



Erweiterung des Betriebsfestigkeitsnachweises mittels ACT

Basierend auf dem Kerbdehnungskonzept unter
Berücksichtigung des Größeneffektes

Alexander Niederwanger, Markus Ladinek

Rapperswil, 14.06.2018

Arbeitsbereich für Stahlbau und Mischbautechnologie

Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften

Universität Innsbruck

Forschungstätigkeit:

- Ermüdung
- Bruchmechanik
- Stabilität
- Windingenieurwesen
- Normungstätigkeiten
- Softwareentwicklung

Lehre:

- Stahlbau
- Grundlagen des Verbundbaus
- Glasbau, Fassadenbau
- Sonderkapitel Metallbau
- Anwendung der FEM
- Seilbahnbau

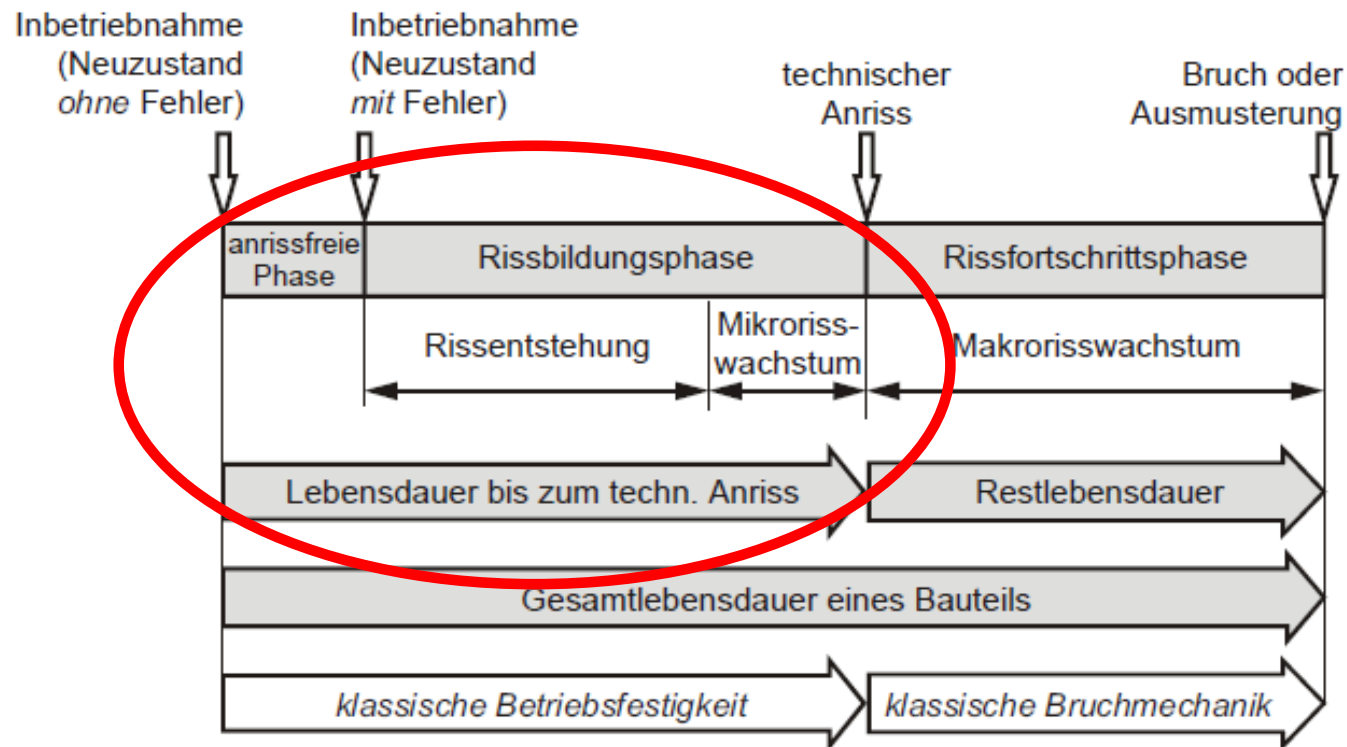
Grundlagen der Materialermüdung

Bauteile weisen unter zyklischer Beanspruchung geringere Festigkeiten als im statischen Fall auf.

