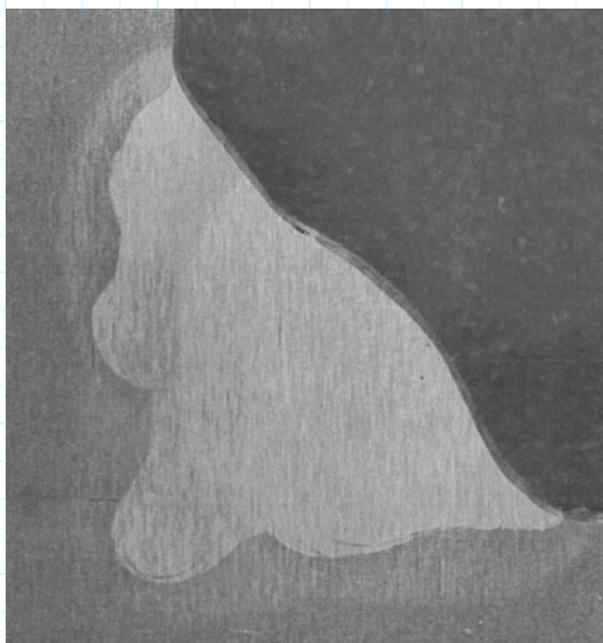


FEM-Festigkeitsnachweis / Baustahl S235 Strukturspannung in einer Schweißnaht



Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Problemstellung	2
2. Parameter und Konstanten	3
3. Statischer Festigkeitsnachweis	4
3.1 Spannungskennwerte aus FEM	4
3.2 Werkstoffkennwerte	5
3.3 Konstruktionskennwerte	6
3.4 Bauteilfestigkeit	7
3.5 Sicherheitsfaktoren	8
3.6 Nachweis	9
Anhang	10

1. Problemstellung

An den **Nahtübergängen** einer Schweißkonstruktion werden in der Regel lokale Spannungsüberhöhungen erwartet. Hierbei kann eine tatsächliche Schweißnahtgeometrie (z.B. im Titelbild) nicht exakt in einem universellen FEM-Modell abgebildet werden. Beim Weglassen der Nahtgeometrie würden einspringende Ecken jedoch Singularitäten im FEM-Modell verursachen. Das Spannungsergebnis wäre dadurch im Bereich der singulären Stelle stark verfälscht.

Mit einem entsprechenden Innenradius (Abb. 1) als Ersatz für die Schweißnahtgeometrie entsteht ein konvergenzfähiges FEM-Modell, zugleich werden die Auswertestellen der sogenannten **Strukturspannung** gebildet. Weiterhin liefert diese Methode konservative (s. Anhang) und zuverlässige Spannungsergebnisse.

$$a_{min} := 3 \text{ mm}$$

Abb. 1, links

$$R_{min} := a_{min} \cdot \sqrt{2} = 4.24 \text{ mm}$$

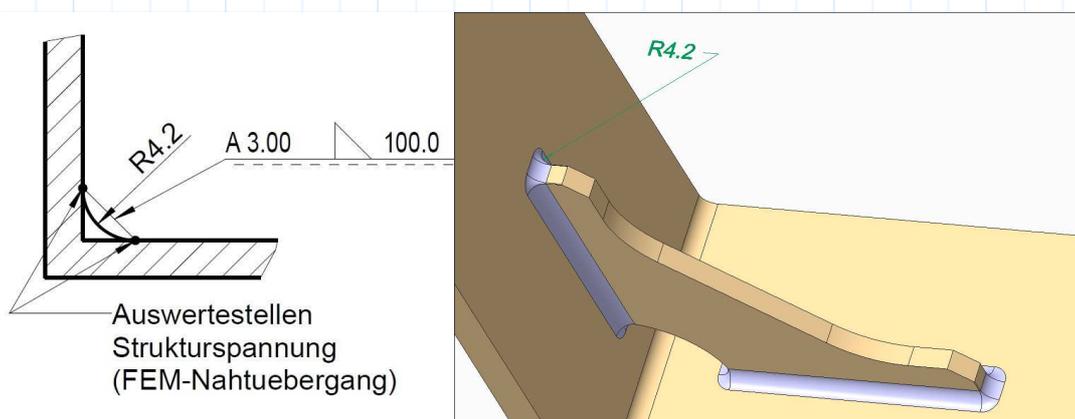


Abbildung 1: universeller FEM-Nahtübergang mit dem Mindestradius 4,2 mm

Gegenüber der "echten" Kerbspannung ist die rechnerisch reduzierte Strukturspannung praktikabel und wird in der **FKM-Richtlinie** (6. Auflage 2012) sowohl bei dem **statischen Festigkeitsnachweis** als auch bei dem Ermüdungsfestigkeitsnachweis verwendet.

Im deutlich einfacheren **Eurocode 3** gibt es lediglich für die Ermüdung entsprechende Kerbfälle.

