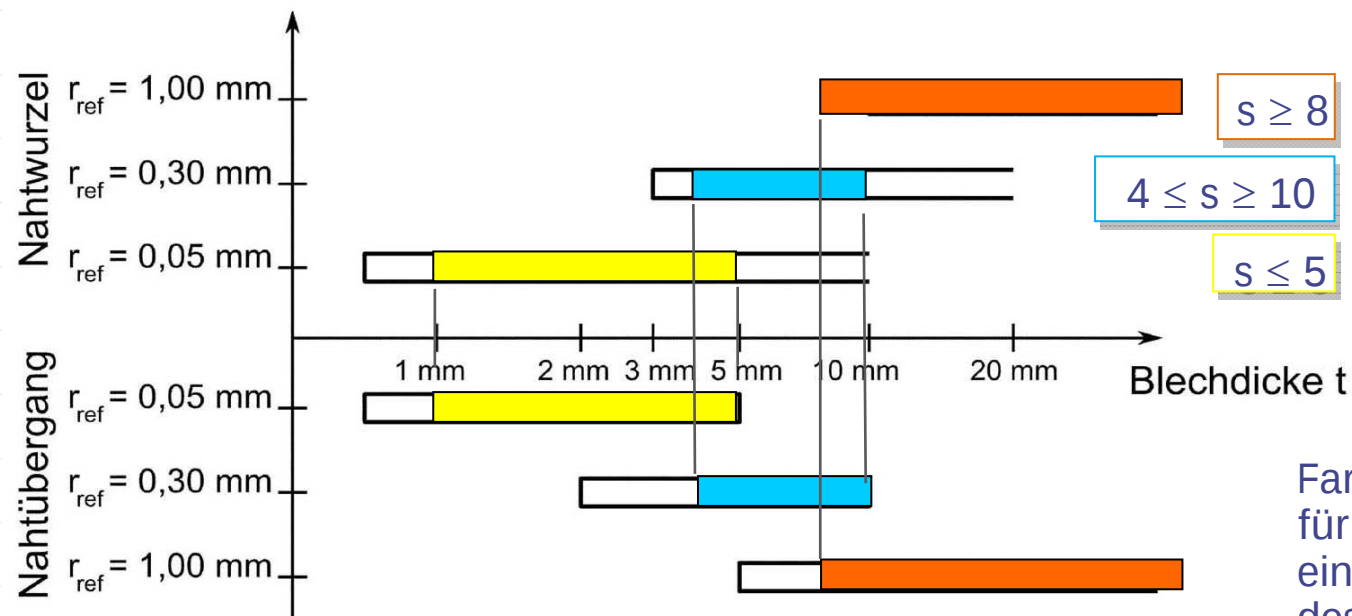
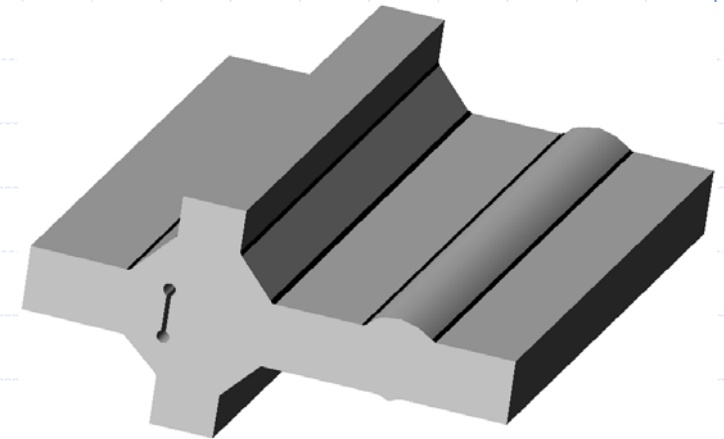
Spannungsverlauf bei
fiktiver Nahtausrundung
CAB

Für Strukturspannungsnachweise ist die Naht immer zu modellieren.



Kerbspannungskonzept

Die FKM definiert den klassischen Radius R1. Bei dünnen Blechen wird dadurch aber das Flächenverhältnis verfälscht. In [Lit. 3] sind die Referenzradien 0.05 und 0.3 mm mit den zugehörigen FAT-Klassen definiert.