Einteilung in **LCF** und **HCF**

Vielzahl an Einflussfaktoren → präzise Vorhersagen anspruchsvoll

Lebensdauer eines Bauteils



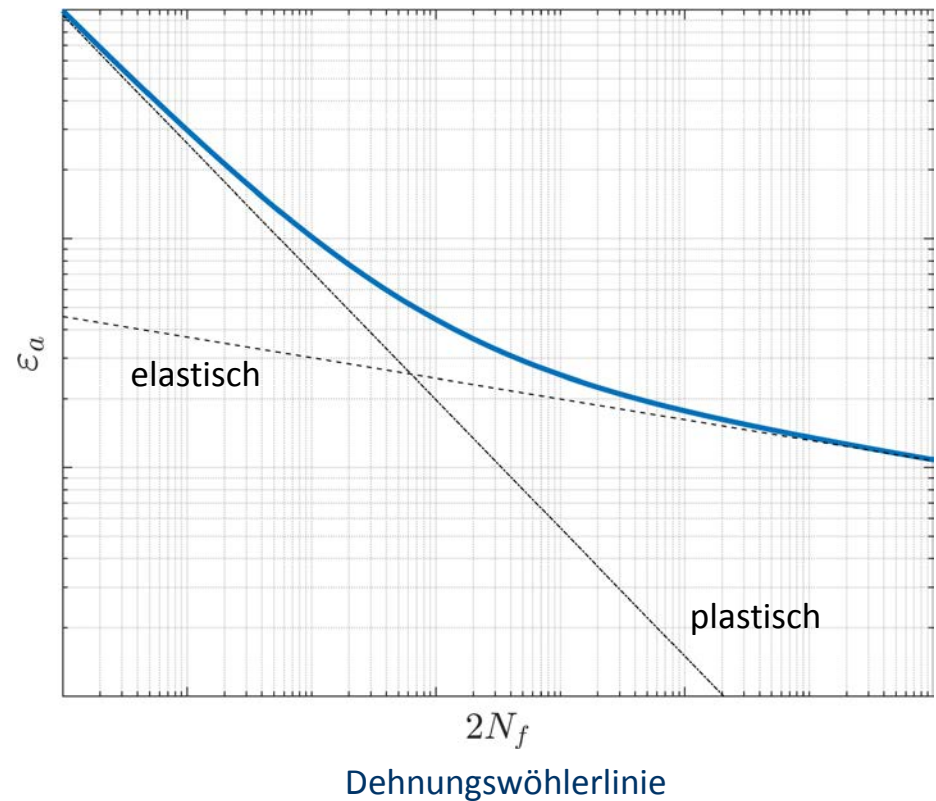
Gesamtlebensdauer, aus [San17]

Kerbdehnungskonzept

elastisch-plastische Kerbdehnungen

Vergleich mit Dehnungswöhlerlinien

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c$$



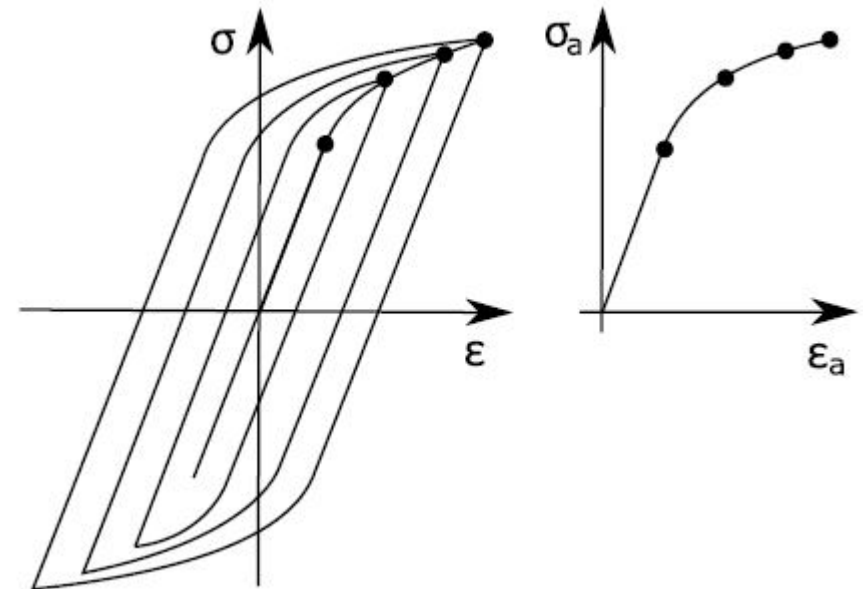
Zyklisch stabilisierte Spannungs-Dehnungskurve