2. Parameter und Konstanten

$$E := 210000 \text{ MPa}$$

Elastizitätsmodul, Tabelle 3.3.3

$$R_e := 240 \text{ MPa}$$

Streckgrenze bei Blechdicken bis 40 mm,
Tabelle 5.1.24

$$R_m := 360 \text{ MPa}$$

Zugfestigkeit, Tabelle 5.1.24

$$\varepsilon_{ertr} := 0.05$$

ertragbare Gesamtdehnung, Tabelle 3.3.3

$$\varepsilon_{ertr} := 0.01$$

korrigierte ertragbare Dehnung 1%:
sichere Annahme (konservativ)

Begründung: Die FKM-Richtlinie verwendet die Neuber-Umrechnung der ertragbaren Dehnung auf die elastischen Spannungen (fiktive Dehngrenze) mittels eines idealplastischen Materialverhaltens. Dennoch sind die Abweichungen zur Realität bei dieser Umrechnung lediglich bis 1-2% Dehnung gering. Insbesondere besteht bei größeren Dehnungswerten die Gefahr geometrischer Nichtlinearität: Tests haben gezeigt, dass bei örtlichen Dehnungswerten bis 1% keine geometrischen Nichtlinearitäten zu erwarten sind.

3. Statischer Festigkeitsnachweis

3.1 Spannungskennwerte aus FEM

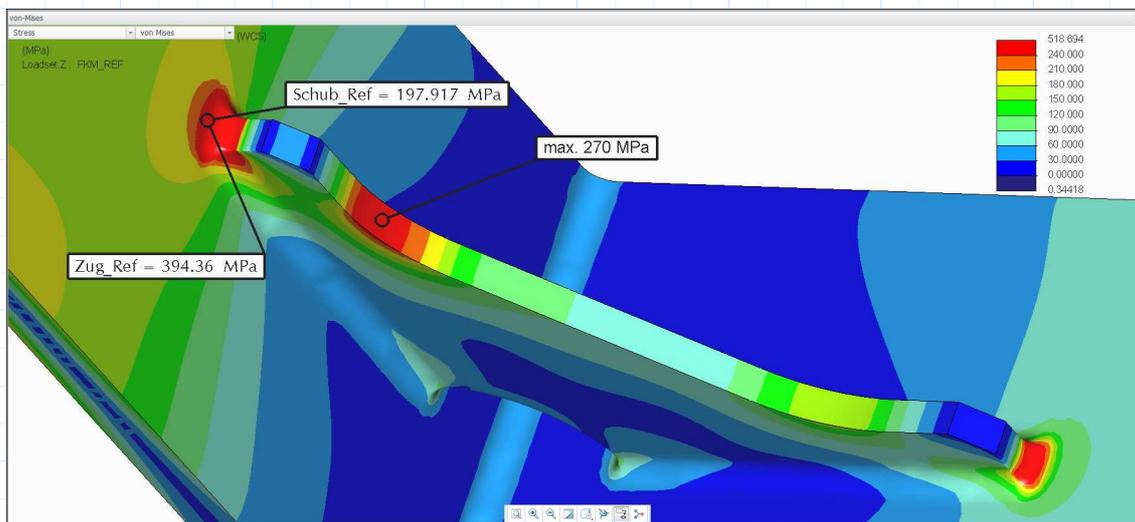


Abbildung 2: Farbplots der maximalen Spannungen

$$\sigma_v := 270 \text{ MPa}$$

maximale Vergleichsspannung nach v.Mises im Grundwerkstoff (ungeschweißt)

$$\sigma_{quer} := 394.36 \text{ MPa}$$

maximale Normalspannung quer zur Schweißnaht (betragsmäßig größte Hauptnormalspannung)

$$\tau_{laengs} := 197.92 \text{ MPa}$$

Schubspannung längs der Schweißnaht an der gleichen Stelle

Vergleichsspannung (3.1.14) am Nahtübergang:

$$\sigma_{vw} := \sqrt{\sigma_{quer}^2 + \tau_{laengs}^2} = 441.2 \text{ MPa}$$

3.2 Werkstoffkennwerte

$$R_p := R_e = 240 \text{ MPa}$$

$$R_m = 360 \text{ MPa}$$

3.3 Konstruktionskennwerte

$$K_p := 4$$

plastische Formzahl aus FEM
(berechnetes Durchplastifizieren)

$$n_{pl} := \min \left(\sqrt{\frac{E \cdot \varepsilon_{ertr}}{R_p}}, K_p \right) = 2.96$$

plastische Stützzahl, 3.3.13
(örtliches bzw. globales Versagen)

$$\alpha_w := 0.95$$

Schweißnahtfaktor der Kehlnaht,
Tabelle 3.3.5

3.4 Bauteilfestigkeit

$$\sigma_{SK} := R_p \cdot n_{pl} = 709.9 \text{ MPa}$$

im Grundwerkstoff, 3.4.2

$$\sigma_{SK_w} := R_p \cdot n_{pl} \cdot \alpha_w = 674.4 \text{ MPa}$$

in der Schweißnaht, 3.4.4

3.5 Sicherheitsfaktoren

$$j_s := 1$$

Lastfaktor, sichere Lastannahme

$$j_p := 1.25$$

Grund-Sicherheitsfaktor gegen Fließen, mittlere Schadensfolge, niedrige Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Spannung, Tabelle 3.5.1