Farbbalken:
für Übergang und Wurzel
einheitliche Empfehlungen
des Referenten

Statischer Nachweis

mit örtlichen Spannungen nach FKM

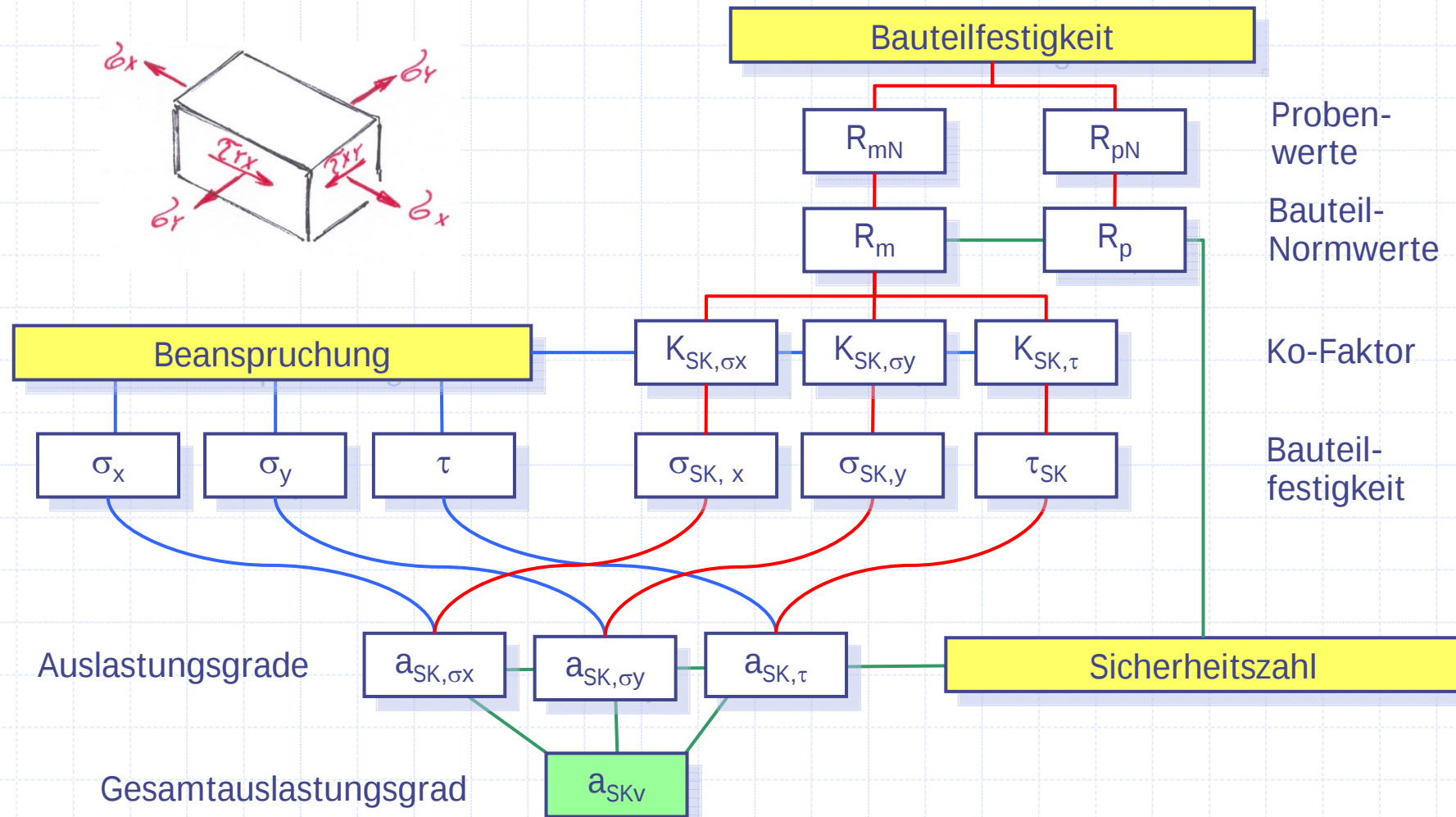
Festlegungen der FKM

- Der statische Nachweis von Schweißnähten ist mit Nenn- oder Strukturspannungen, jedoch nicht mit Kerbspannungen zu führen.
- Volumenförmige Bauteile sind wie flächenförmige zu behandeln.
- Nahtübergänge werden wie ungeschweisste Bauteile beurteilt.
- Für Nahtwurzeln besteht eine spezielle Nachweismethode.
- Schweißeigenspannungen werden vernachlässigt.

Schwierigkeiten bei der Umsetzung

- Für die Wurzel ist noch kein Strukturspannungskonzept anerkannt.
- Wird für den Ermüdungsnachweis das Kerbspannungsmodell verwendet, ist für den statischen Nachweis ein zweites Modell nötig.

Ablauf für flächenförmige Bauteile



Konstruktionsfaktor K_{SK}

**Naht-
übergang**

$$K_{SK,\sigma x} = \frac{1}{n_{pl,\sigma x}}$$

$$K_{SK,\sigma y} = \frac{1}{n_{pl,\sigma y}}$$

$$K_{SK,\tau} = 1$$

**Naht-
wurzel**

$$K_{SK,\sigma x} = \frac{1}{n_{pl,\sigma x} \cdot \alpha_w}$$

$$K_{SK,\sigma y} = \frac{1}{n_{pl,\sigma y} \cdot \alpha_w}$$

$$K_{SK,\tau} = \frac{1}{\alpha_w}$$

Schweissnahtfaktor α_w	Nahtgüte nachgewiesen	Spannungsart	Zugfestigkeit MPa	
			≤ 360	> 360
durchgeschweisst oder gegengeschweisst	nicht relevant	Druck	1.0	1.0
	ja	Zug		
	nein			
nicht durchgeschweisst oder Kehlnaht	nicht relevant	Zug oder Druck	0.95 (Stahl) (0.80 Alu)	0.80
alle	nicht relevant	Schub		

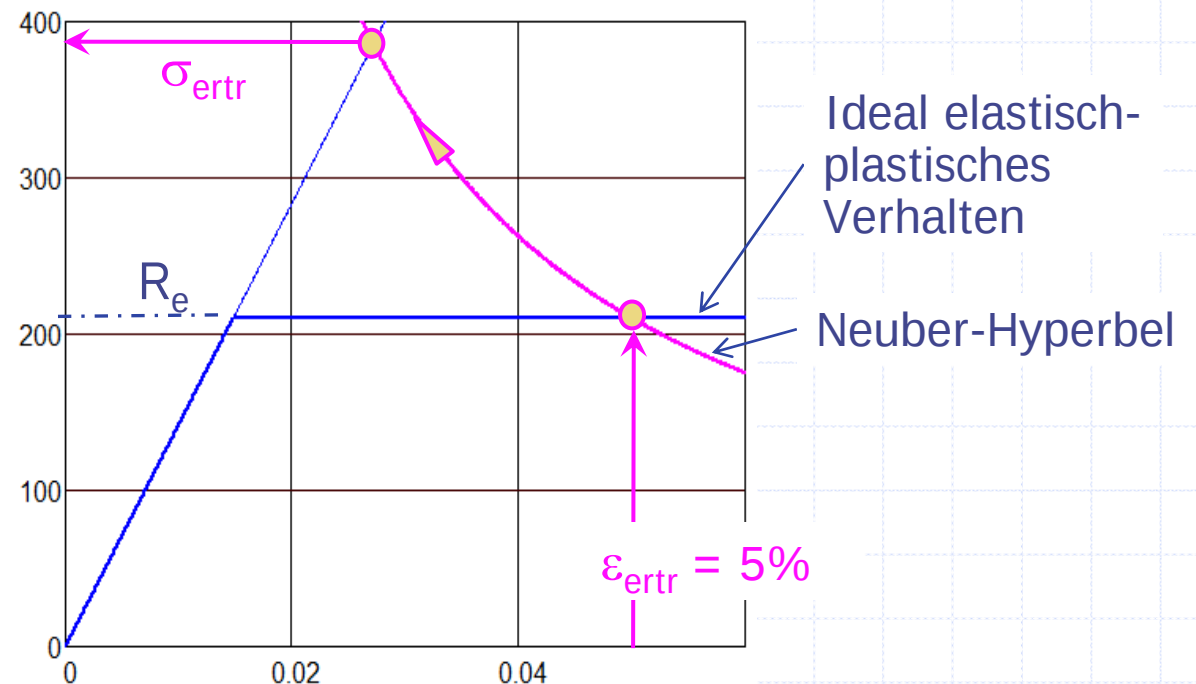
Plastische Stützzahl n_{pl}

Das Ausschöpfen der plastischen Tragreserven wird einerseits durch den Werkstoff (örtliches Versagen; K_w) und andererseits durch das Bauteil und die Belastung (globales Versagen; K_p) begrenzt.

$$n_{pl} = \min(K_p; K_w)$$

Die örtlich ertragbare Gesamtdehnung darf bei Stahl bis zu 5% betragen.

$$K_w = \sqrt{\frac{E \cdot \varepsilon_{ertr}}{R_e}} = \frac{\sigma_{ertr}}{R_e}$$