Annahmen:

- Masing-Verhalten
- Werkstoffgedächtnis (Memory Effekt)

Beschreibung mittels Ramberg-Osgood

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'}\right)^{1/n'}$$



Hystereseschleifen und zyklische σ - ε Kurve, vgl. [RV07]

Verwendete Regelwerke (Auszug)

FKM Richtlinie, 6. Auflage 2012

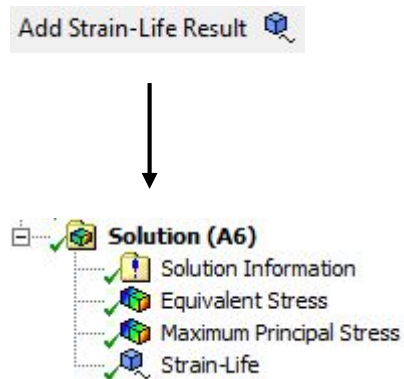
Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile

FKM Richtlinie Nichtlinear, 2016 (Vorhaben Nr. 301)

Rechnerischer Bauteilfestigkeitsnachweis unter expliziter Erfassung nichtlinearen Werkstoff-Verformungsverhaltens (Abschlussbericht)

Implementierung mittels ACT

Post-Processing Aufsatz im Mechanical



Analyse Settings:

- Materialverhalten
- Mittelspannungskorrektur
- Versagenshypothese
- Größeneffekt
 - statistisch
 - Spannungsgradient

Abbildung des Materialverhaltens

Plastizitätskorrektur nach Neuber

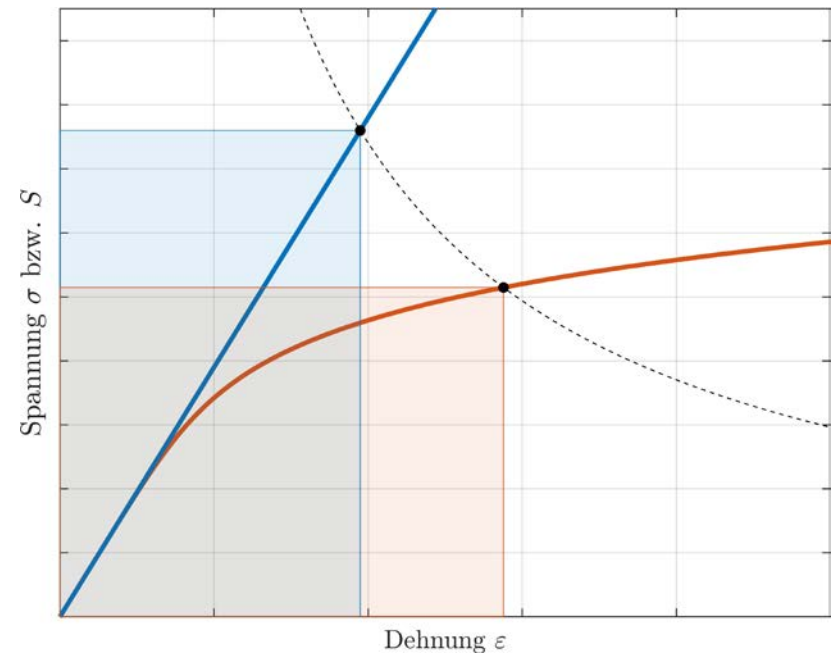
Linear elastische FE-Rechnung

→ lokale Dehnungen/Spannungen durch Neuberhyperbel bestimmt

$$\frac{S_e^2}{E} = \varepsilon \cdot \sigma$$

Generalisierte Neuber-Regel

Plastisches Verhalten des Nettoquerschnitts berücksichtigt



Grafische Darstellung der Neuber-Regel, vgl. [IB17]

Abbildung des Materialverhaltens

Plastizität bereits in der FE-Rechnung berücksichtigen

Eingabe der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve

Engineering Data → *Multilinear Kinematic Hardening*

- + keine nachträgliche Korrektur notwendig
- + Umlagerungseffekte werden berücksichtigt
- mehr Rechenzeit