$$K_{T_p} := 1$$

Normaltemperatur

$$\frac{R_p}{R_m} = 0.67$$

niedriges Streckgrenzenverhältnis (<0,75)

$$j_z := 1$$

Zusätzlicher Teil-Sicherheitsfaktor, Tabelle 3.5.2, 3.5.3

$$j_{ges} := j_s \cdot j_z \cdot \max\left(\frac{j_p}{K_{T_p}}\right) = 1.25$$

abgeleitet aus 3.5.5

3.6 Nachweis

Im nichtgeschweißten Bereich:

$$a_{SK} := \frac{\sigma_v}{\frac{\sigma_{SK}}{\dot{j}_{ges}}} = 0.48 \quad \text{im Grundwerkstoff, 3.6.14}$$

Der statische Auslastungsgrad beträgt im nichtgeschweißten Bereich

$$a_{SK_Prozent} := a_{SK} \cdot 100 = 48 \quad \%$$

Der statische Festigkeitsnachweis ist **erbracht**.

Am Nahtübergang:

$$a_{SK_w} := \frac{\sigma_{vw}}{\frac{\sigma_{SK_w}}{\dot{j}_{ges}}} = 0.82 \quad \text{in der Schweißnaht, 3.6.16}$$

Der statische Auslastungsgrad beträgt im geschweißten Bereich

$$a_{SK_w_Prozent} := a_{SK_w} \cdot 100 = 82 \quad \%$$

Der statische Festigkeitsnachweis ist **erbracht**.

Anhang:

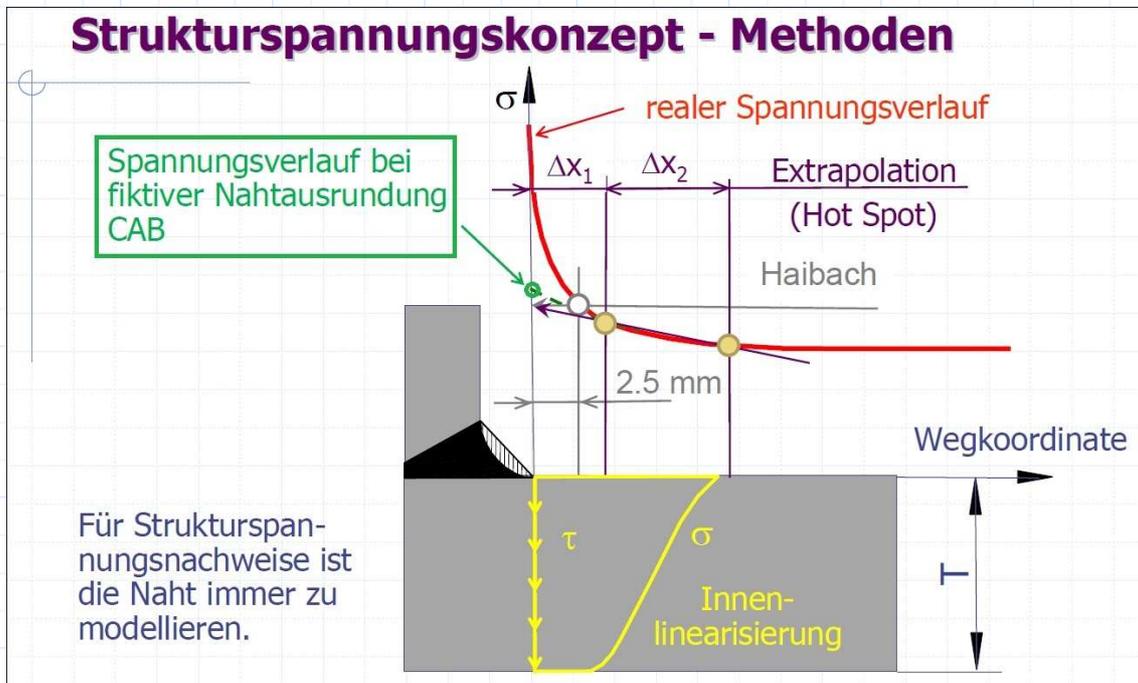


Abbildung 3: Spannungsverlauf bei fiktiver Nahtausrundung

(Auszug aus "CADFEM 2010 Statischer Nachweis von Schweißnahten")

Bei fiktiver Nahtausrundung liegen die berechneten Werte der Strukturspannung stets auf der sicheren Seite, bis zu 25-30% höher als Hot Spot Extrapolation. Damit ist die Methode recht konservativ, jedoch zuverlässig, denn Singularitäten sind im FEM-Modell nicht vorhanden.