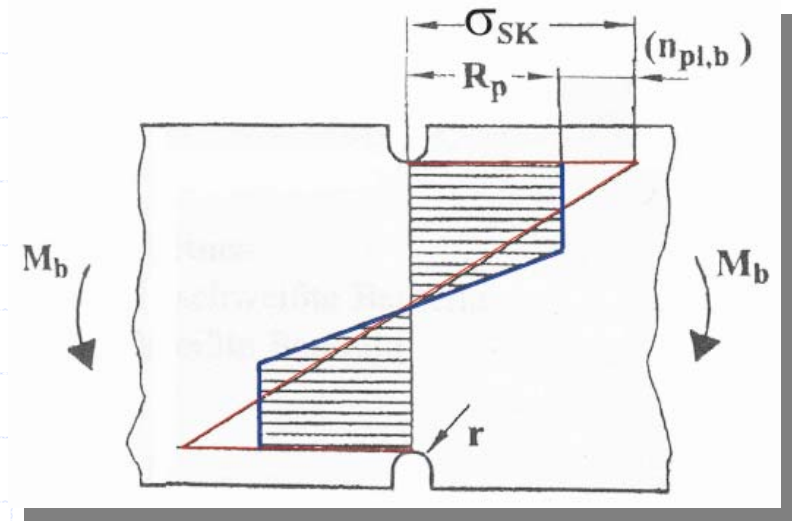
Plastische Formzahl K_p

Das globale Versagen tritt ein, sobald im Querschnitt der vollplastische Zustand erreicht wird.

$$K_p = \frac{\text{voll-plastische Grenzlast}}{\text{elastische Grenzlast}}$$

Für Nennspannungen sind die Formzahlen bekannt, z.B.
1.5 für Rechteckquerschnitt
unter Biegebelastung.

Bei den Kerbspannungen ist die vollplastische Traglast iterativ mit einer elastisch-idealplastischen Spannungs-Dehnungskurve zu ermitteln.



Besonderheiten beim Nachweis der Nahtwurzel

- Die FKM definiert für die Nahtwurzel eine ganz spezielle Art der **Spannungsberechnung** mit **Lastarten** und der Bildung von sogenannten **Vergleichsstrukturspannungen**. Mit letzteren ist dann der Nachweis zu führen. Für FE-Simulationen ist diese Definition kaum praktikabel. Wir unterscheiden deshalb bei der Berechnung der Strukturspannungen nicht zwischen Übergang und Wurzel.
- Auf den Schweissnahtfaktor α_w wurde bereits hingewiesen.
- Bei der Bildung des Gesamtauslastungsgrads wird für den Übergang die Gestaltänderungsenergiehypothese verwendet; für die Wurzel ein abgewandelter, konservativerer Ansatz.

Nahtübergang

$$a_{SK,\sigma v} = \sqrt{a_{SK,\sigma x}^2 + a_{SK,\sigma y}^2 - a_{SK,\sigma x} \cdot a_{SK,\sigma y} + a_{SK,\tau}^2} \leq 1$$

Nahtwurzel

$$a_{SK,\sigma v} = \sqrt{a_{SK,\sigma x}^2 + a_{SK,\sigma y}^2 + a_{SK,\tau}^2} \leq 1$$

Ansatz Schmied

**Strukturspannungsnachweis
basierend auf Kerbspannungsmodell**

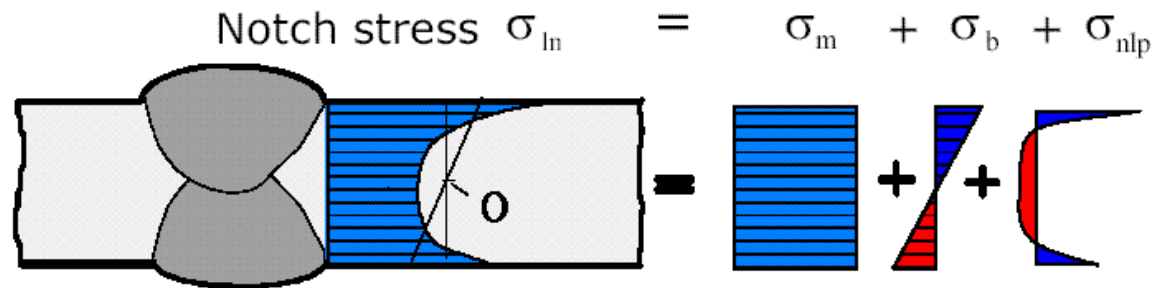
Festlegungen

Wird der Ermüdungsnachweis mit einem Kerbspannungsmodell geführt, sollen aus diesem Modell alle relevanten Parameter für den statischen Nachweis mit Strukturspannungen gewonnen werden können.

1. Der Nachweis erfolgt, wie es die FKM definiert, für flächenförmige Bauteile mit den Strukturspannungskomponenten σ_x , σ_y und τ .
2. Die Strukturspannungen werden mittels der Innenlinearisierung gewonnen.
3. Die plastische Formzahl wird für die Strukturspannung ermittelt.
4. Abweichung zur FKM für die Nahtwurzel: Der Ansatz mit der Strukturvergleichsspannung pro Lastart wird NICHT angewendet.

Strukturspannung mittels Innenlinearisierung

Seit der Version 12 ist die Spannungslinearisierung entlang eines vorgegebenen Pfads auch in Workbench möglich.