Mittelspannungskorrektur

Smith-Watson-Topper

- SWT-Parameter

$$P_{SWT} = \sqrt{\sigma_{max} \cdot \varepsilon_a \cdot E}$$

→ neue Wöhlerlinie (P-N)

- Äquivalente Schwingbreite (für $\sigma_m = 0$)

→ Wöhlerlinie ändert sich nicht

Mittelspannungskorrektur

Morrow

Elastischer Bereich der Wöhlerlinie wird angepasst

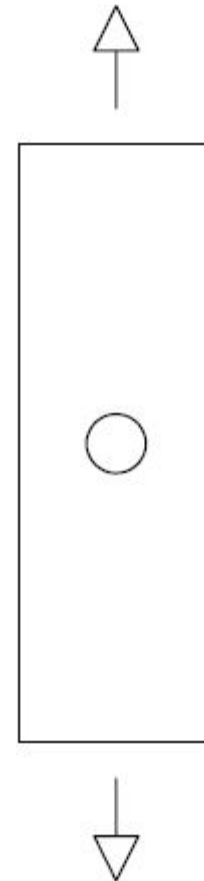
$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c$$

Versagenstheorie

Signed von Mises Vergleichsspannung/-dehnung

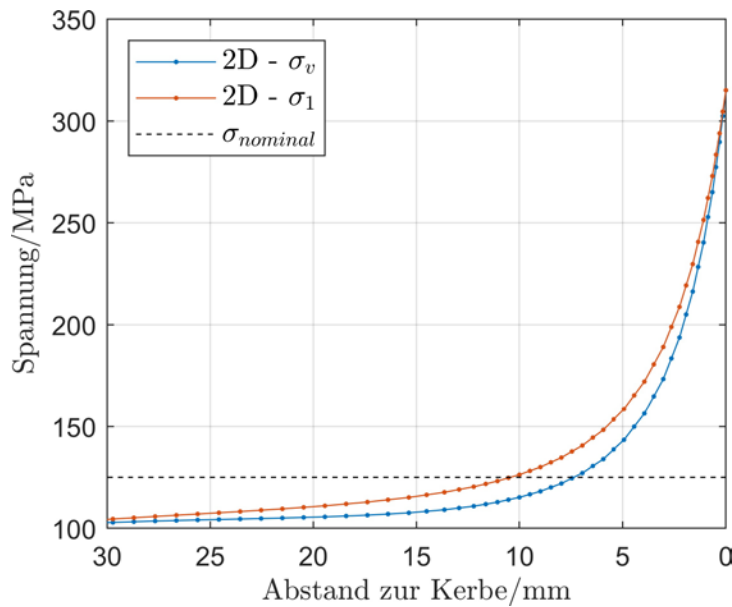
Vergleichsspannung mit Vorzeichen der
betragsmäßig größten Hauptnormalspannung

Hauptnormalspannung/-dehnung

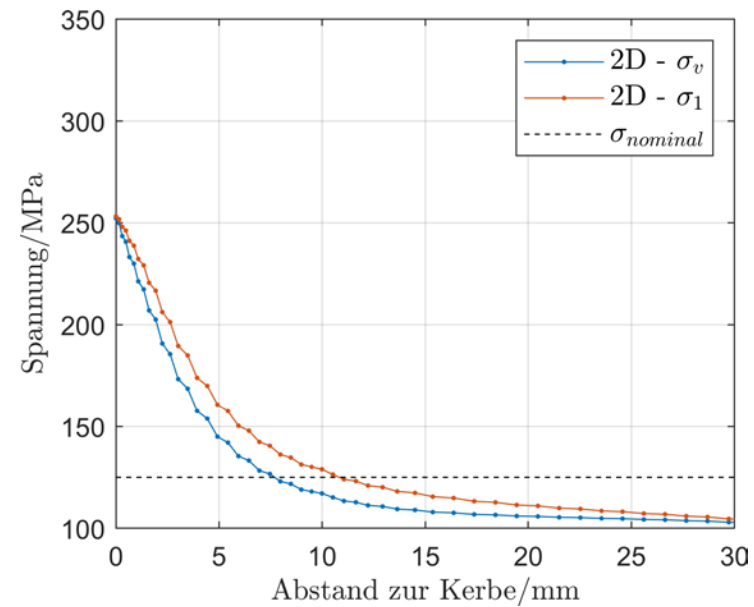


Vergleichsspannung vs. Hauptnormalspannung (Dehnung)

2D-Modellierung - Ebener Spannungszustand



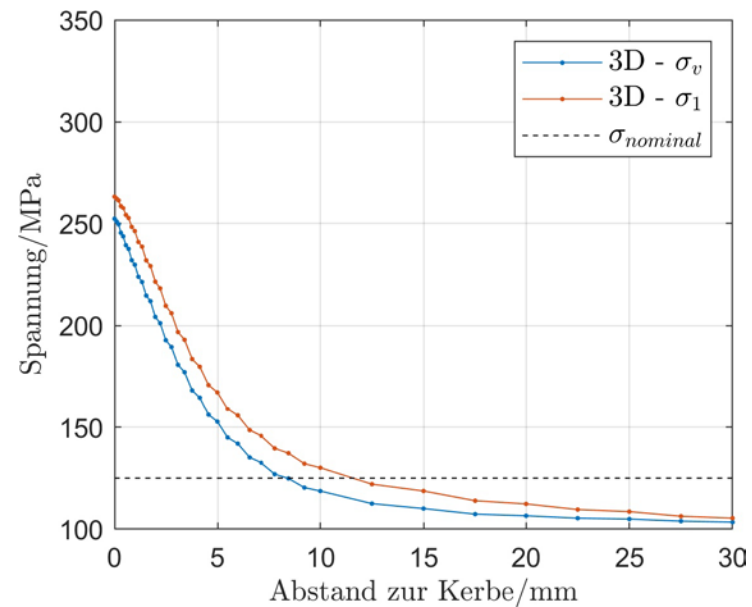
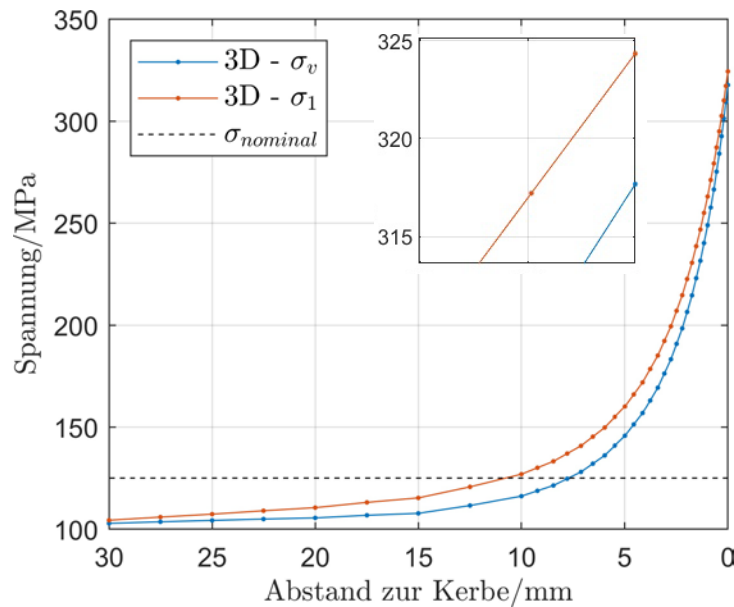
linear-elastische Berechnung



plastische Berechnung

Vergleichsspannung vs. Hauptnormalspannung (Dehnung)

3D-Modellierung - Mehraxialer Spannungszustand an der Kerbe



Vergleichsspannung vs. Hauptnormalspannung (Dehnung)

Hauptnormalspannung/-dehnung

Richtung bei nicht-proportionaler Belastung oder plastischem Materialverhalten ändert sich → was wird verwendet?

Vergleichsspannung/-dehnung

Problem der Richtungsänderung nicht vorhanden

Plastizität → Argument für Vergleichsspannung?

Größeneffekt(e)

Berücksichtigt über Stützzahlen (nach FKM)

$$n = n_{st} \cdot \cancel{n_{vm}} \cdot n_{bm}$$

Verformungsmechanischer Größeneinfluss im örtlichen Konzept bereits berücksichtigt $\rightarrow n_{vm} = 1$

Statistischer Größeneinfluss

$$n_{st} = \left(\frac{A_{ref,st}}{A_{\sigma,st}} \right)^{1/k_{st}}$$

$A_{ref,st}$ Referenzfläche = 500 mm²

k_{st} Weibullexponent (= 30 für Stahl)