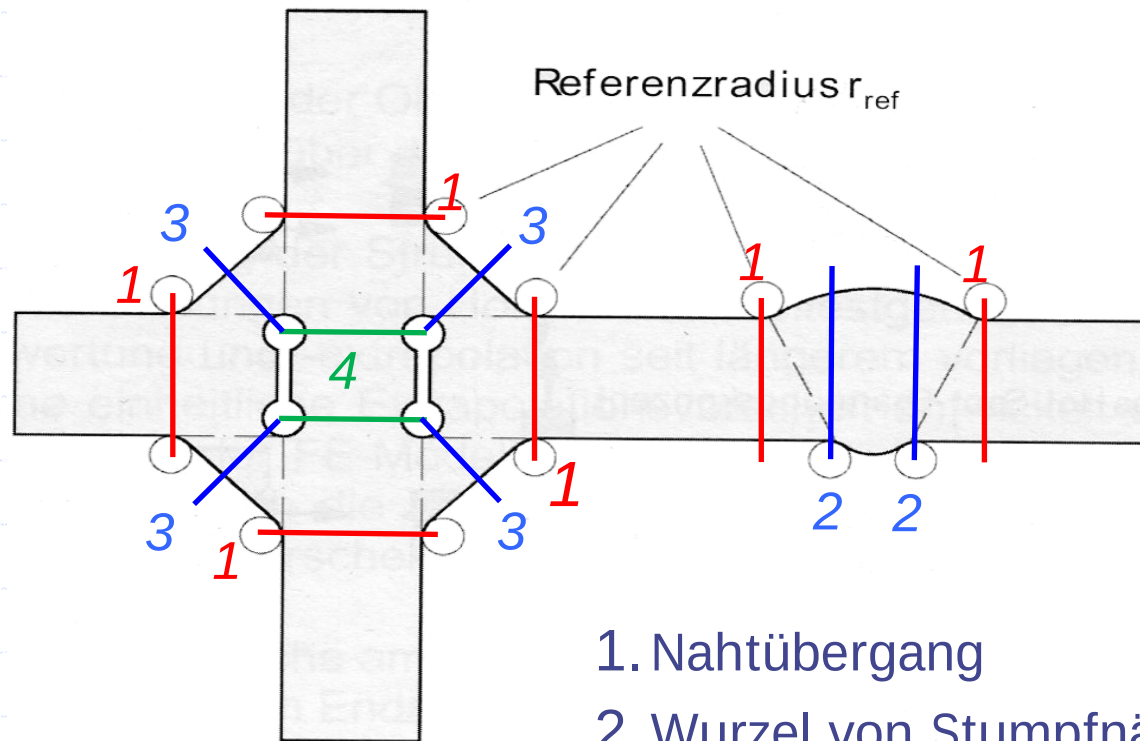


$$\sigma_{struktur} = \sigma_m + \sigma_b$$

Vorsicht: Singularitäten verfälschen die Linearisierung (Lit. 4).

Bei Kerbspannungsmodellen stellt sich dieses Problem dank den Verrundungen mit den Referenzradien jedoch nicht.

Linearisierungspfade



- 1. Nahtübergang
- 2. Wurzel von Stumpfnähten
- 3. Wurzel von Kehlnähten
- 4. Wurzel von Kehlnähten (unbelastetes Anschweissteil)

Plastische Formzahl K_p für Strukturspannung

Basis bilden die bekannten plastischen Formzahlen für Nennspannungen und den Rechteckquerschnitt:

- Membranspannung $K_{p0,zd} = 1.0$
- Biegespannung $K_{p0,b} = 1.5$
- Schubbelastung $K_{p0,\tau} = 1.0$

Kombination von Membran- und Biegespannung

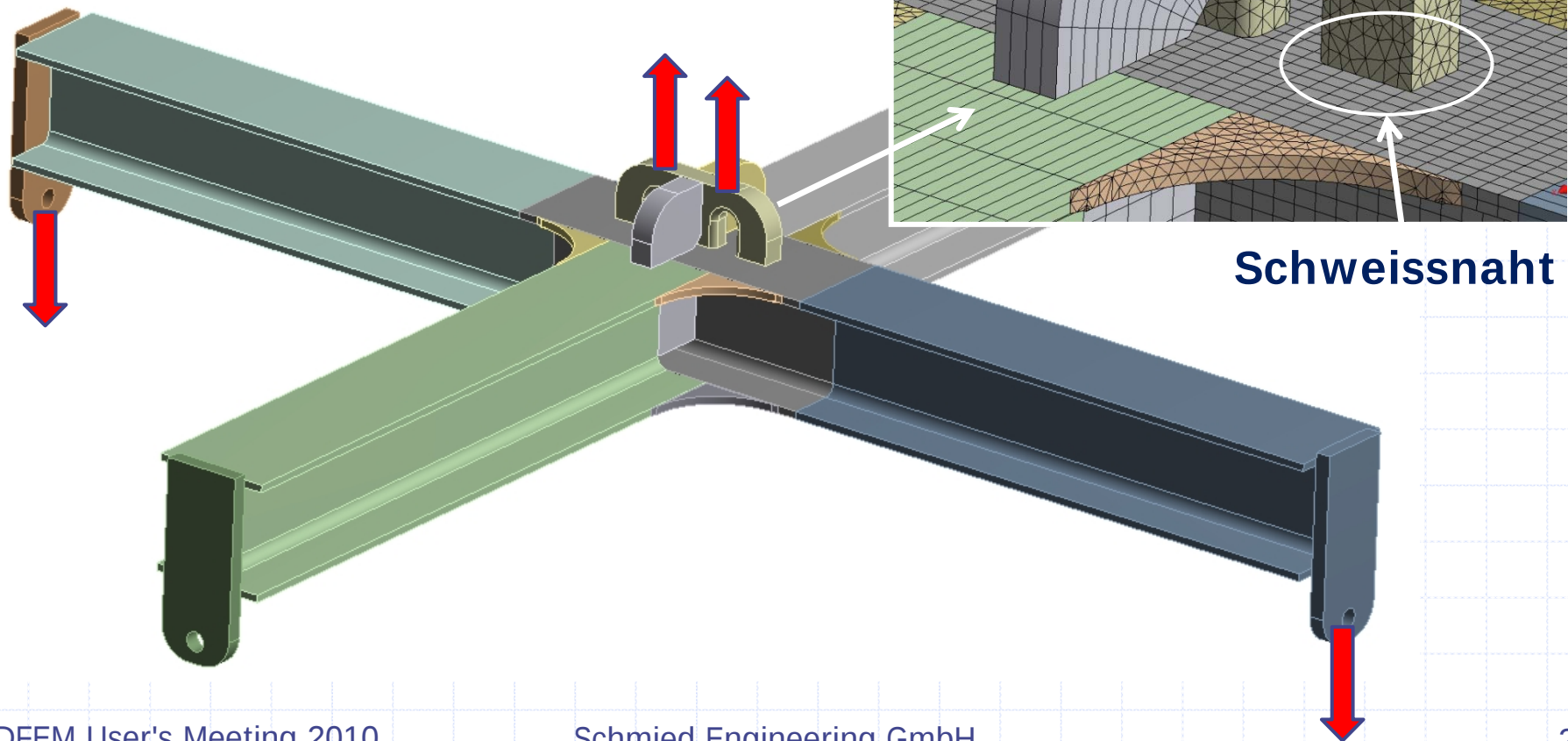
$$K_{p,\sigma} = \frac{\sigma_m \cdot K_{p0,zd} + \sigma_b \cdot K_{p0,b}}{\sigma_m + \sigma_b} = \frac{\sigma_m + 1.5 \cdot \sigma_b}{\sigma_m + \sigma_b} \leq 1.5$$

$$K_{p,\tau} = 1$$

Beispiel

Beispiel

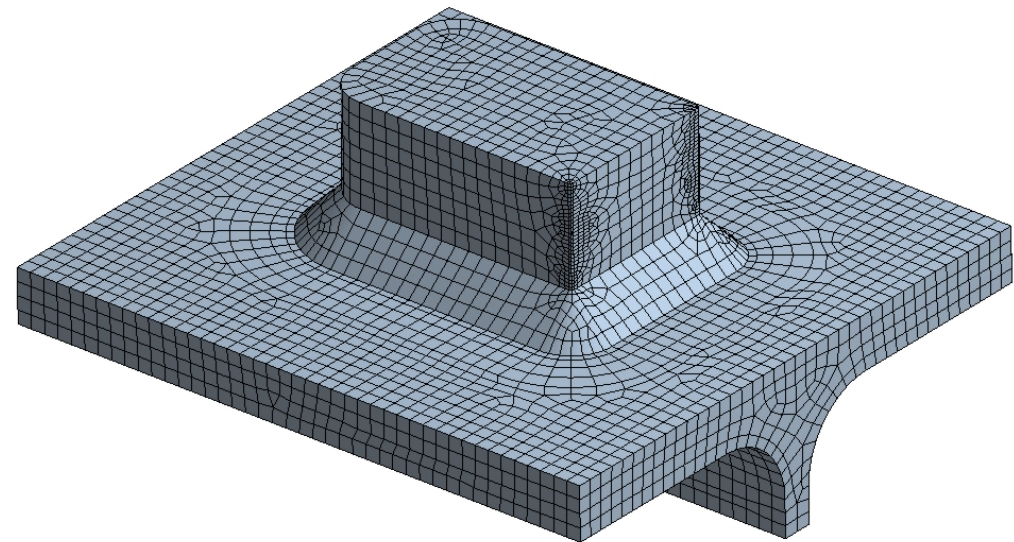
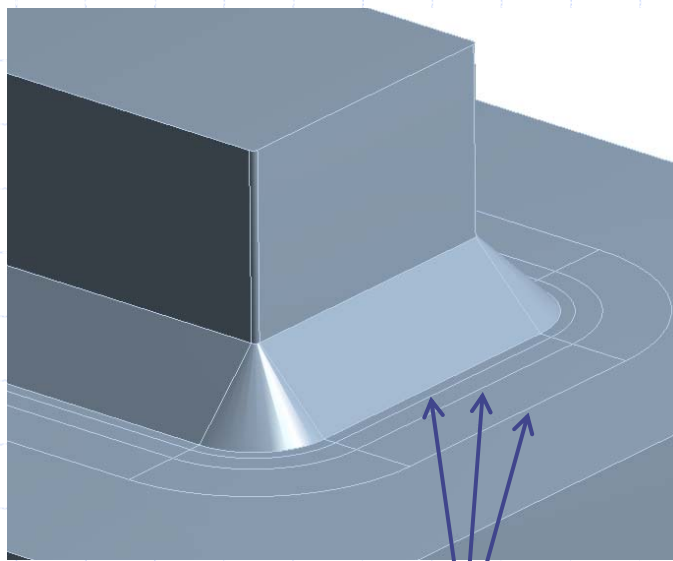
Kreuztraverse



Beispiel

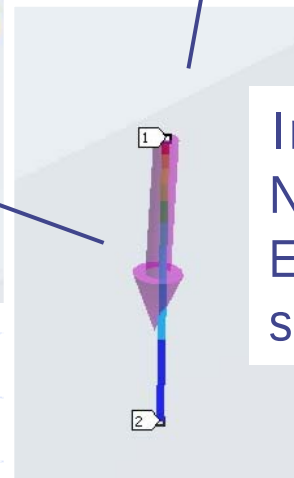
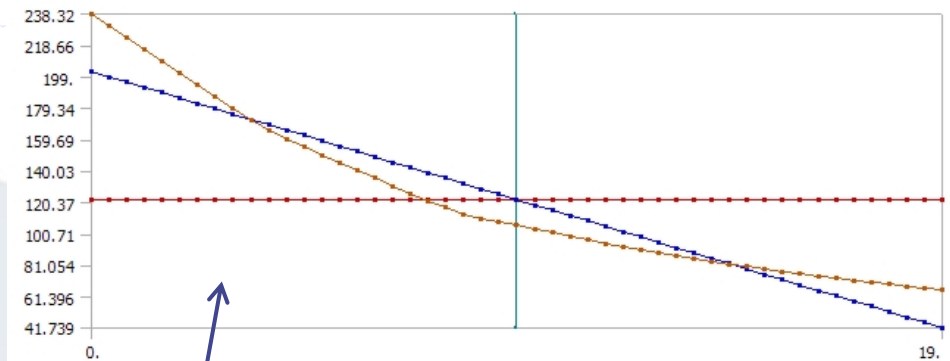
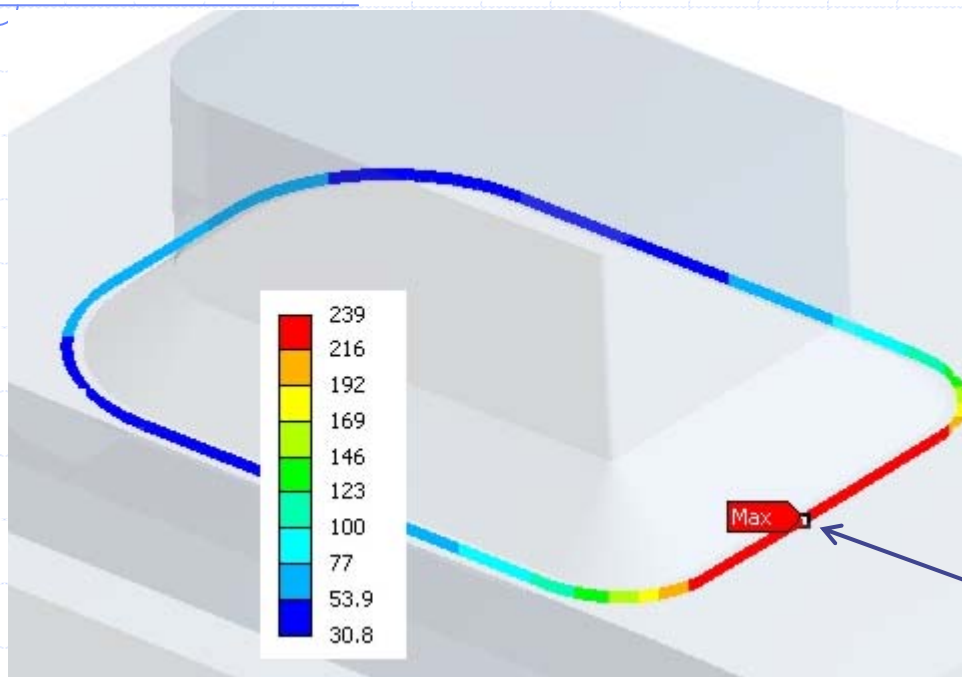
Strukturspannungen am Nahtübergang

Im Gesamtmodell sind alle Bauteile im Verbundkontakt. Erst im Submodell werden die Teile verschmolzen und die Kehlnähte als Fasen modelliert.



Prägungen für Haibach und Hot-Spot-Extrapolation zur besseren Steuerung der lokalen Vernetzung.