Hochbeanspruchte Oberfläche

- Limit angeben (zb. 90%)
- Mittels Weibullverteilung

$$A_{\sigma,st} = \int_A \left(\frac{\sigma}{\sigma_{max}} \right)^{k_{st}} dA$$

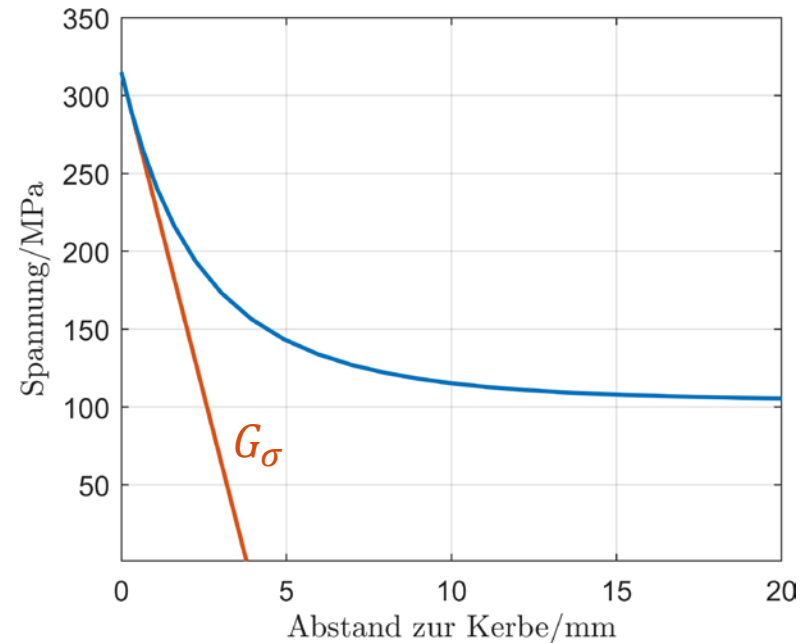
Bruchmechanischer Größeneinfluss

Berücksichtigt den Spannungsgradienten

$$n_{bm} = \frac{5 + \sqrt{G_\sigma \cdot [mm]}}{k_{bm}}$$

$$k_{bm} = 5 \cdot n_{st} + \left(\frac{R_m}{R_{m,bm}} \right) \cdot \sqrt{\frac{7.5 + \sqrt{G_\sigma \cdot [mm]}}{1 + 0.2 \cdot \sqrt{G_\sigma \cdot [mm]}}}$$

$R_{m,bm}$ Referenzzugfestigkeit (= 680 MPa für Stahl)



Spannungsgradient - simple Geometrie

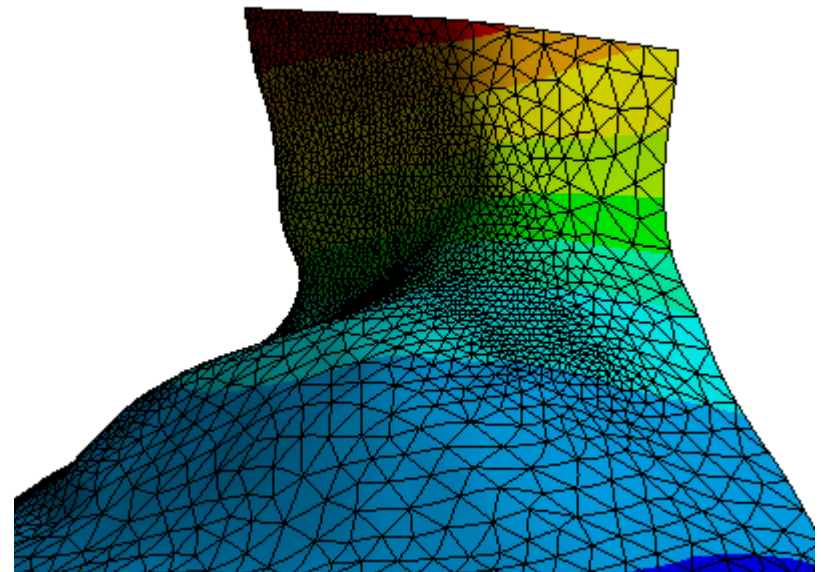
Bruchmechanischer Größeneinfluss

Berücksichtigt den Spannungsgradienten

$$n_{bm} = \frac{5 + \sqrt{G_\sigma \cdot [mm]}}{k_{bm}}$$

$$k_{bm} = 5 \cdot n_{st} + \left(\frac{R_m}{R_{m,bm}} \right) \cdot \sqrt{\frac{7.5 + \sqrt{G_\sigma \cdot [mm]}}{1 + 0.2 \cdot \sqrt{G_\sigma \cdot [mm]}}}$$

$R_{m,bm}$ Referenzzugfestigkeit (= 680 MPa für Stahl)



Reale Schweißnahtgeometrie

Kritikpunkte

Inkonsistenz

- Plastizitätskorrektur für Nachweisführung
- Gradient und statistische Stützzahl aber mit elastischen Spannungen

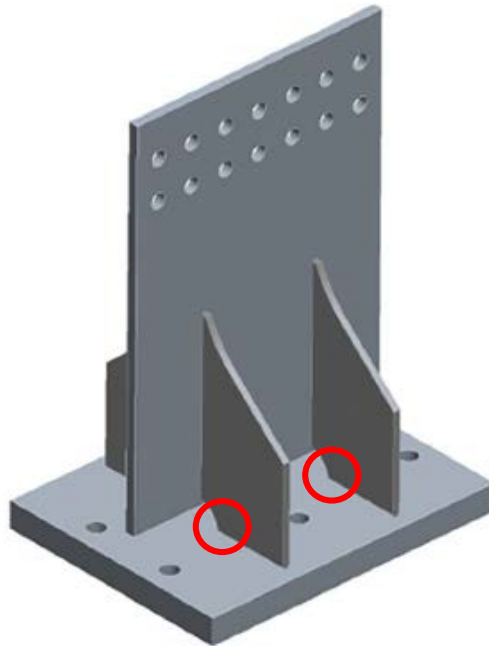
Verbesserungsvorschlag

Plastizität direkt über Materialmodell berücksichtigen

→ Gradient flacher, hochbeanspruchte Fläche größer

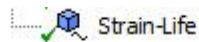
→ Anpassung notwendig

Berechnungsbeispiel



Probekörper und Versuchsaufbau, aus [LLS15]