Haibach für Nahtübergang

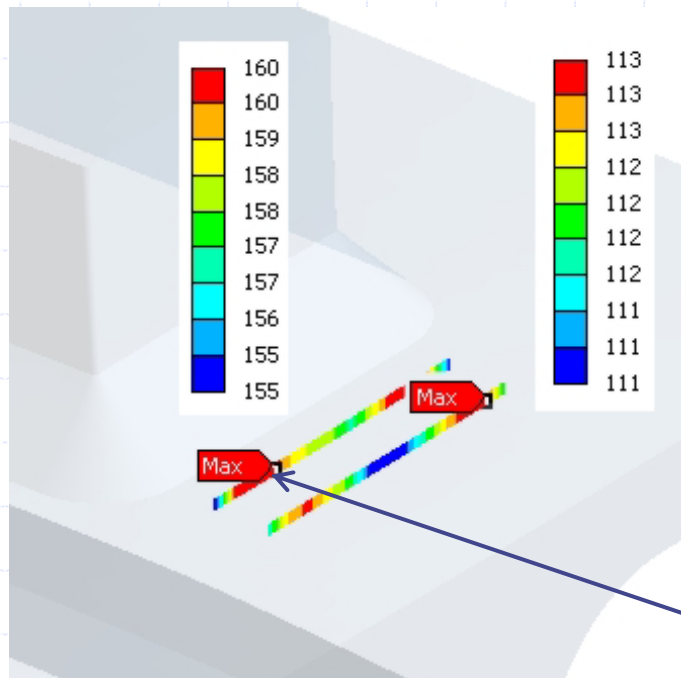


Innenlinearisierung im Nachweispoint zur Ermittlung der plastischen Stützzahl für σ_x .

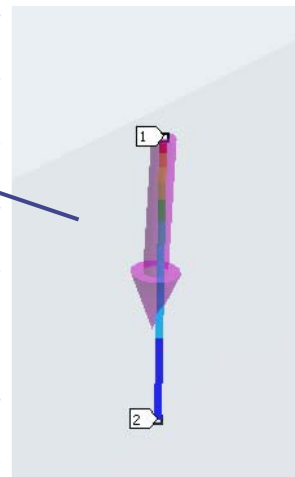
Vorteil: Die massgebenden Spannungen (σ_x / σ_y / τ) können direkt abgelesen werden.
Hier vereinfachend: $\sigma_1 = 239$ MPa

$$K_{p,\sigma_x} = \frac{\sigma_m + 1.5 \cdot \sigma_b}{\sigma_m + \sigma_b} = \frac{122 + 1.5 \cdot 80}{122 + 80} = 1.20$$

Hot-Spot für Nahtübergang

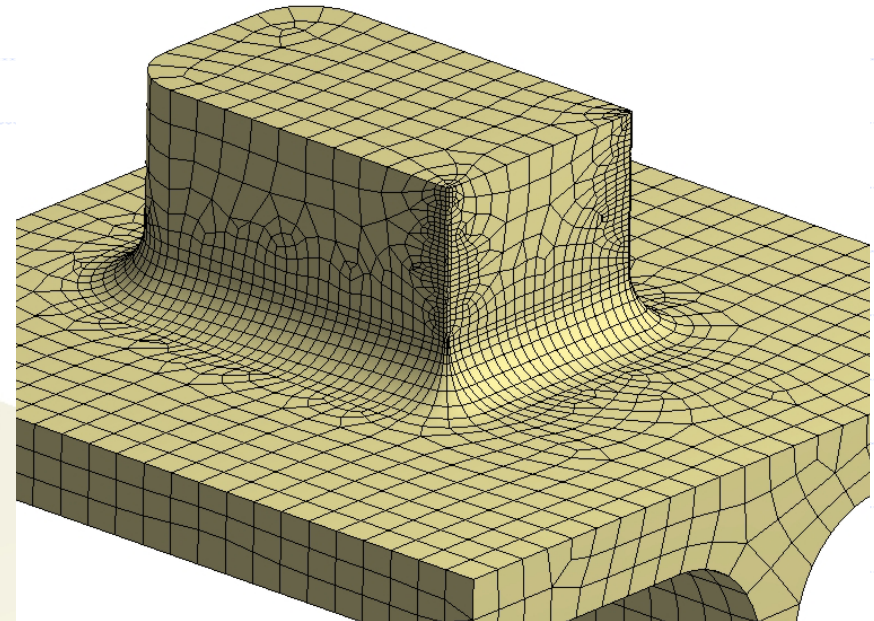
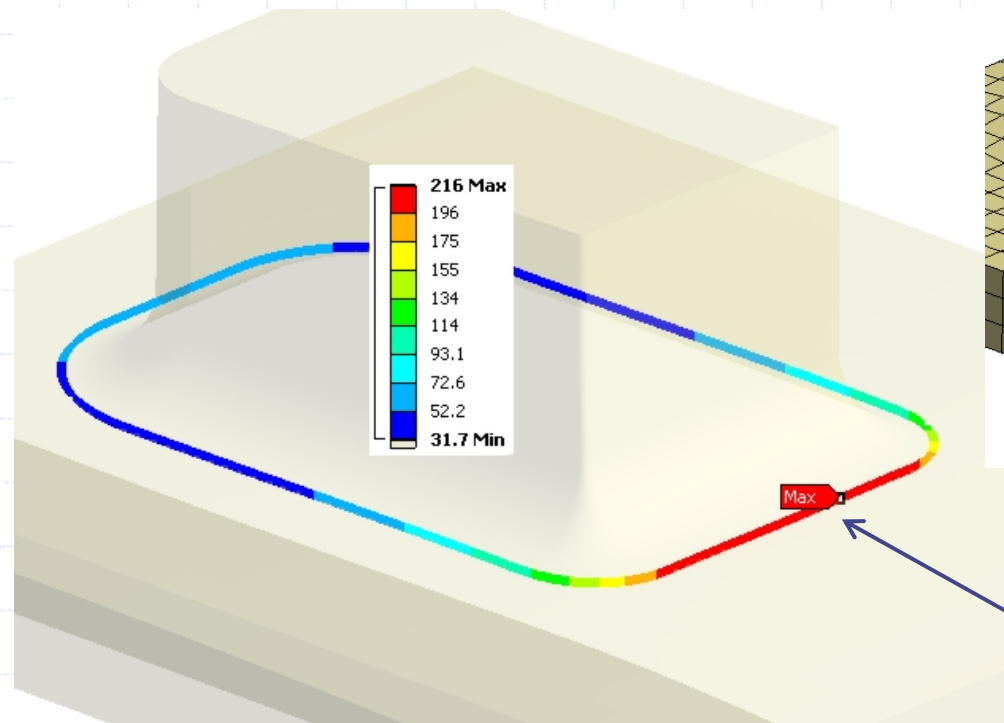


Extrapolationsvariante nach IIW linear
für alle 3 Spannungskomponenten
Hier vereinfachend: $\sigma_1 = 190$ MPa

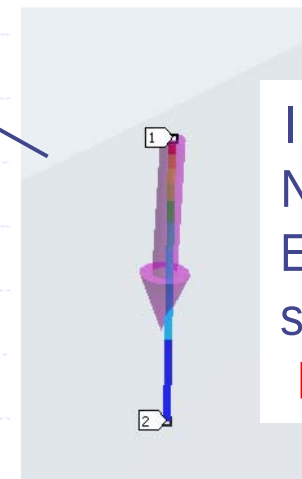


Die Innenlinearisierung für die plastische Stützzahl kann wegen der dortigen Singularität nicht am Nahtübergang durchgeführt werden.
Empfehlung: 1. Extrapolationspunkt verwenden.
 $K_p \approx 1.17$

CAB für Nahtübergang



Vorteil: Die massgebenden Spannungen können direkt abgelesen werden
Hier vereinfachend: $\sigma_1 = 216 \text{ MPa}$

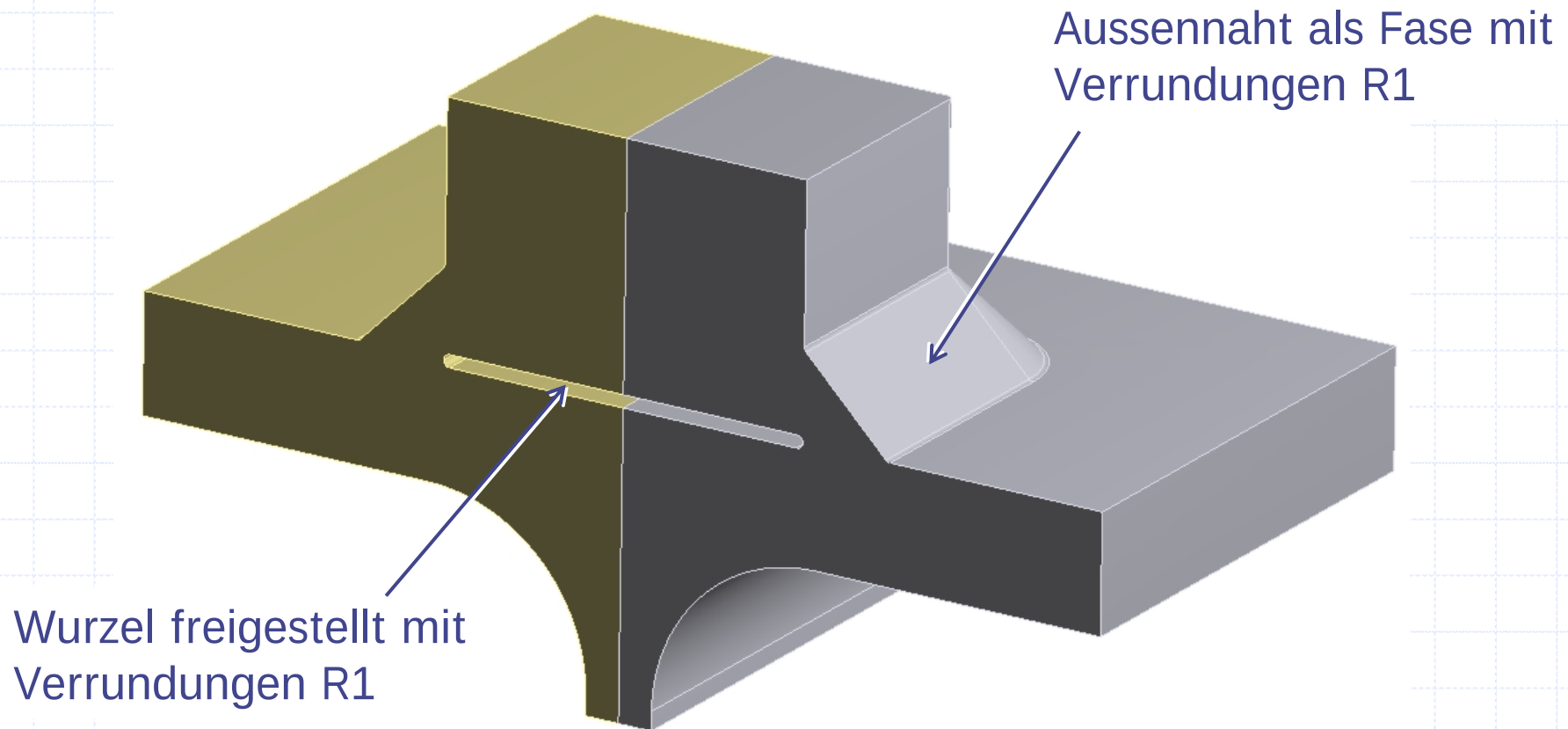


Innenlinearisierung im Nachweispoint zur Ermittlung der plastischen Stützzahl.

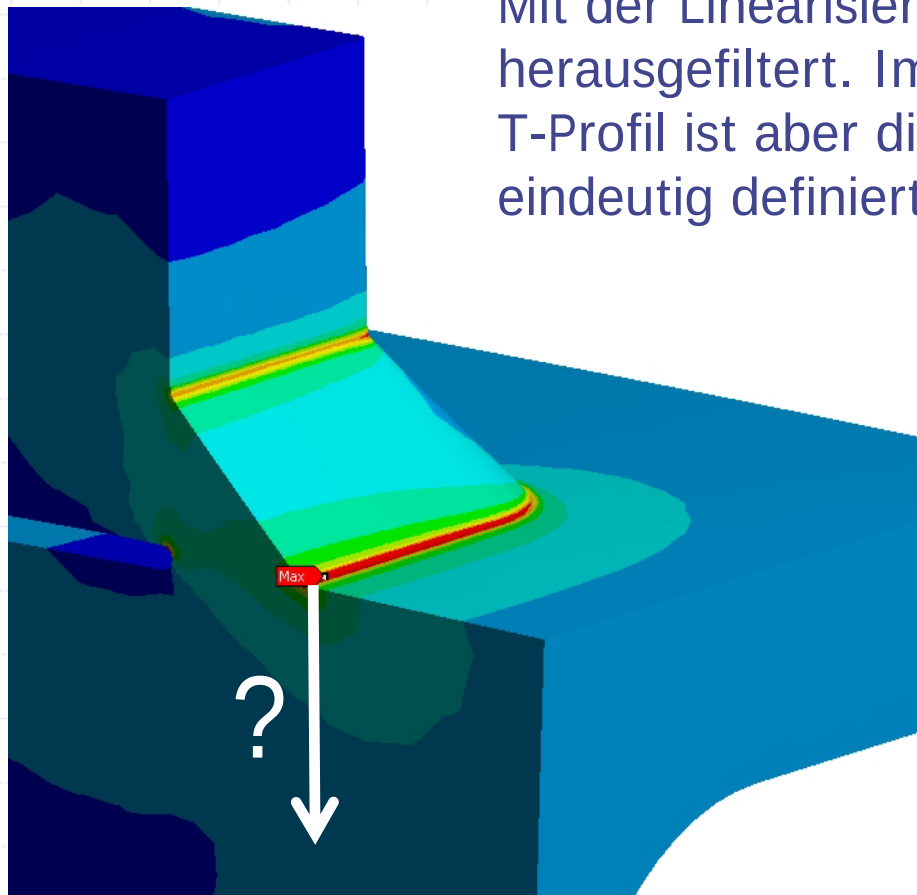
$$K_p \approx 1.19$$

Beispiel - Ansatz Schmied

Kerbspannungsmodell mit Wurzel



Auswertung Nahtübergang



Mit der Linearisierung wird die Kerbwirkung der Naht herausgefiltert. Im vorliegenden Fall mit dem Doppel-T-Profil ist aber die Pfadlänge im Profilsteg nicht eindeutig definiert.