Eingabemaske

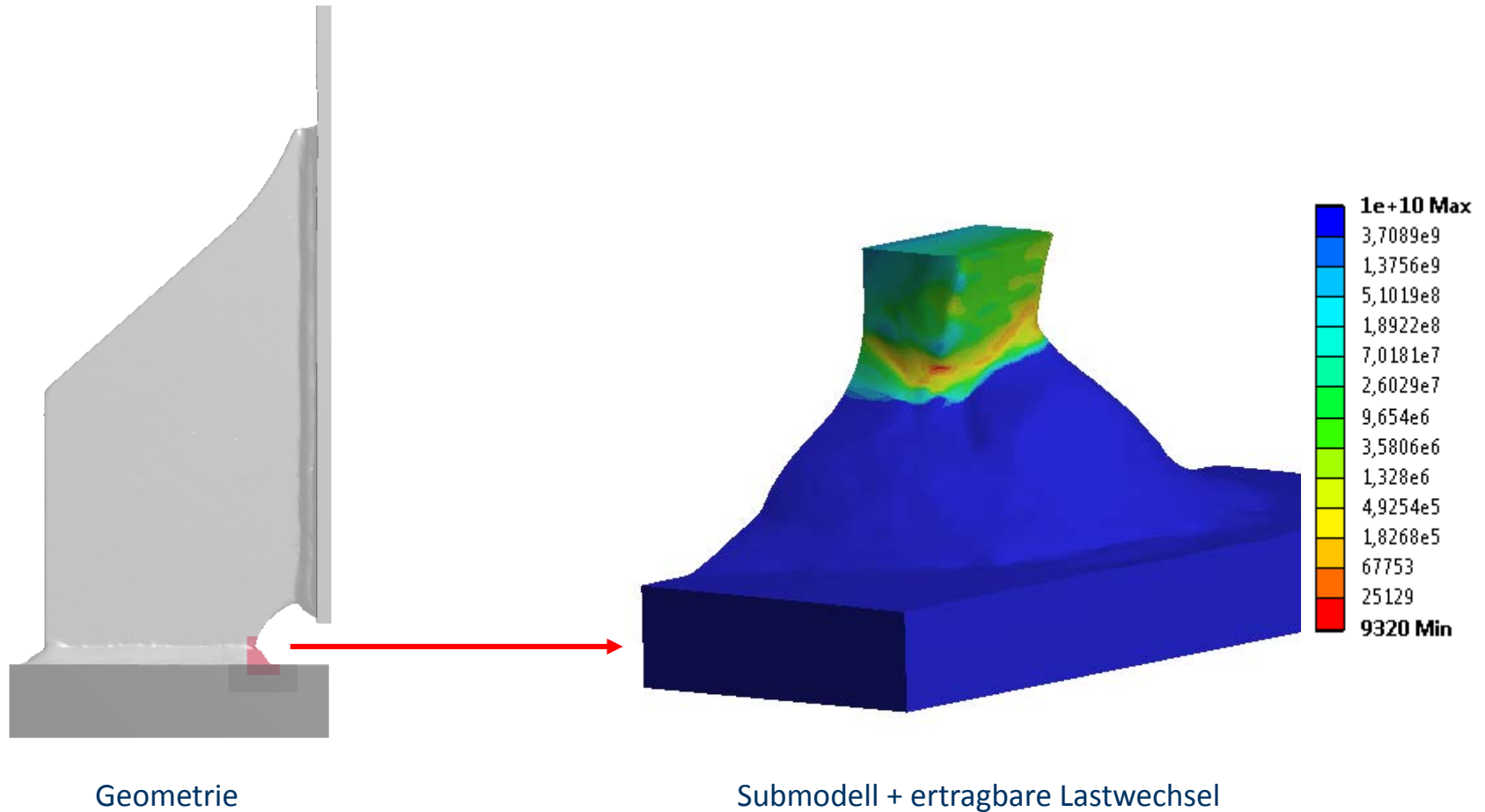


Geometry	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Analysis Settings	
By	Time
Upper Peak	1
Lower Peak (optional)	2
Component	von Mises Equivalent
Mean-Stress Correction	Smith-Watson-Topper
SWT Method	Equivalent Amplitude
Plasticity Correction	Neuber
Display Output	Cycles

Parameters	
Define by	Values
E	210000 [MPa]
ν	0,3
σ_f'	735 [MPa]
ϵ_f'	0,59
<input type="checkbox"/> b	-0,087
<input type="checkbox"/> c	-0,58
K'	795,535 [MPa]
n'	0,15
Size Effect	
Statistical Effect	Highly Stressed Area (Weibull)
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	6 Faces
Reference Area	500 [mm mm]
Parameter k_{st}	30
Gradient Effect	Calculate from Gradient
Which Gradient	Maximum Gradient
Tensile Strength	490 [MPa]
Reference Tensile Strength	680 [MPa]

Materialparameter nach UML, [Hai02]

Modellierung und Ergebnisse





Literaturverzeichnis

- [FVW16] **M. Fiedler, I. Varfolomeev und M. Wächter**
Richtlinie Nichtlinear: Rechnerischer Bauteilfestigkeitsnachweis unter expliziter Erfassung nichtlinearen Werkstoff-Verformungsverhaltens.
FKM-Vorhaben Nr. 301. VDMA, Abschlussbericht, 2016.
- [Hai02] **Erwin Haibach**
Betriebsfestigkeit: Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung.
VDI-Buch. Springer, Berlin u.a., 2. Auflage, 2002.
- [IB17] **A. Ince und D. Bang**
Deviatoric neuber method for stress and strain analysis at notches under multiaxial loadings.
International Journal of Fatigue, 102:229–240, 2017.
- [LLS15] **G. Lener, R. Lang und J. Schmid**
Optimierungsmöglichkeiten an Freischnitten - Experimentelle und numerische Untersuchungen.
Stahlbau, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, Heft 6, 2015.

Literaturverzeichnis

- [RKV+12] **R. Rennert, E. Kullig, M. Vormwald, A. Esderts und D. Siegele**
Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile: Aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen.
FKM-Richtlinie. VDMA, 6. Auflage, 2012.
- [RV07] **D. Radaj und M. Vormwald**
Ermüdungsfestigkeit: Grundlagen für Ingenieure.
Springer-Verlag, Berlin, 3. Auflage, 2007.
- [San17] **Manuela Sander**
Sicherheit und Betriebsfestigkeit von Maschinen und Anlagen: Konzepte und Methoden zur Lebensdauervorhersage.
Springer Vieweg, Berlin, 2. Auflage, 2017.