Mit dem im CADFEM Seminar vorgeschlagenen Ansatz ergeben sich vereinfacht (Hauptspannung statt Komponenten):

$$\sigma_1 = 263 \text{ MPa} / K_p \approx 1.22$$

Empfehlung:

Bei unklarer Pfadlänge das absolute Spannungsniveau ($\sigma_m + \sigma_b$) immer mit Haibach oder Hot-Spot verifizieren.

Methodenvergleich für Nahtübergang

	$\sigma_{1,m+b}^{1)}$	$K_p^{2)}$	$a_{SK}^{3)}$
Haibach	239	1.20	84 %
R1-Modell	263	1.22	80 %
CAB	216	1.19	75 %
Hot-Spot	190	1.17	69 %

1) grösste Haupt-Strukturspannung σ_1

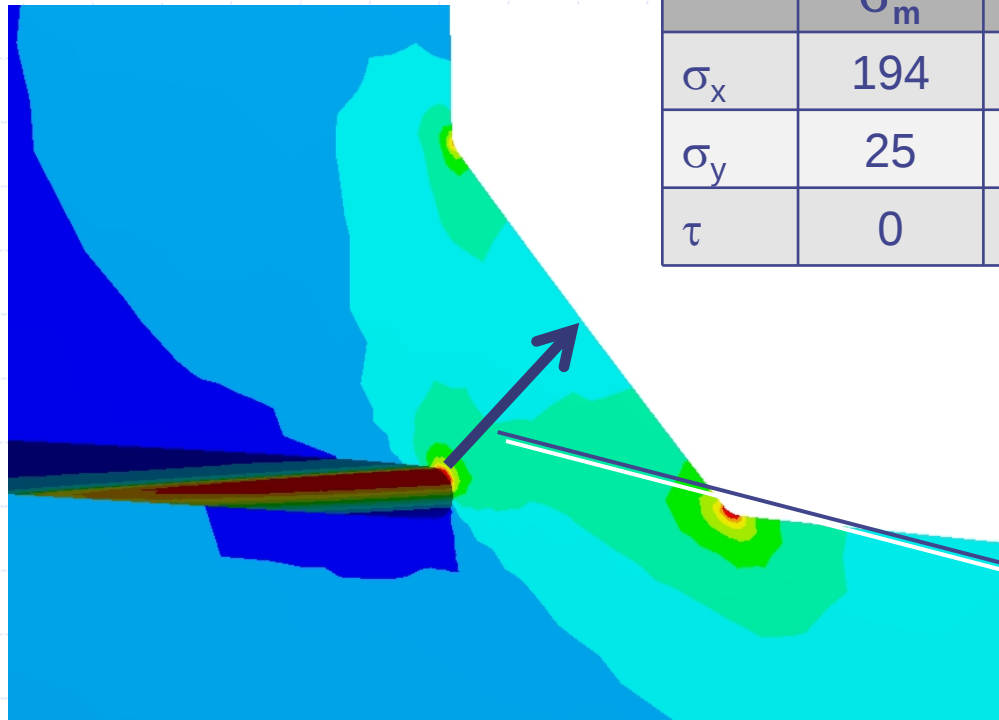
2) Plastische Stützzahl für σ_1

3) Höchster Einzelauslastungsgrad einer Spannungskomponente (σ_x, σ_y)

Hinweis:

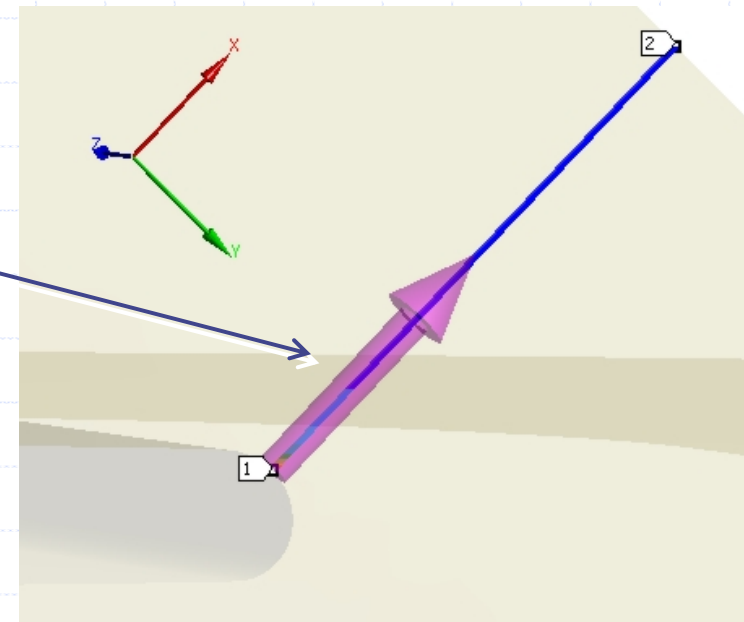
Die „Rangfolge“ bei den Auslastungsgraden ist abhängig von der Geometrie und der Belastung.

Auswertung Nahtwurzel



Linearisierung 45°-Pfad

	σ_m	σ_b	$\sigma_m + \sigma_b$	σ_{tot}	K_p
σ_x	194	70	264	582	1.15
σ_y	25	40	65	142	1.30
τ	0	0	0	0	1.0



Verschiedenes

Verschiedenes

Nächstes CADFEM-Seminar

Rechnerische Festigkeitsnachweise von Schweißverbindungen

Dr. Jürgen Rudolph, AREVA NP GmbH, Erlangen

Beat Schmied, Schmied Engineering GmbH, Gerlafingen

Aadorf 7. - 10. Juli 2010

Verschiedenes

Literatur

- Lit. 1 Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile FKM-Richtlinie Ausgabe 5, 2003
- Lit. 2 Verbessertes Berechnungskonzept FKM-Richtlinie Vorhaben Nr. 282, Abschlussbericht
- Lit. 3 Festigkeit geschweisster Bauteile DVS-Berichte Band 256
- Lit. 4 CADFEM-Seminar Schweissnahtberechnung